

Научно-технический журнал

Издается с 2003 г.

Выходит один раз в квартал

Ноябрь 2015 года

Журнал включен в перечень ведущих рецензируемых журналов и научных изданий, утвержденный президиумом ВАК Министерства образования и науки РФ, в которых публикуются основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук

Главный редактор
Заместитель главного редактора
Ответственный секретарь

д.и.н., профессор И.Р. Плева
д.т.н., профессор А.А. Сытник
д.ф.-м.н., профессор В.В. Астахов

Редакционная коллегия: д.т.н., проф. И.И. Артюхов, д.ф.-м.н., проф. В.В. Астахов, д.ф.-м.н., проф. В.Б. Байбурин, д.ф.-м.н., проф. Д.А. Зимняков, д.т.н., проф. В.А. Крысько, д.т.н., проф. В.Н. Лясников, д.т.н., проф. И.В. Родионов, д.т.н., проф. А.А. Сытник, д.т.н., проф. Ю.Б. Томашевский, д.т.н., проф. В.А. Хрусталева

Редактор Л.А. Скворцова
Компьютерная верстка Ю.Л. Жупиловой
Перевод на английский язык А.Х. Аскаровой
Ответственный за размещение полнотекстовой версии журнала
на сайте eLIBRARY.ru М.И. Балакин

Адрес редакции:
Саратов, 410054, ул. Политехническая, 77
Телефон: (845 2) 99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Факс: (845 2) 52-53-02

Подписано в печать 25.11.15
Формат 60×84 1/8 Бум.офсет.
Усл. печ. л. 29,0 Уч.-изд. л. 15,2
Тираж 500 экз. Заказ 185
Отпечатано в Издательстве СГТУ,
410054, г. Саратов, ул. Политехническая, 77

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

Подписной индекс 18378
(каталог Газеты. Журналы на 1-е полугодие 2016 г.)



Scientific Journal

Since 2003

Once in a quarter

November 2015

This journal is included into the list of leading reviewed journals and scientific publications approved by the presidium of Ministry of Education and Sciences of Russian Federation where major scientific thesis's results for academic degree competition for a doctor and a candidate of sciences

Editor-in-chief
Editor-in-chief assistant
Executive secretary

Professor I.R. Pleve
Professor A.A. Sytnik
Professor V.V. Astakhov

Editorial board: prof. I.I. Artyukhov, prof. V.V. Astakhov, prof. V.B. Bayburin, prof. D.A. Zimnyakov, prof. V.A. Krysko, prof. V.N. Lyanikov, prof. I.V. Rodionov, prof. A.A. Sytnik, prof. Yu.B. Tomashevsky, prof. V.A. Khrustalev

Editor L.A. Skvortsova
Computer-based page-proof N.V. Lukashova
Rendering A.H. Askarova
Responsible for the full-textversion of the magazine
Online eLIBRARY.ru M.I. Balakin

Editorial office: 77, Politechnicheskaya Street
Saratov, 410054
Russia
Telephone: +8452/99-87-39
E-mail: vestnik@sstu.ru
<http://dni.sstu.ru/vestnik.nsf>
Fax: +8452/52-53-02

Signed for publishing: 25.11.15
Format 60×84 1/8 Paper offset.
Apr. tp. 1. 29,0 Acc.-pbl. 15,2
Edition 500 psc. Order 185
Printed in publishing house of SSTU,
77, Politechnicheskaya St., Saratov, 410054,
Russia

СОДЕРЖАНИЕ

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

- Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В.** О применении упрощенной модели с эквивалентной нагрузкой к решению контактной задачи.....7

ФИЗИКА

- Байбурин В.Б., Розов А.С.** Влияние продольной неоднородности магнитного поля на траекторию заряда в скрещенных полях13
- Гулай А.П., Астахов С.В., Астахов В.В.** Роль запаздывания в системе двух осцилляторов Ван дер Поля17
- Ерохин П.С., Коннов Н.П., Заднова С.П., Бугоркова Т.В.** Динамическая характеристика микроорганизмов в условиях неблагоприятного действия факторов абиотической природы методом сканирующей зондовой микроскопии.....23
- Казанцева И.Л., Попова С.С., Тимофеев И.В., Седелкин В.М., Бутова С.Н.** Исследование кинетики извлечения белковых агрегатов из щелочных экстрактов нута путем электрофлотации29
- Купцов П.В., Купцова А.В.** Физически мотивированные модели динамических сетей на основе отображений Икеды35
- Нефедов Д.В., Суздальцев С.Ю., Шаныгин В.Я., Самарский М.В.** Жидкостное и СВЧ плазмохимическое травление пленок SiO_x , осажденных в плазме газового разряда.....41
- Романчук С.П., Клинаев Ю.В., Терин Д.В., Корчагин С.А.** Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств гетерогенных сред46
- Спицын А.Н., Уткин Д.В., Германчук В.Г., Куклев В.Е.** Оптические биосенсоры: современное состояние в индикации возбудителей инфекционных болезней.....51
- Фурсаев М.А.** К анализу величины тока срыва генерации в магнетроне57
- Царев В.А., Нестеров Д.А.** Компьютерное моделирование многолучевого монодрона W-диапазона с резонатором распределенного взаимодействия.....62

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

- Бессонов Д.А., Попов И.А., Соколова Т.Н., Сурменко Е.Л., Чеботаревский Ю.В.** Исследование особенностей применения короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения для прецизионной микрообработки материалов. Обзор и анализ69
- Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Злобина И.В., Мирошкин А.Г., Мукатова Г.Х.** Вероятностный расчёт напряжённого состояния элементов ШРУС77
- Васин А.Н., Изнаиров Б.М., Злобина И.В., Мирошкин А.Г., Мукатова Г.Х.** Стохастический анализ взаимодействия рабочих элементов зубчатых передач внутреннего зацепления81
- Игнатъев С.А., Казинский Н.А., Захарченко М.Ю.** Мониторинг качества обработки деталей на токарных станках ПАБ-350 с использованием экспертных данных.....86
- Игнатъев А.А., Каракозова А.В., Игнатъев С.А., Захарченко М.Ю.** Аналитическая оценка автокорреляционной функции виброакустических колебаний в динамической системе станка. Часть 289
- Коновалов В.В., Игнатъев А.А., Захарченко М.Ю.** Экспериментальные исследования виброакустических колебаний динамической системы токарного станка ПАБ-350 при различных условиях резания94
- Королев А.В., Сидоренко А.Д., Мазина А.А., Яковишин А.С., Мухина Е.В., Нейгебауэр К.С., Балаев А.Ф., Решетникова О.П., Савран С.А.** Ультразвуковая упрочняющая и очищающая обработка колец подшипников99
- Королёв А.В., Королёв А.А., Сидоренко А.Д., Игнатъев А.А.** Вибромеханическая очистка и стабилизация колец подшипников.....104
- Мезенцов С.А., Лясников В.Н., Гоц И.Ю.** Особенности применения метода электроискрового легирования при формировании износостойких покрытий107
- Мезенцов С.А., Лясников В.Н., Гоц И.Ю.** Износо- и коррозионностойкие покрытия на основе титана, сформированные электроискровым легированием114

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

Большаков А.А., Сгибнев А.А. Выбор и реализация программно-аппаратного комплекса для вывода массива изображений в стенде объемной визуализации	120
Коваль В.А., Торгашова О.Ю., Чернова А.В., Самарский А.А. Синтез регулятора для объекта управления с переменным коэффициентом теплопроводности, описываемого в цилиндрической системе координат.....	125
Кушников В.А., Хамутова М.В. Модель для прогнозирования последствий наводнений, вызванных половодьями и паводками	131
Михайлова Л.С., Пахомов М.А., Степанов А.М., Степанов М.Ф. Автоматизация построения и исследования управления динамическими объектами на основе технологии нечеткой логики в системе ГАММА-3.....	137
Михайлова Л.С., Пахомов М.А., Степанов А.М., Степанов М.Ф. Методика автоматизированного решения задачи конечно-частотной идентификации в системе ГАММА-3.....	145
Прошкин В.Н., Прошин И.А., Прошкина Л.А., Магомедова М.А. Совершенствование магнитострикционных преобразователей угловых перемещений с геликоидальной магнитной системой позиционирования	151
Сытник А.А., Гвоздюк И.В. Об одном методе автоматного моделирования сетевых информационных систем	157
Чугунов А.В. Методика расчета координаты заданной зоны покрытия для беспроводной сети внутри помещений, сооружений для произвольного луча, сканирующего от источника излучения до приемника.....	164
Щеголева Н.В. Математическая модель для оценки вероятности потери информации водителями	171
Щеголева Н.В. Применение энтропии для оценки неопределенности дорожно-транспортной ситуации	174

ЭНЕРГЕТИКА

Говорухин П.П., Миргородская Е.Е., Митяшин Н.П., Рогинская Л.Э., Томашевский Ю.Б. Анализ чувствительности качества выходной кривой многоуровневого инвертора к точности реализации ее параметров	180
Кулешов О.Ю., Муслимов Е.И., Седелкин В.М. Уточнение зонального метода и модели радиационных свойств продуктов сгорания для тепловых расчетов огнетехнических установок	186
Огурцов К.Н., Дунаева Т.Ю. Повышение энергоэффективности СВЧ электротермических установок с камерами лучевого типа путем управления источниками внутреннего тепла в объекте	192
Попова С.С., Альвинов Х.Х., Гусева Е.С., Макеева И.П. Закономерности электрохимического внедрения лантана и лития в окисленный титановый электрод из апротонных органических растворов их солей.....	196
Попова С.С., Гусева Е.С., Францев Р.К., Жускеев А.Р. Закономерности кинетики интеркалирования РЗЭ, магния и лития в алюминиевый электрод, предварительно подвергнутый паротермическому окислению	203
Семенов Б.А., Озеров Н.А. Полуэмпирическая математическая модель локального теплообмена при охлаждении плоской стенки нормально направленной двумерной турбулентной воздушной струей	210
Симонов В.Ф., Селиванов А.А., Мракин А.Н., Морев А.А. Определение кинетических констант выделения газовых продуктов при термодеструкции сернистого горючего сланца.....	219
Усачев А.П., Рулев А.В., Усачева Е.Ю. Исследование температурных условий в испарителе и конденсаторе теплонасосных сушилок, работающих на неазеотропных углеводородных смесях.....	224

CONTENTS
MATHEMATICS AND MECHANICS

-
- Ovchinnikova N.V., Chebotarevsky Yu.V.** Simplified equivalent modelling for the analysis of contact problems7

PHYSICS

-
- Baiburin V.B., Rozov A.S.** Influence of longitudinal magnetic field inhomogeneity on the trajectory of the charge in crossed fields13
- Gulai A.P., Astakhov S.V., Astakhov V.V.** The role of delay in a system of two Van der Pol oscillators17
- Erokhin P.S., Konnov N.P., Zadnova S.P., Bugorkova T.V.** Dynamic characteristics of microorganisms under adverse impact of abiotic agents by means of scanning probe microscope23
- Kazantseva I.L., Popova S.S., Timofeev I.V., Sedelkin V.M., Butova S.N.** Kinetics of extracting protein fractions from chick-pea alkaline extracts using electroflotation29
- Kuptsov P.V., Kuptsova A.V.** Physically motivated models of dynamical networks based on Ikeda maps35
- Nefedov D.V., Suzdaltsev S.Yu., Shanigin V.Ya., Samarskiy M.V.** Liquid and microwave plasma-chemical etching of the SiO_x films deposited in the gas discharge plasma42
- Romanchuk S.P., Klinaev Yu.V., Terin D.V., Korchagin S.A.** Mathematical modeling and multicriterion analysis of the nonlinear properties of the heterogeneous media46
- Spitsyn A.N., Utkin D.V., Kouklev V.E., Germanchuk V.G.** Optical biosensors: current state in indicating pathogenic organisms of infectious diseases51
- Fursaev M.A.** Analysis of oscillation failure in the magnetron57
- Tsarev V.A., Nesterov D.A.** Computer simulation of a multibeam W-band monotron with extended – interaction resonator63

ENGINEERING AND MACHINE-BUILDING

-
- Bessonov D.A., Popov I.A., Sokolova T.N., Surmenko E.L., Chebotarevsky Yu.V.** Application specifics of ultrafast lasers in precise micromachining: overview and analysis69
- Vasin A.N., Iznaïrov B.M., Zlobina I.V., Miroshkin A.G., Mukatova G.H.** Probability calculations of the stress state of constant velocity joints77
- Vasin A.N., Iznaïrov B.M., Zlobina I.V., Miroshkin A.G., Mukatova G.H.** Stochastic interactions analysis of the working elements in internal-gear trains82
- Ignatyev S.A., Kazinsky N.A., Zakharchenko M.Yu.** Monitoring the PAB-350 lathe machining quality of work pieces using expert data86
- Ignatyev A.A., Karakozova A.V., Ignatyev S.A., Zakharchenko M.Yu.** Analysis of autocorrelation function for vibroacoustic oscillations in dynamic machine tool systems. Part 289
- Konovalov V.V., Ignatyev A.A., Zakharchenko M.Yu.** Experimental research into vibroacoustic oscillations in the dynamic PAB-350 lathe systems under various cutting conditions94
- Korolev A.V., Sidorenko A.D., Mazina A.A., Yakovishin A.S., Muchina E.V., Neugebauer K.S., Balaev A.F., Reshetnikova O.P., Savran S.A.** An ultrasonic cleaning bath and strengthening of the bearing rings99
- Korolev V.A., Korolev A.A., Sidorenko A.D., Ignatyev A.A.** Vibromechanical purification and stabilization of bearing rings104
- Mezentsov S.A., Lyasnikov V.N., Gots I.Yu.** An insight into the method of electro-spark deposition for wear resistant coatings107
- Mezentsov S.A., Lyasnikov V.N., Gots I.Yu.** Wear and corrosion resistant titanium-based coating formed by electro-spark deposition114

INFORMATION TECHNOLOGIES

-
- Bolshakov A.A., Sgibnev A.A.** Selection and realisation of a hardware and software system for visualization of volumetric data120

Koval' V.A., Torgashova O.Yu., Chernova A.V., Samarskij A.A Synthesis of an object control regulator with a variable coefficient of thermal conductivity described by the cylindrical coordinate system.....	125
Kushnikov V.A., Khamutova M.V. A model for forecasting flood effects caused by snowmelt and rain floods	132
Mikhailova L.S., Pakhomov M.A., Stepanov A.M., Stepanov M.F. Automation of construction and research into dynamic plants control on the basis of fuzzy logic technology in the GAMMA-3 system	137
Mikhailova L.S., Pakhomov M.A., Stepanov A.M., Stepanov M.F. A technique for automated solution to the a task of finite-frequency identification by the GAMMA-3 system	145
Proshkin V.N., Proshin I.A., Proshkina L.A., Magomedova M.A. Improving magnetostrictive angular displacement transducers with a helical magnetic positioning system	151
Sytnik A.A., Gvozdyuk I.V. On the method automation model network information systems	157
Chugunov A.V. Calculating the coordinate for the indoor wireless coverage with the arbitrary beam scanning from the radiation source to the receiver.....	165
Schegoleva N.V. A mathematical model for estimating probability of information loss by the drivers	171
Schegoleva N.V. Using entropy for uncertainty evaluation in traffic models	175

POWER ENGINEERING

Govorukhin P.P., Mirgorodskaya E.E., Mityashin N.P., Roginskaya L.E., Tomashevsky Yu.B. Analysis of quality sensitivity of the output curve of an inverter vs. accuracy of its parameters.....	180
Kuleshov O.Yu., Muslimov E.I., Sedelkin V.M. Refinement of zoning method and models of radiative properties of combustion products for heat calculation in fire-engineering units	187
Ogurtsov K.N., Dunaeva T.Yu. Increasing energy efficiency of microwave electrothermal units with beam-type cameras by controlling internal heat sources in objects.....	192
Popova S.S., Alviev H.H., Guseva E.S., Makeeva I.P. Electrochemical introduction of oxidized titanium in aprotic organic salt solutions of lanthanum and lithium.....	196
Popova S.S., Guseva E.S., Frantsev R.K., Zhuskeev A.R. Kinetics of REE, magnesium and lithium intercalation into the aluminum electrode subjected to steam generating thermal oxydation	204
Semyonov B.A., Ozerov N.A. A semi-empirical mathematical model for the local heat transfer at cooling flat walls by two-dimensional turbulent impinging airjets	210
Simonov V.F., Selivanov A.A., Mrakin A.N., Morev A.A. Kinetic parameters of gas evolution during sulfur oil shale pyrolysis.....	219
Usachev A.P., Rulev A.V., Usacheva E.Yu. A study of temperature conditions in evaporators and condensers of heat pump dryers operating on non-azeotropic hydrocarbon mixtures.....	225

МАТЕМАТИКА И МЕХАНИКА

УДК 539.3

Н.В. Овчинникова, Ю.В. Чеботаревский

О ПРИМЕНЕНИИ УПРОЩЕННОЙ МОДЕЛИ С ЭКВИВАЛЕНТНОЙ НАГРУЗКОЙ К РЕШЕНИЮ КОНТАКТНОЙ ЗАДАЧИ

Рассматривается контактная задача о напряженно-деформированном состоянии упругопластической среды на основе расчетной схемы, предполагающей замену реального контактного воздействия на материал среды действием эквивалентной ему распределенной нагрузки. Определены рациональные пределы применимости упрощенной модели для решения упругопластических задач в статической и динамической постановках.

Контактная задача, распределенная нагрузка, напряженное состояние, пределы применимости

N.V. Ovchinnikova, Yu.V. Chebotarevsky

SIMPLIFIED EQUIVALENT MODELLING FOR THE ANALYSIS OF CONTACT PROBLEMS

The paper analyzes the contact problem relating the strain-stress state in the elastoplastic domain. The problem can be solved by substitution of the actual contact forces acting on the material medium for the equivalent distributed loading applied to the contact surface. Applicability limits of the simplified model simulated to solve the stress-strain problems under static or dynamic conditions have been determined.

Contact problem, distributed load, deflected mode, limits of applicability

Сложности, возникающие при непосредственном решении контактных задач, привели к появлению приближенных моделей взаимодействия контактирующих тел. Один из таких подходов предложен в [1-3], где решение исходной контактной задачи сводится к исследованию напряженно-деформированного состояния упругопластической среды под действием эквивалентной нагрузки. Эффективность ее применения к решению статических задач показана в [1-3]. Однако целесообразность ее применения для решения упругих и упругопластических задач в динамической постановке не изучена.

Целью настоящей работы является определение рациональных пределов применимости упрощенной модели для решения упругопластических задач в статической и динамической постановках с точки зрения уменьшения затрат машинного времени на проведение вычислений и снижения технических требований к используемой вычислительной аппаратуре по сравнению с затратами на получение аналогичных решений контактных задач.

Учитывая, что воздействие индентора согласно рассматриваемой модели носит локальный характер, выделим в полубесконечной среде некоторый конечный объем радиусом R и толщиной h . Его размеры должны быть такими, чтобы за пределами выделенного объема среда находилась в невозмущенном состоянии. Тогда на каждом этапе вычислений исследование осесимметричного напряженно-деформированного состояния среды под действием эквивалентной нагрузки, отображающей воздействие индентора, в цилиндрической системе координат может быть сведено аналогично тому, как это было сделано в [4-6], к отысканию поля скоростей точек среды, обеспечивающего безусловный минимум функционала $\Phi(r, z, t)$:

$$\delta\Phi(r, z, t) = \int_0^{Rh} \int_0^a \left(\sigma_{rr} \frac{\partial}{\partial r} (\delta v_r) + \delta v_r \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \sigma_{rz} \frac{\partial}{\partial z} (\delta v_r) + \delta v_r \rho \frac{\partial v_r}{\partial t} + \sigma_{zz} \frac{\partial}{\partial z} (\delta v_z) + \sigma_{zr} \frac{\partial}{\partial r} (\delta v_z) + \delta v_z \rho \frac{\partial v_z}{\partial t} \right) r dz dr - \int_0^a \delta v_z q(r, t) r dr = 0, \quad (1)$$

где σ_{ij} ($i, j = r, \theta, z$) – компоненты тензора напряжений; $v_r, v_z, \delta v_r, \delta v_z$ – компоненты вектора скорости точек среды и их вариации; a и $q(r, t)$ – соответственно радиус пятна контакта и эквивалентная нагрузка, определяемая путем решения задачи о движении индентора; ρ – плотность материала среды.

Разобьем выделенный объем среды на элементы, связанные между собой в n узловых точках, и выразим составляющие вектора скорости движения произвольной точки среды $v_i(r, z, t)$ ($i = r, z$) через составляющие вектора скорости узловых точек $v_{ki}(t)$ следующим образом:

$$v_i(r, z, t) = \sum_{k=1}^n N_k(r, z) v_{ki}(t) = N_k(r, z) v_{ki}(t) \quad (i = r, z). \quad (2)$$

Подставляя (2) в уравнение (1), после выполнения ряда преобразований, аналогичных проделанным в [4-6], получаем

$$\delta\Pi = \sum_{k=1}^n \delta v_{kr} \left\{ \int_0^{Rh} \int_0^a \left(\sigma_{rr} \frac{\partial}{\partial r} (N_k) + N_k \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \sigma_{rz} \frac{\partial}{\partial z} (N_k) + \rho \sum_{m=1}^n N_k N_m \frac{d v_{mr}}{dt} \right) r dz dr \right\} + \sum_{k=1}^n \delta v_{kz} \left\{ \int_0^{R_2} \int_0^{h_2} \left(\sigma_{zz} \frac{\partial}{\partial z} (N_k) + \sigma_{zr} \frac{\partial}{\partial r} (N_k) + \rho \sum_{m=1}^n N_k N_m \frac{d v_{mz}}{dt} \right) r dz dr - \int_0^a N_k q(r, z, t) r dr \right\} = 0. \quad (3)$$

Отсюда в силу независимости и произвольности вариаций скоростей δv_{kr} и δv_{kz} приходим к следующей системе обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для определения скоростей в узловых точках разбиения среды на элементы:

$$\sum_{m=1}^n M_{km} \frac{d v_{mr}}{dt} = - \int_0^{R_2} \int_0^{h_2} \left(\sigma_{rr} \frac{\partial}{\partial r} (N_k) + N_k \frac{\sigma_{\theta\theta}}{r} + \sigma_{rz} \frac{\partial}{\partial z} (N_k) \right) r dz dr;$$

$$\sum_{m=1}^n M_{km} \frac{d v_{mz}}{dt} = - \int_0^{R_2} \int_0^{h_2} \left(\sigma_{zz} \frac{\partial}{\partial z} (N_k) + \sigma_{zr} \frac{\partial}{\partial r} (N_k) \right) r dz dr + \int_0^a N_k q(r, z, t) r dr, \quad (4)$$

где элементы матрицы масс определяются соотношением

$$M_{km} = \rho \int_0^{R_2} \int_0^{h_2} N_k N_m r dr dz. \quad (5)$$

При проведении конкретных вычислений уравнения (4) должны быть дополнены физическими уравнениями, соответствующими характеру поведения материала среды в процессах нагружения и разгрузки, и геометрическими соотношениями Коши аналогично тому, как это сделано в [4-6].

Сформулированная выше конечно-элементная схема численного решения поставленной задачи реализована с использованием программного комплекса ABAQUS. Расчеты проводились с применением треугольных конечных элементов и квадратичных функций формы на основе метода Ньютона.

Прежде чем заняться определением этих границ применимости рассматриваемой модели с точки зрения поставленной цели, следует убедиться в том, что построенная конечно-элементная схема действительно отображает исследуемый процесс и получаемые на её основе результаты достоверны. Этот вопрос здесь решается двумя способами:

– путём сравнения результатов, полученных на базе разработанной модели, с результатами известного аналитического решения А.Н. Динника, полученного для случая статического нагружения двух соприкасающихся тел в виде полусферы и полупространства с плоской ограничивающей его поверхностью;

– путем их сравнения с результатами численных решений, полученных по методике, разработанной в [4-6], для различных вариантов нагружения индентора в случае классической постановки контактной задачи.

Второй способ позволяет не только оценить достоверность получаемых результатов, но и провести сравнительный анализ затрат вычислительных ресурсов на их получение с применением упомянутой выше методики на основе упрощенной модели.

Для того чтобы задать интенсивность эквивалентной нагрузки, предварительно необходимо решить задачу о движении индентора [1-3]. При упругом поведении материала эта задача может быть рассмотрена отдельно от задачи о напряженно-деформированном состоянии среды. При упругопластическом состоянии эти задачи оказываются взаимосвязанными. Для того чтобы облегчить задание эквивалентной нагрузки в процессе решения конечно-элементной задачи, аппроксимируем найденные ее значения рядом Тейлора [1-3]:

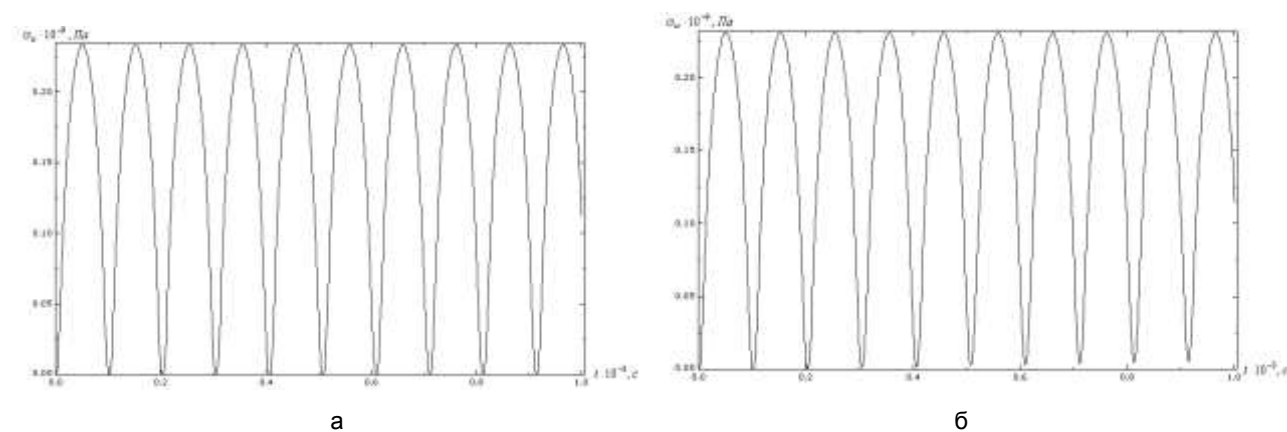
$$q(r) = q_0 \left(1 + \sum_{k=1}^n \frac{q^{(k)}(0)}{k!} r^k \right) \quad (6)$$

Такой подход позволяет задать эквивалентную нагрузку в аналитической форме и тем самым избежать необходимости формирования массива её значений в отдельных точках контактной поверхности в процессе вычислений.

Хорошее совпадение численных результатов, полученных на основе упрощенной модели, для статического нагружения индентора в пределах, не вызывающих появления в среде пластических деформаций, с результатами аналитического решения [7], вообще говоря, предсказуемо. Так как в основу упрощенной модели при определении равнодействующей сил контактного взаимодействия и эквивалентной нагрузки заложены зависимости между радиусом пятна контакта, распределением давления на контактной поверхности и перемещением центральной точки контакта, полученные на базе упомянутого выше решения.

При статическом нагружении индентора результаты расчета напряженно-деформированного состояния среды как на базе предлагаемой модели, так и на основе аналитического решения, определяются величиной усилия, прикладываемого к индентору, и не зависят от его массы. При динамическом нагружении индентора в пределах упругого поведения материала среды значение его приведенной массы заметно влияет на частоту колебаний точек среды. Поэтому в задаче о движении индентора при подсчете приведенной массы, кроме непосредственно массы индентора, следует учитывать и пришедшую в движение массу среды.

Ниже показаны графики поведения интенсивности напряжений по времени при импульсном нагружении индентора силой $F = F_0 = 19,62 \text{ Н}$ за промежуток времени $\Delta t = 10^{-3} \text{ с}$ в точке её наибольших значений. На рисунке б приведены графики, построенные по расчетным данным, полученным на базе предлагаемой модели. На рисунке а – по результатам решения аналогичной контактной задачи способом, разработанным в [4-6]. Расчеты проведены для значений параметров ($E = 2,1 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $\nu = 0,3$).



Графики поведения интенсивности напряжений с течением времени

Сравнительный анализ приведенных графиков показывает их хорошее совпадение. Погрешность вычислений при использовании упрощенной модели для наибольших значений интенсивности напряжений не превышает 5 %. Выигрыш во времени обусловлен возможностью решения задачи о движении индентора независимо от движения среды. Затраты машинного времени ниже не менее чем на 5 % по сравнению со временем, необходимым для получения решения контактной задачи в полном объеме. Кроме того, для её численной реализации возможно применение компьютерной техники со значительно меньшим (на порядок) вычислительным ресурсом.

При появлении в среде пластических деформаций задача о движении индентора не может рассматриваться отдельно от задачи о движении среды. Обе задачи должны решаться совместно ввиду необходимости реализации итерационного процесса по определению секущего модуля упругости в задаче о движении индентора по результатам расчета напряженно-деформированного состояния среды на каждом шаге вычислений по формулам:

$$E_c^{(0)} = E, \quad E_c^{(m)} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{uk}^{(m-1)}}{\varepsilon_{uk}^{(m-1)}} \quad (m = 1, 2, 3, \dots). \quad (7)$$

В (7) σ_u^k и ε_u^k – значения интенсивности напряжений и интенсивности полной деформации в точках возмущенной области среды соответственно, n – их количество, а m – номер итерации. Легко убедиться, что в частном случае при идеально упругом поведении материала среды секущий модуль, определяемый по формуле (7), становится равным модулю упругости её материала.

В табл. 1 в качестве примера приведено сопоставление расчетных данных, полученных на базе предлагаемой модели и способом, разработанным в [4-6], в случае нагружения индентора статическим усилием $F = F_o = 39,24$ Н. Результаты проведенных расчетов показали, что значения интенсивности напряжений, полученных обоими способами, практически совпадают с точностью до второго знака после запятой. Расхождение численных значений интенсивности пластических деформаций в точках их наибольших значений не превышает 1 %. Наибольшее несовпадение расчетных данных интенсивности пластических деформаций имеет место в граничных точках пластической зоны, но оно несущественно в силу малости самих значений.

Таблица 1

Координата Z точки, $\cdot 10^{-4}$ м	$\varepsilon_u^{pl} \cdot 10^4$		$\sigma_u \cdot 10^{-8}$ Па	
	из решения контактной задачи	из решения на основе модели	из решения контактной задачи	из решения на основе модели
0	0	0	0,517377	0,497223
0,125	0	0	1,06074	1,07956
0,25	0	0	1,54985	1,61685
0,375	0,233802	0,322716	1,85379	1,8961
0,5	1,14673	1,53697	2,0628	2,06453
0,625	2,51198	2,74618	2,06498	2,071
0,75	3,6547	3,83884	2,09431	2,09915
0,875	4,0772	4,1924	2,10474	2,10772
0,1	4,48226	4,51488	2,11517	2,11611
1,125	4,39502	4,3607	2,1128	2,11196
1,25	4,2633	4,18534	2,10975	2,10783
1,375	3,77971	3,72015	2,09728	2,0958
1,5	3,30028	3,25571	2,08547	2,08434
1,625	2,67092	2,60147	2,06919	2,06734
1,75	2,00645	1,9456	2,05256	2,05095
1,875	1,26473	1,25969	2,03313	2,03297
2	0,283531	0,385823	2,05523	2,04851
2,125	0,0313116	0,0889457	1,9644	1,97092

Для обеспечения удовлетворительного совпадения получаемых результатов в приведенном выше примере при нагружении усилием $F = F_o = 39,24$ Н, потребовалось проведение восьми итераций

(табл. 2). При дальнейшем увеличении числа итераций отличие последующих значений секущего модуля упругости от предыдущих не превышает 2,2 %. С возрастанием величины усилия совпадение результатов расчета, полученных обоими способами, улучшается, но количество итераций, необходимых для обеспечения заданной точности вычислений, при этом увеличивается.

Таблица 2

Итерация	Секущий модуль $E_c^{(m)}$, $\cdot 10^{11}$ Па	ε_u^{pl} в точке с координатами $r = 0, z = 1 \cdot 10^{-3}$ м, 10^4	σ_u в точке с координатами $r = 0, z = 1 \cdot 10^{-3}$ м, 10^8 Па
0	2,1	8,0642	2,20415
1	1,6589	2,96187	2,0768
2	1,9413	6,16109	2,15726
3	1,744	3,8692	2,09983
4	1,8816	5,43049	2,13906
5	1,7751	4,19835	2,10814
6	1,8405	4,942	2,12684
7	1,8032	4,51488	2,11611

Из вышесказанного следует, что для расчета напряженно-деформированного состояния упругопластической среды под действием эквивалентной статической нагрузки технические требования к вычислительным инструментам те же, что и при решении задачи в полном объеме, а затраты машинного времени в среднем одинаковы.

Очевидно, что с увеличением количества итераций время счета возрастает практически пропорционально их числу. При использовании упрощенной модели в случае приложения к индентору динамической нагрузки реализация итерационного процесса необходима на каждом шаге вычислений по времени. Поэтому по результатам анализа процедуры расчета напряженно деформированного состояния среды на базе упрощенной модели в динамической постановке сделан вывод о нецелесообразности её применения для проведения оперативных расчетов в связи со значительным ростом затрат вычислительных ресурсов из-за необходимости многократного перерасчета секущего модуля в задаче о движении индентора.

ЛИТЕРАТУРА

1. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. О некоторых особенностях применения метода конечных элементов к решению контактной задачи на базе программного комплекса ABAQUS // Изв. Саратовского университета. Новая серия. Сер. Математика. Механика. Информатика. 2009. Т. 9. Вып. 2. С. 82-88.
2. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. К расчету напряженно-деформированного состояния упругопластического полупространства, контактирующего с абсолютно жестким индентором // Вестник СГТУ. 2010. № 4 (51). Вып. 3. С. 10-17.
3. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. О движении абсолютно жесткого индентора, взаимодействующего с упругопластической средой // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2010. № 3 (15). С. 151-164.
4. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. Вариационное уравнение движения континуума «жесткий индентор – деформируемая среда» // Вестник СГТУ. 2011. № 4 (60). Вып. 2. С. 48-57.
5. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. Применение метода множителей Лагранжа к решению контактной задачи о взаимодействии деформируемой среды с относительно жестким индентором // Вестник СГТУ. 2012. № 4 (68). Вып. 2. С. 36-43.
6. Овчинникова Н.В., Чеботаревский Ю.В. Применение метода штрафных функций к выводу вариационного уравнения движения континуума «индентор – деформируемая среда» // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. 2013. № 1 (37). С. 127-134.
7. Динник А.Н. Избранные труды. Киев: Изд-во Академии наук Украинской ССР, 1952. Т. I. 152 с.

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

Natalya V. Ovchinnikova –
Ph. D., Associate Professor,
Department of Technical Mechanics
and Machine Elements,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Чеботаревский Юрий Викторович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Прикладная математика и системный анализ»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri V. Chebotarevsky –
Dr. Sc., Professor
Department of Applied
Mathematics and System Analysis,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.09.15, принята к опубликованию 11.11.15

ФИЗИКА

УДК 53.097

В.Б. Байбурин, А.С. Розов

ВЛИЯНИЕ ПРОДОЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ТРАЕКТОРИЮ ЗАРЯДА В СКРЕЩЕННЫХ ПОЛЯХ

Проведён анализ траекторий зарядов в заряженном цилиндрическом пучке при воздействии на систему неоднородной вдоль оси пучка и нестационарной во времени магнитной индукции. Показано, что при подобном воздействии траектория заряженной частицы стабилизируется.

Скращенные поля, уравнения движения, магнитная индукция, частица, хаос

V.B. Baiburin, A.S. Rozov

INFLUENCE OF LONGITUDINAL MAGNETIC FIELD INHOMOGENEITY ON THE TRAJECTORY OF THE CHARGE IN CROSSED FIELDS

The conducted analysis refers the trajectories of charged particles within a charged cylindrical beam under the influence of magnetic induction inhomogeneous in time and space. The authors show that with a given affect the trajectory of the charged particle is stabilized.

Crossed fields, equations of motion, magnetic induction, particle, chaos

В последние годы всю большую популярность находят исследования поведения систем со скрещенными полями, которые рассматриваются в различных условиях, в условиях пространственной и временной неоднородности. В [1] показано, что траектория в заряженном пучке под воздействием неоднородной в пространстве и времени магнитной индукции проявляет хаотические свойства вне зависимости от наличия или отсутствия пространственного заряда.

В данной работе показано, как влияет переменная во времени продольная неоднородность магнитного поля на траекторию заряда в заряженном цилиндрическом пучке.

Анализ проводился в соответствии со схемой, изображённой на рис.1. На схеме E_z и B – действующие поля, магнитная индукция и ускоряющее электрическое поле соответственно, ρ – плотность заряда в пучке.

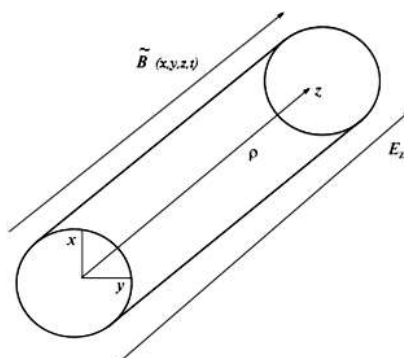


Рис. 1. Схема заряженного пучка

Учитывая конфигурацию полей, уравнения движения заряженной частицы в подобной системе будут иметь вид

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= \eta E_x + \eta B \dot{y} \\ \ddot{y} &= -\eta E_y + \eta B \dot{x} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \ddot{z} &= \eta E_z \\ B &= B(x, y, z, t), \end{aligned} \quad (2)$$

где E_x, E_y – действующие поля, $\eta = \frac{q}{m_0}$ – отношение заряда частицы к его массе. E_x и E_y можно записать [2]

$$E_x = \begin{cases} \frac{\rho r_s^2 x}{2\varepsilon_0 r^2}, r > r_s \\ \frac{\rho x}{2\varepsilon_0}, r < r_s \end{cases}, \quad E_y = \begin{cases} \frac{\rho r_s^2 y}{2\varepsilon_0 r^2}, r > r_s \\ \frac{\rho y}{2\varepsilon_0}, r < r_s \end{cases} \quad (3)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

$B_z = B(x, y, z, t)$ – магнитная индукция, в общем случае зависящая от координат и времени.

Рассмотрим три вида зависимости магнитной индукции:

$$B_z = B_0 + \Delta B_z \sin(z), \quad (4)$$

$$B_z = B_0 + \Delta B_z \sin(z) + \Delta B_z \sin(r), \quad (5)$$

$$B_z = B_0 + \Delta B_z \sin(z) + \Delta B_z \sin(r) \sin(\omega t), \quad (6)$$

Здесь ΔB_z – амплитуда изменения неоднородного вдоль радиуса магнитного поля; B_0 – стационарное поле; ω – частота изменения магнитного поля.

Система (1) решалась численно, методика решения описана в [1]. Расчёт велся в безразмерных единицах. Входящие в систему уравнений (1) величины нормированы следующим образом:

$$x = \frac{x[\text{м}]}{10^{-4} \text{ м}}, \quad y = \frac{y[\text{м}]}{10^{-4} \text{ м}}, \quad (7)$$

а электромагнитные поля B и E нормированы следующим образом:

$$B = \frac{B[\text{Тл}]}{1 \text{ Тл}} \frac{1 \text{ кг}}{1 \text{ Кл}}, \quad E = \frac{E [\text{В/м}]}{10^3 \text{ В/м}} \frac{1 \text{ кг}}{1 \text{ Кл}}, \quad \rho = \rho \frac{1[\text{м}^3]}{1[\text{Кл}]} \frac{1[\text{Ф}]}{1[\text{м}]} \quad (8)$$

Для расчётов принимались следующие значения параметров системы: $E_z = 5$, $B_0 = 1$, $\Delta B = B_0/2$, $\omega = \eta B/2$, $x_0 = 0$, $y_0 = 0$, $\dot{x}_0 = 1$, $\dot{y}_0 = 1$.

Рассмотрим магнитную индукцию вида (4), соответствующие траектории показаны на рис. 2.

Как видно рис. 2, траектория регулярна в обоих случаях, старший показатель Ляпунова [4] $\lambda = 0$.

На рис. 3 показана траектория под воздействием магнитной индукции вида (5).

Обе траектории регулярны, $\lambda = 0$. При этом хотелось бы отметить, что в случае $\rho \neq 0$, траектория частицы сохраняет регулярность и при больших значениях $\rho = 5, 10, \dots 40$. Спектр мощности при этом имеет вид, показанный на рис. 4 а.

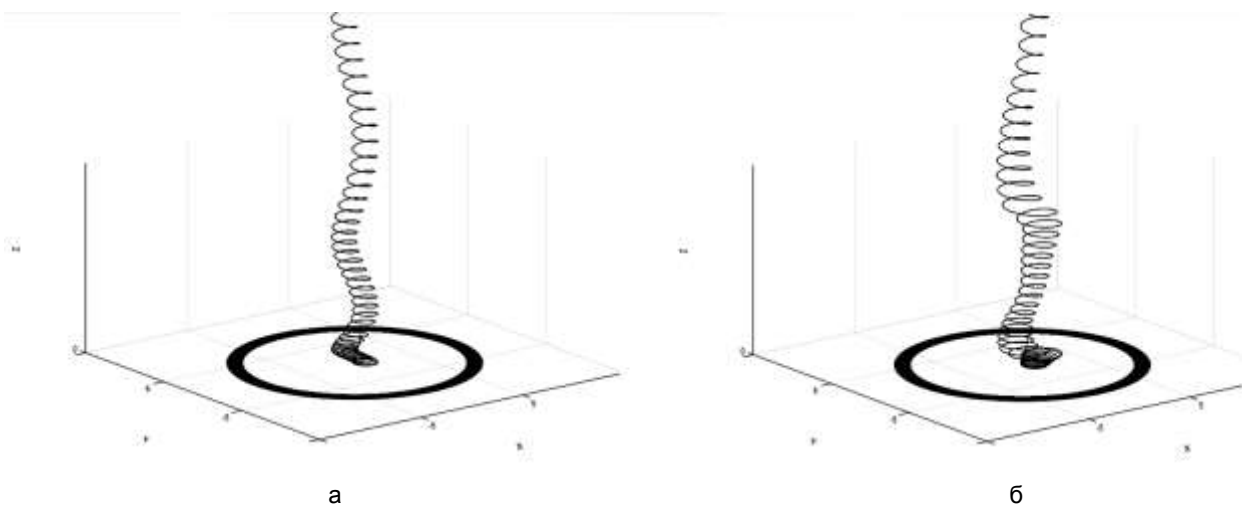


Рис. 2. Траектория заряда при магнитной индукции вида (1) (а) $\rho = 0$, (б) $\rho = 1$

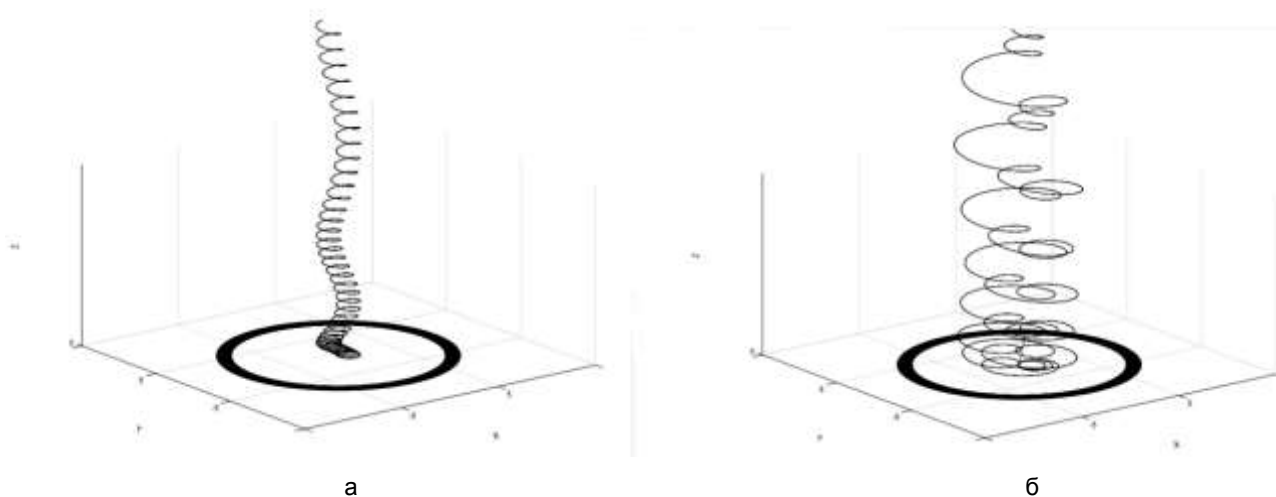


Рис. 3. Траектория заряда при магнитной индукции вида (2) (а) $\rho = 0$, (б) $\rho = 1$

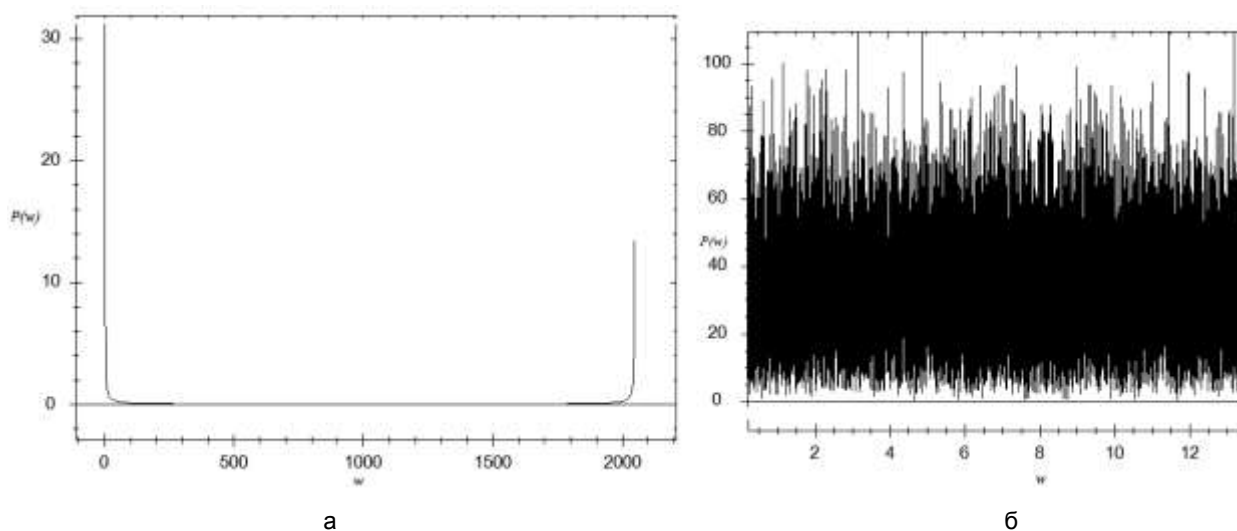


Рис. 4. Спектры мощности при различных видах магнитной индукции:
а – при магнитной индукции вида (5) $\rho = 1$; б – при магнитной индукции вида (6) $\rho = 1$

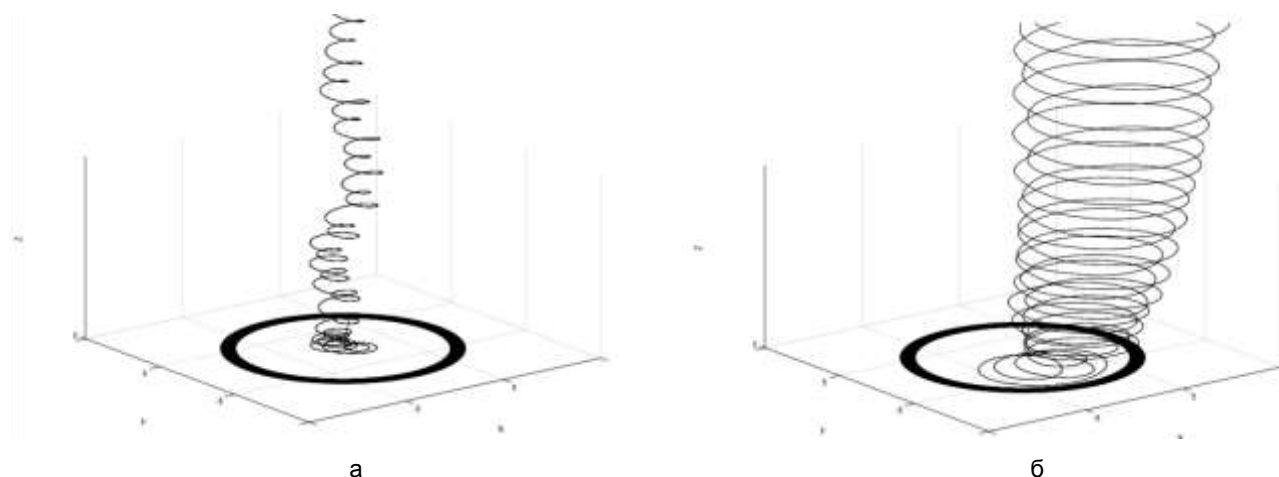


Рис. 5. Траектория заряда при магнитной индукции вида (6) (а) $\rho = 0$, (б) $\rho = 1$

На рис. 5 показана траектория под воздействием магнитной индукции вида (6).

Обе траектории нерегулярны: в случае рис. 5а $\rho = 0$ $\lambda = 1,77$, рис. 5б – $\rho = 1$ $\lambda = 1,84$. На рис. 4 б показан спектр мощности Фурье для этого случая при $\rho = 1$.

При этом значения старших показателей Ляпунова меньше, чем в случае неоднородной по радиусу и нестационарной во времени магнитной индукции [1]:

$$B = B_0 + \Delta B \sin(r) \sin(\omega t), \quad (9)$$

для случая (9) значения старшего показателя Ляпунова составили при $\rho = 0$ $\lambda = 2,04$, при $\rho = 1$ $\lambda = 3,84$.

Из всего вышесказанного можно сделать вывод в системе моделирующей заряженный пучок, происходит относительная стабилизация траектории при введении в неё переменной во времени и продольно-неоднородной вдоль оси пучка магнитной индукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rozov A.S., Baiburin V.B. Simulation of charge trajectories in a cylindrical beam in the presence of variable magnetic field // Journal of communication technology and electronics. 2014. Vol. 59. № 9. P. 910-913. Pleiades Publishing Inc.
2. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Т. 6. Электродинамика. М., 1977.
3. Нелинейные эффекты в хаотических и стохастических системах / В.С. Анищенко, В.В. Астахов, Т.Е. Вадивасова, А.Б. Нейман, Стрелкова, Л.С. Шиманский-Гайер. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.

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

Розов Александр Станиславович – ассистент кафедры «Информационная безопасность автоматизированных систем» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vil B. Baiburin – Dr. Sc., Head of the Department Information Security of Automated Systems Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksandr S. Rozov – Assistant, Department of Information Security of Automated Systems Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.09.15, принята к опубликованию 11.11.15

А.П. Гулай, С.В. Астахов, В.В. Астахов

РОЛЬ ЗАПАЗДЫВАНИЯ В СИСТЕМЕ ДВУХ ОСЦИЛЛЯТОРОВ ВАН ДЕР ПОЛЯ

Рассматривается система двух взаимодействующих осцилляторов Ван дер Поля с запаздыванием в канале связи. Показано, что введение запаздывания в канале связи приводит к формированию области бистабильности внутри основного языка синхронизации. С использованием конечномерной модели исходной системы исследуется бифуркационная структура пространства параметров системы и, в частности, области бистабильности.

Синхронизация, бифуркации, мультистабильность

A.P. Gulai, S.V. Astakhov, V.V. Astakhov

THE ROLE OF DELAY IN THE SYSTEM OF TWO VAN DER POL OSCILLATORS

The paper considers a system of two van der Pol oscillators with time delay in the coupling channel. It is shown that introduction of delay in the coupling channel results in emergence of a bistability region inside the main synchronization region. Using the finite-dimensional model approach we study the bifurcation structure of the parameter space.

Synchronization, bifurcations, multistability

Введение

Взаимодействие автоколебательных систем встречается повсеместно: от нейронов в мозге человека до крупных энергосистем, объединяющих электростанции и потребителей [1-4]. Взаимодействие может осуществляться различными способами, зачастую оно характеризуется запаздыванием сигнала в канале связи [5-9], обусловленным конечностью скорости его распространения. На сегодняшний день системы с запаздыванием достаточно популярны среди исследователей, изучается и влияние задержки на базовые нелинейные явления, и возможность использования запаздывающих связей для эффективного управления хаосом [10-12].

Установлено, что внесение временной задержки в математическую модель динамической системы, как правило, ведет к формированию мультистабильности – сосуществованию различных устойчивых режимов функционирования системы при одних и тех же значениях управляющих параметров (см., например, [7]).

Типичный сценарий формирования мультистабильности, в том числе в системах с запаздыванием, основан на седло-узловых бифуркациях состояний равновесия и предельных циклов (см., например, [13]). В рамках данной работы мы, рассматривая одну из наиболее простых и известных моделей автоколебательных систем, показываем, что в ней реализуется иной сценарий формирования мультистабильности, связанный с другими типами бифуркаций – бифуркацией Андронова-Хопфа и бифуркацией Неймарка – Сакера.

Исследуемая система

Рассмотрим систему двух диссипативно связанных осцилляторов Ван дер Поля [15] с запаздыванием в канале связи в виде системы дифференциальных уравнений первого порядка.

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1, \\ \dot{y}_1 = (\varepsilon - x_1^2)y_1 - x_1 + \gamma(y_2(t - \tau) - y_1(t)), \\ \dot{x}_2 = y_2, \\ y_2 = (\varepsilon - x_2^2)y_2 + p^2x_2 + \gamma(y_1(t - \tau) - y_2(t)). \end{cases} \quad (1)$$

Здесь $x_{1,2}$, $y_{1,2}$ – фазовые переменные, ε – параметр возбуждения автоколебательной системы, ρ – параметр расстройки по собственным частотам парциальных генераторов, γ – коэффициент связи, τ – время запаздывания.

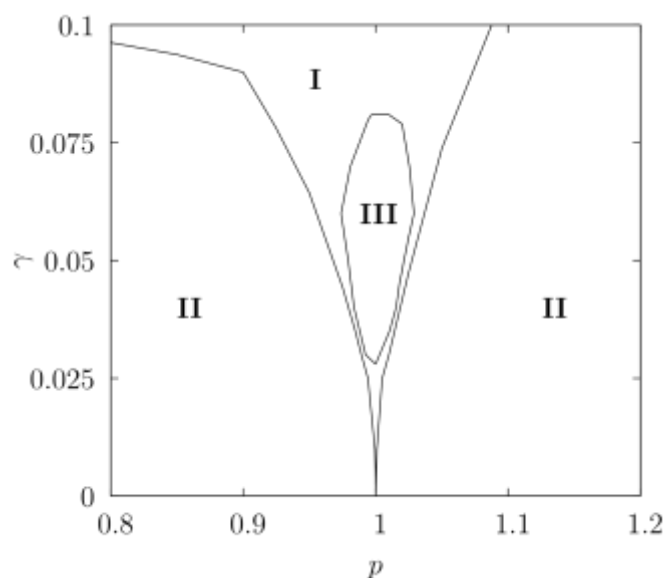


Рис. 1. Области характерных режимов системы (1) при $\varepsilon = 0,1$, $\tau = 1,5$.
I – область синхронизации, II – области квазипериодических колебаний, III – область бистабильности

В отсутствие запаздывания ($\tau = 0$) система (1) детально изучена [1-4]. Хорошо известно, что при достаточно небольших значениях коэффициента связи γ в системе наблюдается эффект синхронизации через захват частоты, в основе которого лежит седло-узловая бифуркация предельных циклов на двумерном торе. На плоскости параметров (ρ, γ) соответствующие бифуркационные линии ограничивают область синхронизации, известную как «язык Арнольда». Внутри данной области система характеризуется единственным аттрактором – устойчивым предельным циклом.

Рассмотрим влияние запаздывания в канале связи на структуру области синхронизации в пространстве параметров при малых γ . С увеличением времени запаздывания границы языка Арнольда не претерпевают качественных изменений, однако внутри области синхронизации формируется область, которая отсутствует при малых величинах τ . На рис. 1 представлена плоскость параметров (ρ, γ) с экспериментально построенными на ней областями характерных режимов при фиксированных значениях параметров $\varepsilon = 0,1$, $\tau = 1,5$. При интегрировании системы (1) дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом в качестве начальных условий использовались однородные распределения на интервале запаздывания: $x_{1,2} = x_{1,2}^0 = \text{const}$, $y_{1,2}(t) = x_{1,2}^0 = \text{const}$ и $t \in [t_0 - \tau, t_0]$.

На плоскости можно выделить несколько областей с различной динамикой системы. Область I – область существования устойчивого предельного цикла, соответствующего режиму синхронизации. В этой области система демонстрирует квазигармонические колебания. Выход в область II сопровождается возникновением устойчивого двумерного тора. Он соответствует режиму двухчастотных квазипериодических колебаний. В области III наблюдается явление бистабильности.

На рис. 2 представлены проекции сосуществующих аттракторов. Здесь имеются два варианта бистабильности. Например, при $\rho = 0,01$, $\gamma = 0,06$ сосуществуют два предельных цикла S и S' , первый из которых соответствует режиму синфазной синхронизации, а второй – противофазной. При $\rho = 1,035$, $\gamma = 0,06$ сосуществуют предельный цикл S и двумерный тор T .

Подчеркнем, что в системе (1) диссипативно связанных осцилляторов Ван дер Поля без запаздывания в канале связи ($\tau = 0$), а также при относительно небольших значениях τ область бистабильности отсутствует. Чтобы выяснить, в результате каких бифуркаций происходит формирование мультистабильности, воспользуемся конечномерной моделью, которую можно получить в приближении малого времени запаздывания [15-16].

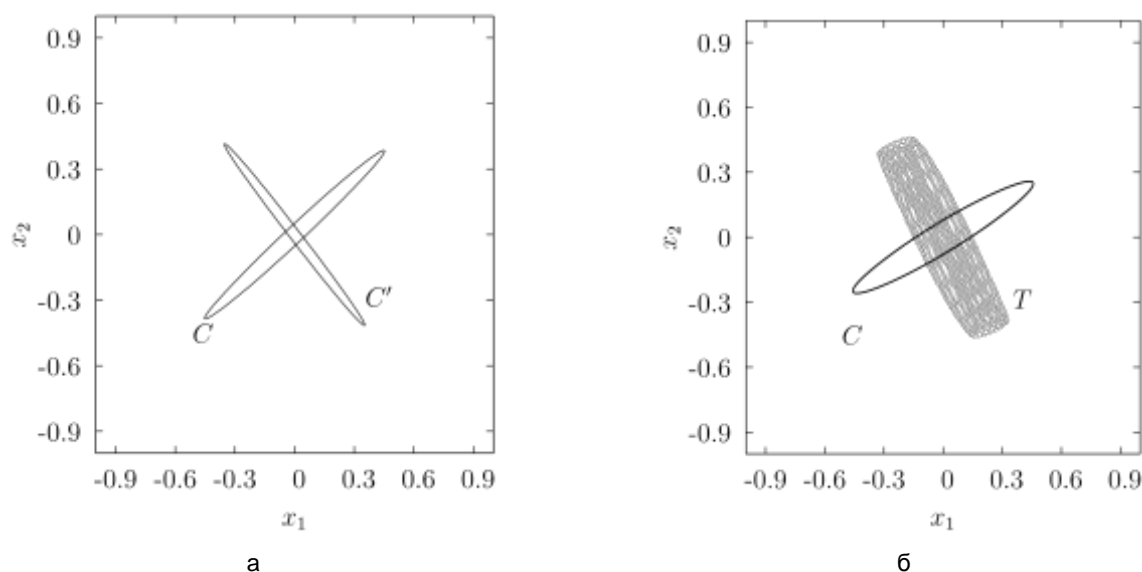


Рис. 1. Проекция фазовых портретов системы (1) для $\varepsilon = 0,1$, $\tau = 1,5$:
 а – $\rho = 1,01$, $\gamma = 0,06$; б – $\rho = 1,035$, $\gamma = 0,06$

Динамика конечномерной системы

Разложим в системе (1) члены с отклоняющимся аргументом в ряд Тейлора:

$$\dot{x}_{1,2}(t - \tau) = \dot{x}_{1,2}(t) + \sum_{k=1}^n \frac{\dot{x}_{1,2}^{(k)}(t)}{k!} (-\tau)^k. \quad (2)$$

Считая, что параметр τ , определяющий величину запаздывания, имеет малую величину, ограничимся линейными слагаемыми. Тогда исходная система уравнений (1) примет следующий вид:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = y_1, \\ \dot{y}_1 = \frac{1}{1-\gamma^2\tau^2} \left((\varepsilon - x_1^2)y_1 - x_1 - \gamma y_1 + \gamma y_2 \right) - \frac{\gamma\tau}{1-\gamma^2\tau^2} \left((\varepsilon - x_2^2)y_2 - p^2 x_2 - \gamma y_2 + \gamma y_1 \right), \\ \dot{x}_2 = y_2, \\ \dot{y}_2 = \frac{1}{1-\gamma^2\tau^2} \left((\varepsilon - x_2^2)y_2 - p^2 x_2 - \gamma y_2 + \gamma y_1 \right) - \frac{\gamma\tau}{1-\gamma^2\tau^2} \left((\varepsilon - x_1^2)y_1 - x_1 - \gamma y_1 + \gamma y_2 \right). \end{cases} \quad (3)$$

Размерность фазового пространства системы (3) равна четырём, и время запаздывания τ входит в обыкновенные дифференциальные уравнения (3) как постоянный коэффициент.

Отметим, что при $\tau = 0$ система уравнений (3) и система (1) являются идентичными. Таким образом, при малых временах запаздывания в канале связи ($\tau \rightarrow 0$) можно ожидать соответствие динамики и бифуркаций, происходящих в конечномерной модели (3), таковым в исходной системе (1). Однако интересующие нас эффекты наблюдаются при достаточно больших величинах параметра τ . Посмотрим, позволит ли конечномерная модель (3) пронаблюдать интересующее нас явление бистабильности, а также дать качественное описание бифуркационных механизмов, приводящих к формированию данного эффекта.

Выберем в системе (3) такие же значения параметров, как в случае системы с отклоняющимся аргументом (2), и построим бифуркационную диаграмму на плоскости параметров «отношение частот – коэффициент связи».

Границами областей с различным устройством фазового пространства являются следующие бифуркационные линии. l_{AH_1} – линия бифуркации Андронова – Хопфа состояния равновесия в начале координат. При значениях параметров из области **I** в фазовом пространстве системы существует седловое состояние равновесия (потерявшее устойчивость по двум направлениям, но сохранившее по двум другим) в начале координат и устойчивый предельный цикл. Переход в область **II** происходит при пересечении линии l_{AH_1} . При этом состояние равновесия теряет устойчивость еще по двум направлениям, а в его окрестности мягко рождается седловой предельный цикл.

Переход **II**→**III** сопровождается касательной бифуркацией, которой соответствует линия l_{SN_1} и в результате которой в фазовом пространстве системы рождаются два седловых предельных цикла. Один из этих циклов затем претерпевает касательную бифуркацию с устойчивым предельным циклом при пересечении линии l_{SN_2} . В области **IV** в фазовом пространстве системы существует устойчивый двумерный тор, два седловых предельных цикла и неустойчивое состояние равновесия в начале координат. Тор рождается в результате бифуркации Неймарка – Сакера, которую претерпевает устойчивый предельный цикл при пересечении линии l_{NS} .

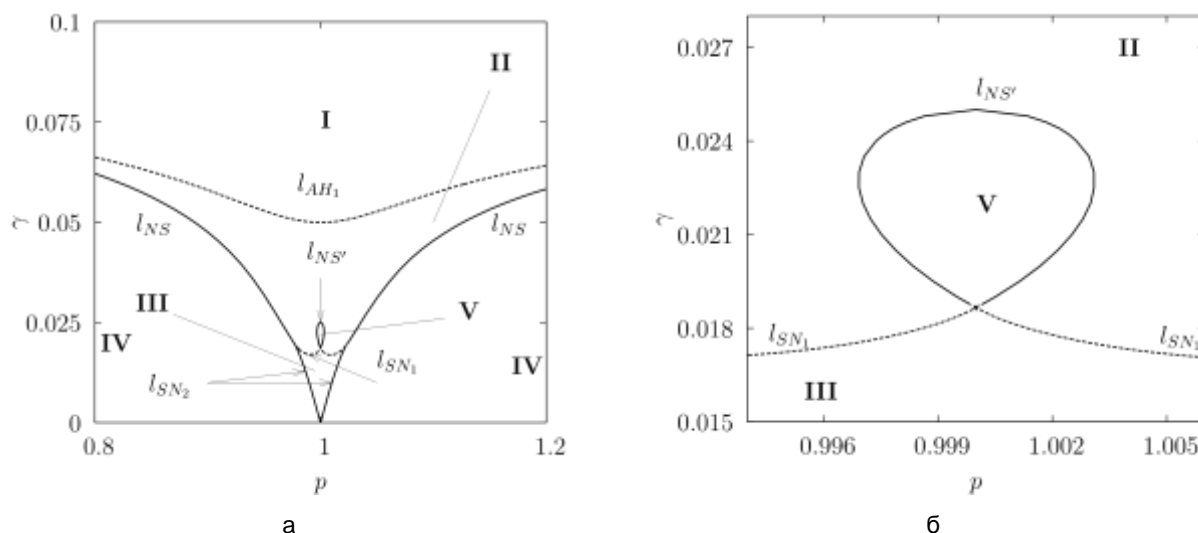


Рис. 2. а – бифуркационная диаграмма системы (3) при $\varepsilon = 0,1$, $\tau = 1,5$.
 I, II, III – области синхронизации, IV – область квазипериодических колебаний,
 V – область бистабильности. l_{AH_1} – линия бифуркации Андронова – Хопфа,
 $l_{SN_{1,2}}$ – линии касательной бифуркации предельных циклов,
 $l_{NS}, l_{NS'}$ – линии бифуркации Неймарка – Сакера.
 б – увеличенный фрагмент бифуркационной диаграммы

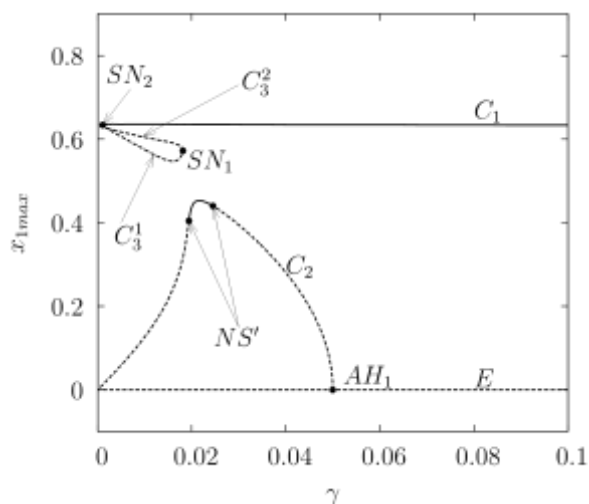


Рис. 3. Бифуркационная диаграмма системы (3) в зависимости от γ для $\varepsilon = 0,1$, $\rho = 1,001$.
 $C_1, C_2, C_3^{1,2}$ – предельные циклы, E – состояние равновесия, AH_1 – бифуркация Андронова – Хопфа,
 $SN_{1,2}$ – касательные бифуркации предельных циклов, NS' – бифуркации Неймарка – Сакера

Особого внимания заслуживает область **V**, образованная линиями бифуркации Неймарка – Сакера $l_{NS'}$ седлового предельного цикла. При значениях параметров из этой области в фазовом пространстве системы наблюдается сосуществование двух устойчивых предельных циклов. Рассмотрим подробнее эту область. Установим $\rho = 1,001$ и проследим эволюцию фазового пространства системы при

вариации значения γ (рис. 4). При $\gamma = 0,03$ в фазовом пространстве системы существуют устойчивый предельный цикл C_1 , седловой предельный цикл C_2 и неустойчивая неподвижная точка E . Уменьшение значения коэффициента связи ведёт к росту радиуса седлового предельного цикла и бифуркации Неймарка – Сакера. В результате этой бифуркации предельный цикл становится устойчивым, и в фазовом пространстве системы сосуществуют два устойчивых цикла, один из которых соответствует режиму синфазной синхронизации, а второй – противофазной (см. рис. 5 а). Дальнейшее уменьшение значения γ приводит к ещё одной бифуркации Неймарка – Сакера, в результате которой в окрестности цикла C_2 мягко рождается устойчивый двумерный тор. Таким образом, вторая бифуркация Неймарка – Сакера носит суперкритический характер, а на плоскости параметров, помимо области бистабильности «цикл-цикл», существует область бистабильности «цикл-тор». На рис. 5 б представлена проекция фазового портрета системы (3) в области сосуществования предельного цикла и двумерного тора.

Сравнивая фазовые портреты, представленные на рис. 2 и 5, можно сделать вывод, что интересное нас явление бистабильности, наблюдаемое в исходной системе (1) при существенных величинах времени запаздывания, полностью реализуется в конечномерной модели (3) исходной системы, несмотря на то, что данная модель получена в предположении малых времен запаздывания. Таким образом, конечномерная модель (3) позволяет на качественном уровне дать описание бифуркационных механизмов, лежащих в основе эффектов, имеющих место в исходной системе при достаточно большом времени запаздывания в канале связи исходной модели (1).

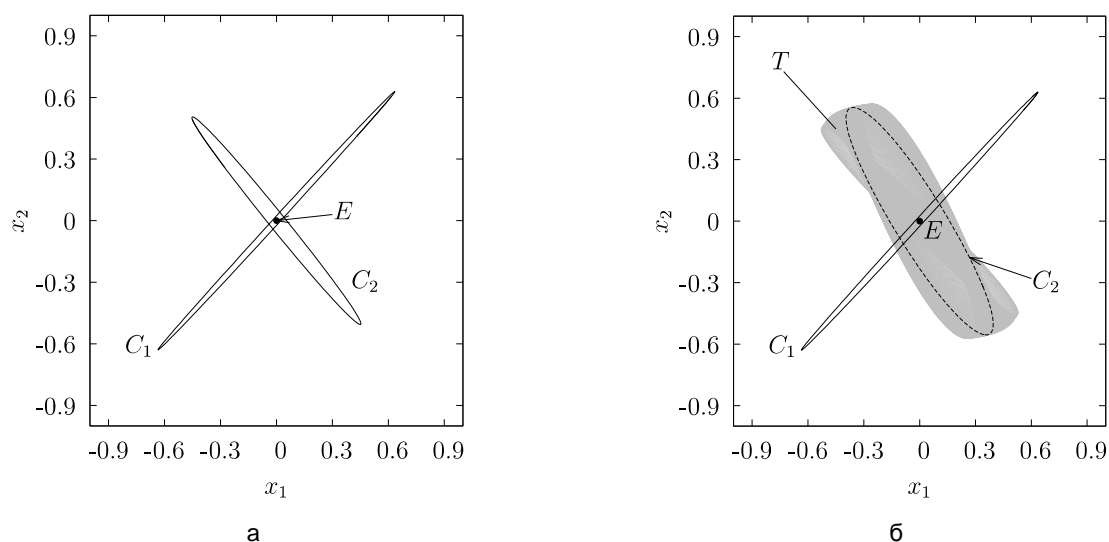


Рис. 4. Проекция фазового портрета системы (3) $\varepsilon = 0,1$, $\tau = 1,5$, $\rho = 1,001$.
 а – $\gamma = 0,021$. E – состояние равновесия, $C_{1,2}$ – устойчивые предельные циклы.
 б – $\gamma = 0,0193$. E – состояние равновесия, C_1 – устойчивый предельный цикл,
 C_2 – седловой предельный цикл, T – устойчивый двумерный тор

Заключение

Проведенные исследования показали, что введение запаздывания в канале связи между автогенераторами приводит к формированию областей бистабильности внутри основной области синхронизации. При этом сосуществуют либо два предельных цикла, либо предельный цикл и двумерный тор. Теперь взаимодействующие генераторы могут демонстрировать режим не только синфазной синхронизации, но и противофазной. Кроме того, переход от синхронного поведения к несинхронному теперь может управляться не только вариацией параметров системы, но и с помощью начальных условий. В эксперименте сбоя синхронизации в подобных системах можно осуществить кратковременным импульсом, приложенным к одному из генераторов. Бифуркационный анализ конечномерной модели двух генераторов с запаздыванием в канале связи показал, что в основе формирования областей бистабильности лежит бифуркация Неймарка – Сакера, которую претерпевает седловой предельный цикл.

Работа выполнена в рамках проекта №1694 базовой части госзадания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блехман И.И. Синхронизация динамических систем. М.: Наука, 1971. 896 с.
2. Pikovsky A., Rosenblum M., Kurths J. Synchronization: A Universal Concept in Nonlinear Science. Cambridge: Cambridge University Press, 2003. 432 p.
3. Synchronization: From Simple to Complex / A. Balanov, N. Janson, D. Postnov, O. Sosnovtseva. Berlin: Springer, 2008. 426 p.
4. Nonlinear Dynamics of Chaotic and Stochastic Systems. Tutorial and Modern Development / V.S. Anishchenko, V.V. Astakhov, A.B. Neiman, T.E. Vadivasova, L. Schimansky-Geier. Berlin: Springer, 2007.
5. Raddy D.V.R., Sen A., Johnston G.L. Time Delay Induced Death in Coupled Limit Cycle Oscillators // Physical Review Letters. 1998. Vol. 80. № 23. P. 5109.
6. Raddy D.V.R., Sen A., Johnston G.L. Experimental Evidence of Time-Delay-Induced Death in Coupled Limit-Cycle Oscillators // Physical Review Letters. 2000. Vol. 85. № 16. P. 3381.
7. Yeung M.K.S., Strogatz S.H. Time Delay in the Kuramoto Model of Coupled Oscillators // Phys. Rev. Lett. 1999. Vol. 82. P. 648.
8. Влияние задержки в канале связи на режимы полной синхронизации хаотических систем с дискретным временем / В.В. Астахов, Е.И. Неходцева, С.В. Астахов, А.В. Шабунин // Известия вузов ПНД. 2007. Т. 15. № 5. С. 61-67.
9. Влияние задержки в канале связи на полную синхронизацию / В.В. Астахов, Е.И. Неходцева, С.В. Астахов, А.В. Шабунин // Известия Саратовского университета. 2008. Т. 8. № 2. С. 30-34.
10. Pyragas V., Pyragas K. Relation between the extended time-delayed feedback control algorithm and the method of harmonic oscillators // Physical Review E. 2015. Vol. 92. № 2. P. 022925.
11. Hooton E.W., Amann A. Analytical Limitation for Time-Delayed Feedback Control in Autonomous Systems // Physical Review Letters. 2012. Vol. 109. № 15. P. 154101.
12. Ichinose N., Komuro M. Delayed feedback control and phase reduction of unstable quasi-periodic orbits // Chaos. 2014. Vol. 24. № 3. P. 033137.
13. Aronson D.G., Ermentrout G.B., Kopell N. Amplitude response of coupled oscillators // Physica D: Nonlinear Phenomena. 1990. Vol. 41. № 3. P. 403-449.
14. Van der Pol B. On relaxation-oscillations // The London, Edinburgh and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1927. Vol. 7. № 2. P. 978-992.
15. Рубаник В.П. Колебания квазилинейных систем с запаздыванием. М.: Наука, 1969. 287 с.
16. Wirkus S., Rand R. The Dynamics of Two Coupled van der Pol Oscillators with Delay Coupling // Nonlinear Dynamics. 2002. Vol. 30. № 3. P. 205-221.

Гулай Артем Петрович –
магистрант кафедры
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Астахов Сергей Владимирович –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Информационная безопасность
автоматизированных систем»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Астахов Владимир Владимирович –
доктор физико-математических наук,
профессор, заведующий кафедрой
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Artem P. Gulai –
Master Student, Department of Radioelectronics
and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Sergey V. Astakhov –
Ph. D., Associate Professor,
Department of Information Security of Automated
Systems
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir V. Astakhov –
Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Radioelectronics
and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 17.09.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 579.23:53.086:615.281

П.С. Ерохин, Н.П. Коннов, С.П. Заднова, Т.В. Бугоркова**ДИНАМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА МИКРООРГАНИЗМОВ В УСЛОВИЯХ НЕБЛАГОПРИЯТНОГО ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ АБИОТИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ МЕТОДОМ СКАНИРУЮЩЕЙ ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ**

Методами сканирующей зондовой микроскопии (СЗМ) показано изменение клеточной стенки и деструкция микроорганизмов на примере E.coli и V.cholerae в условиях неблагоприятного действия факторов абиотической природы. Приведена динамическая характеристика микроорганизмов под действием спиртов, альдегидов и соли в режимах прерывистого и непрерывного контакта атомно-силовой микроскопии (АСМ).

АСМ, микроорганизмы, этанол, глутаровый альдегид, хлорид натрия, индекс I, шероховатость, сила адгезии

P.S. Erokhin, N.P. Konnov, S.P. Zadnova, T.V. Bugorkova**DYNAMIC CHARACTERISTICS OF MICROORGANISMS UNDER ADVERSE IMPACT OF ABIOTIC AGENTS BY MEANS OF THE SCANNING PROBE MICROSCOPE**

The scanning probe microscopy was applied for the E.coli and V.cholerae models simulated to show alteration of the cell wall and complete destruction of microorganisms under adverse impact of abiotic agents.

AFM, microorganisms, ethanol, glutaraldehyde, sodium chloride, index I, roughness, adhesion force

Визуализация морфологии клеточной стенки микроорганизмов и их ультраструктуры является основой для понимания путей взаимодействия бактерий с их условиями существования и конкурентных преимуществ [1]. Поэтому при изучении микроорганизмов возрастает интерес исследователей к использованию атомно-силовой микроскопии (АСМ), которая позволяет получать комплексную надежную количественную информацию о физической природе процессов, протекающих в биологических объектах [2, 3].

С использованием АСМ появились исследования по изучению морфофункциональных особенностей отдельных бактериальных клеток [4], а также при воздействии на них различных факторов биотической и абиотической природы [5].

Так, например, группа авторов с использованием атомно-силовой микроскопии изучили воздействие антибактериальных препаратов на клеточную стенку бактерий [6]. Ряд исследователей [7] успешно использовали полуконтактный метод АСМ для визуализации взаимодействия антигена с антителом и бактерий с бактериофагом [8].

Однако авторами использовался только один параметр (например, шероховатость клеточной стенки [9-11]), на основе которого проводилась характеристика микроорганизмов в условиях неблагоприятного действия вещества.

В соответствии с этим цель данной работы заключалась в динамической характеристике микроорганизмов в условиях неблагоприятного действия факторов абиотической природы методом сканирующей зондовой микроскопии с привлечением комплекса параметров, достоверно отражающих изменения бактерий.

Модельные микроорганизмы *E.coli* М-17, *V.cholerae* М-1261 (типичный штамм биовара Эль Тор), *V.cholerae* М-1293 (геновариант биовара Эль Тор) культивировали в LB бульоне в течение 24 ч при температуре 37°C.

Для оценки негативного действия спиртов и альдегидов на бактерии кишечной палочки использовали этиловый спирт в концентрациях от 40 до 96% и глутаровый альдегид в концентрациях 2,5 и 5% со временем экспозиции 30 и 60 минут.

При изучении влияния NaCl на морфологию и ультраструктуру *V.cholerae*, в LB бульон дополнительно добавляли раствор соли, доводя концентрацию агента до 3М. Время экспозиции составляло 20, 40, 60, 90 и 120 минут.

Затем бактериальные взвеси готовили в соответствии с МУ 1.3.3103-13 «Организация работы лабораторий, использующих методы электронной и атомно-силовой микроскопии при исследовании культур микроорганизмов I-IV групп патогенности».

Изучение проводилось на сканирующем зондовом микроскопе Solver P47-PRO (NT-MDT, Россия). Применялись кремниевые кантилеверы NSG01 (NT-MDT, Россия), напыленные золотом, для режима прерывистого контакта (резонансная частота 120 кГц, константа жесткости – 5,5 Н/м) и CSG10 (NT-MDT, Россия) для режима непрерывного контакта (резонансная частота 20 кГц, константа жесткости – 0,1 Н/м). Исследования выполнялись в режимах прерывистого и непрерывного контакта АСМ следующими методами: полуконтактным, рассогласования, отображения фазы, постоянной силы, латеральных сил, модуляции силы.

Для обработки полученных результатов использовалась программа Nova (NT-MDT, Россия), позволяющая редактировать полученные АСМ изображения, а также определять комплекс параметров объекта исследований.

Для изучения морфологии бактериальных клеток был использован режим прерывистого контакта. С целью минимизации влияния на клеточную морфологию в процессе сканирования взаимодействия между иглой кантилевера и микроорганизмом, уровень значений амплитуды силы «SetPoint» применяли в соответствии с методическими рекомендациями «Оптимизация параметров сканирования микроорганизмов методом атомно-силовой микроскопии». С использованием полуконтактного метода получали изображения для оценки шероховатости бактериальной поверхности, основанной на вычислении RMS значений, то есть стандартного отклонения всех значений высот в пределах выбранной области. Количественный анализ воздействия выбранных абиотических факторов на бактериальную морфологию с целью динамической характеристики микроорганизмов осуществляли на основе использования отношения ширина/высота – индекса I, отражающего защиту формы бактериальной клетки в сравнении с интактными клетками. Оценку степени разрушений бактерий различными веществами и концентраций проводили с помощью коэффициента K, представляющего собой отношение $I_{\text{контроль}}/I_{\text{эксперимент}}$. $K = 1$ показывает отсутствие влияния вещества. В качестве второго показателя применяли величину RMS (шероховатость). Эти два показателя наиболее четко отражают действие агента на бактериальную клетку.

После обработки микроорганизмов этанолом наблюдали изменение обоих выбранных показателей. Так, при использовании 40 % этилового спирта через 30 минут происходит некоторое изменение коэффициента влияния агента ($K = 2,27$), что свидетельствует о невысоком повреждающем действии. Через 60 минут отмечали незначительное увеличение этого показателя до $K = 2,5$, что свидетельствует о минимальном сжатии (сморщивании) бактериальной клетки.

Повышение концентрации этанола до 70 и 96% при длительности воздействия 30 и 60 минут оказывало выраженное действие на морфологию клетки с максимальным сжатием через 60 минут. Значения коэффициента составляли 2,86 и 4,34 соответственно для экспозиции 30 минут, а также 3,45 и 5,88 соответственно для экспозиции 60 минут.

Оценка второго показателя RMS (шероховатость) также четко выявила количественные изменения значений за счет возрастания шероховатости бактериальной поверхности в зависимости от концентрации этилового спирта. Показано, что увеличение концентрации этанола до 70 и 96% приводит к увеличению величины средней арифметической шероховатости в 1,63-4,46 раза соответственно по сравнению с контролем при экспозиции в 30 минут и в 2,1-5,5 раза для 60 минут экспозиции. При этом наблюдали аналогичную динамику изменений величины среднеквадратичной шероховатости клеточной поверхности. Увеличение этого показателя составляло от 2,37 до 1,18 раза для выбранных концентраций этанола в течение 30 минут и от 3,96 до 1,36 раз в течение 60 минут.

Следует отметить сложность изучения ультраструктур клеточной поверхности, таких как жгутики, пили и внеклеточное полимерное вещество, так как они практически исчезали с поверхности.

Особенностью спиртового воздействия является способность разрушать липиды, формировать обширные поры в клеточной поверхности и удалять макромолекулы с поверхности клеток.

Другим показателем влияния воздействия различных факторов абиотической природы на микроорганизм является сила адгезии, которая определяет связь бактерий с поверхностью. При исследовании биологического объекта в жидкой среде связь его с подложкой слабее, чем при исследовании на воздухе, а малейшие деформации могут снижать качество и достоверность получаемых результатов [5]. При изучении микроорганизмов на воздухе подобные явления могут также проявляться. Поэтому выбор метода воздействия является важным моментом при планировании эксперимента. Как показали наши исследования, при денатурирующем воздействии сила адгезии возрастала с увеличением времени экспозиции и концентрации действующего компонента и повторяла тенденцию изменений RMS показателя.

Экспериментально показано, что увеличение концентрации этанола до 96% способствует более жесткому прикреплению бактерий к стеклу, что проявляется в увеличении силы адгезии в 2,8 раза по сравнению с контролем. Более длительная экспозиция воздействия этанола определила наивысшее повышение адгезии микроорганизмов к подложке (в 3,6 раза).

При оценке действия глутарового альдегида на клеточную морфологию использовали индекс I. Полученные данные показали, что при воздействии 2,5% глутарового альдегида в течение 30 и 60 минут отмечено некоторое повышение коэффициента I (до 2,08) при сравнении с контрольными показателями, причем продолжительность воздействия на эту величину не влияла. Применение глутарового альдегида при экспозиции 30 и 60 минут в концентрации 5% не оказывало существенного отрицательного действия на клеточную морфологию, а коэффициент $I = 2,32$ достоверно не отличался от коэффициента, полученного при использовании 2,5% концентрации глутарового альдегида.

Оценка второго показателя RMS значений (шероховатость) выявила определенные количественные изменения величины средней арифметической и среднеквадратичной шероховатости при использовании 2,5 и 5% глутарового альдегида и экспозиции 30 и 60 минут, которые не влекли за собой глубокие изменения клеточных структур или их утрату. При неблагоприятном действии 2,5% глутаровым альдегидом в течение 30 минут наблюдали повышение значений средней арифметической шероховатости в 1,4 раза, средней квадратичной – в 1,5 раза по сравнению с контролем. Для 60 минут экспозиции полученное увеличение значений составляло 1,55 и 1,47 раза соответственно.

Таким образом, использование глутарового альдегида показало достаточную способность сохранения клеточной морфологии, при этом наблюдали минимальную деформацию бактерий, а также сохранение пилей, жгутиков, капсульных компонентов в естественной морфологии, которое невозможно при воздействии этанола. По-видимому, это связано с тем, что действие альдегидов на клетки формирует ковалентные химические связи между протеинами, поэтому может поддерживать целостность мембранных липидов, так же как и поверхностных макромолекул.

Еще одним показателем влияния различных факторов абиотической природы на микроорганизм является сила адгезии (F), которая определяет связь бактерий с поверхностью.

Как показали наши исследования, при использовании 2,5%-го и 5%-го раствора глутарового альдегида изменяется сила адгезии F по сравнению с действием этанола (70-96% концентрации). Показатель был в 1,5 и 2,7 раза соответственно ниже, но при сравнении с контролем (интактные клетки) достоверно не отличался.

В дальнейших исследованиях для обеззараживания проб нами был использован 2,5%-й раствор глутарового альдегида. Были изучены морфология и ультраструктура различных видов микроорганизмов. Как показали проведенные исследования, выбранный метод воздействия существенно не влияет на морфологию микробной клетки и не нарушает ультраструктуру.

Морфометрическую оценку действия на бактериальные клетки гипертонического раствора хлорида натрия изучали на модели штаммов *V.cholerae* М-1261 и *V.cholerae* М-1293. Динамическая характеристика штаммов *V.cholerae*, подвергшихся действию NaCl, проводилась на основе комплекса трех параметров – индекса I, шероховатости и силы адгезии микроорганизмов к покровному стеклу.

Полученные экспериментальные данные показали, что под действием хлорида натрия происходили изменения показателей I. Так, при экспозиции 20 минут происходило незначительное изменение коэффициента влияния агента ($K = 1,1$), что свидетельствовало о невысоком повреждающем действии осмотического стресса. Через 60 минут отмечали незначительное увеличение этого показателя до $K = 1,25$, что свидетельствует о минимальном сжатии (сморщивании) бактериальной клетки. Спустя

120 минут экспозиции наблюдали сжатие и разрушение бактерий, что проявлялось в значительном увеличении индекса I (рис. 1).

Изучение динамики изменения второго показателя – шероховатости выявило количественные изменения величины средней арифметической и среднеквадратичной шероховатости при использовании 3М хлорида натрия в диапазоне времен экспозиции от 20 и 120 минут, которые влекли за собой глубокие изменения клеточных структур или их утрату при времени экспозиции 120 минут.

При воздействии соли на клетки *V.cholerae* в течение 60 минут наблюдали повышение значений средней арифметической шероховатости в 1,57-1,7 раза, средней квадратичной – в 1,5 раза по сравнению с контролем. Для 120 минут экспозиции полученное увеличение значений составляло в 2-2,1 раза. Полученные данные свидетельствуют о существенном осмотическом деструктивном влиянии хлорида натрия на бактериальную клетку.

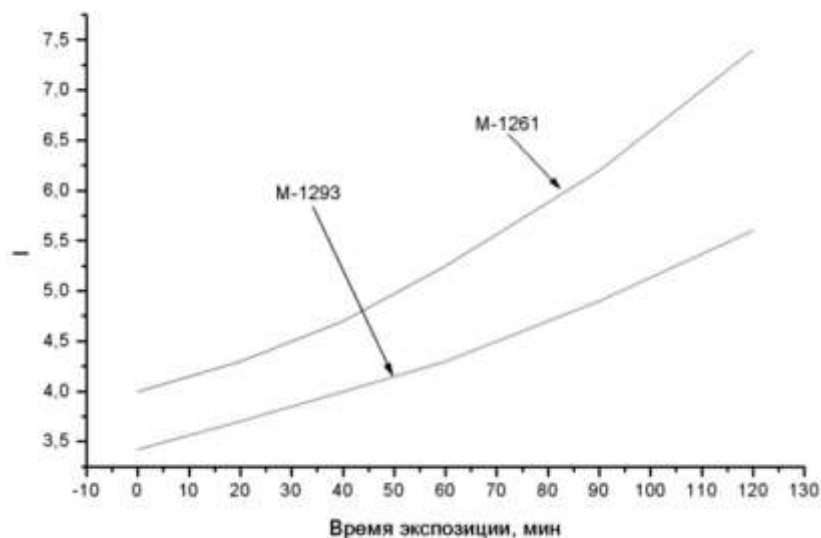


Рис. 1. Динамика изменения индекса *IV.cholerae*

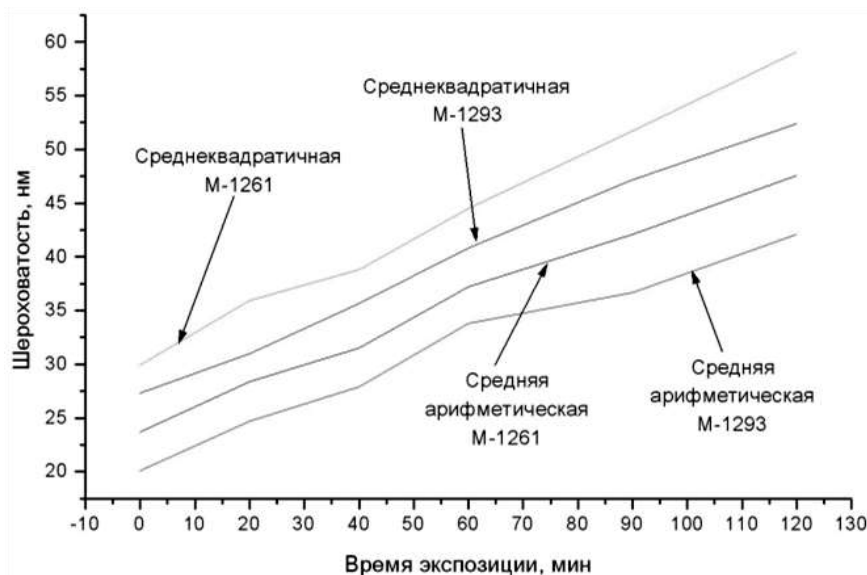


Рис. 2. Динамика изменения шероховатости *V.cholerae*

Следующим изучаемым нами показателем, определяющим степень влияния хлорида натрия на микроорганизм, являлась сила адгезии. Как показали наши исследования, при воздействии соли на бактерии сила адгезии возрастала с увеличением времени экспозиции, повторяла тенденцию изменений RMS показателя.

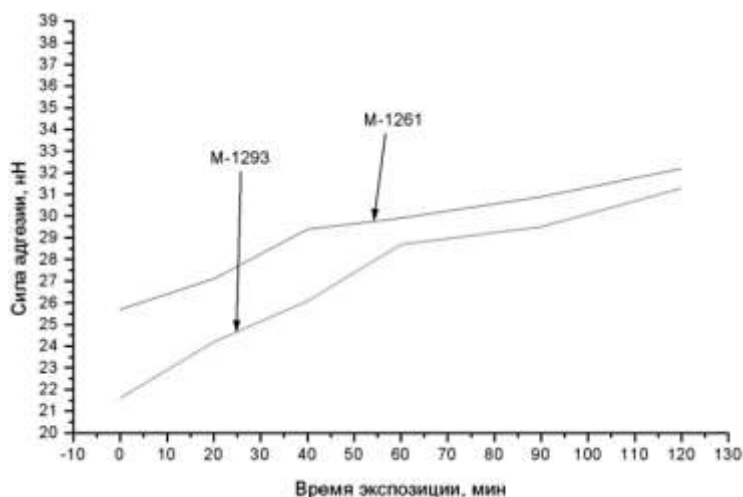


Рис. 3. Динамика изменения силы адгезии *V.cholerae*

Экспериментально показано, что увеличение времени экспозиции до 60 минут способствует более жесткому прикреплению бактерий к стеклу, что проявляется в увеличении силы адгезии в 1,2 раза (рис. 3) по сравнению с контролем. Более длительная экспозиция воздействия соли определила наивысшее повышение адгезии микроорганизмов к подложке (в 1,3 раза).

Таким образом, используя методы сканирующей зондовой микроскопии, проведена динамическая характеристика микроорганизмов в условиях неблагоприятного действия факторов абиотической природы на примере *E.coli* и *V.cholerae*.

Использовали величину отношения ширина/высота – индекс I , который отражает защиту формы бактериальной клетки, а для сравнительной оценки нами был введен коэффициент K , представляющий собой отношение $I_{\text{контроль}}/I_{\text{эксперимент}}$, при $K=1$ влияние вещества отсутствует. Кроме того, оценивали шероховатость и адгезивные свойства бактериальной поверхности. Представленные нами данные показали, что денатурирующее воздействие этанола в низких концентрациях не вызывает глубоких изменений бактериальной клетки, а также обеспечивает низкую силу адгезии к поверхности подложки. Высокие концентрации этанола, с одной стороны, способствуют высокой адгезии бактерий к подложке, что при световой микроскопии является положительным качеством, но для методов АСМ этот тип воздействия нарушает морфологию микробной клетки и препятствует исследованию ее ультраструктуры. Полученные результаты согласуются с данными зарубежных исследователей, которые отмечают, что действие спиртов способно разрушать липиды, формировать обширные поры в клетке и повреждать поверхностные макромолекулы бактериальной клетки [12].

Оценка влияния глутарового альдегида показала, что воздействие 2,5%-го раствора на микроорганизмы, не образующие споры, приводит к минимальному нарушению клеточной поверхности и полному ее сохранению ультраструктуры (жгутики и другие структуры). Проведенные исследования показали незначительные изменения оцениваемых показателей при сравнении двух концентраций глутарового альдегида, но более высокие адгезирующие свойства 5%-го глутарового альдегида.

Использование методов сканирующей зондовой микроскопии, позволяющих определять комплекс параметров для оценки воздействия хлорида натрия на морфологию и ультраструктуру бактериальной клетки, позволило провести динамическую характеристику бактерий холерного вибриона в условиях неблагоприятного действия выбранного агента. Установлены морфометрические параметры бактериальной клетки в условиях осмотического стресса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Young K.D. Bacterial morphology: why have different shapes? // Current Opinion in Microbiology. 2007. № 10. P. 596-600.
2. Chao Y., Zhang T. Optimization of fixation methods for observation of bacterial cell morphology and surface ultrastructures by atomic force microscopy // Appl. Microbiol. Biotechnol. 2011. Vol. 92. P. 381-392.

3. Understanding the cleaning effect with sodium hypochlorite of *Enterococcus Faecalis* endodontic pathogen using electrochemical impedance spectroscopy (EIS), atomic force microscopy (AFM) and surface plasmon resonance (SPR) / V. Penta, D. Vornicescu, M. Keusgen, C. Pirvu // Dig. J. of Nanomat. and Biostruc. 2013. Vol. 8. №. 3. P. 1205-1214.

4. Трансмиссионная электронная и сканирующая зондовая микроскопия белков S-слоя сибиреязвенного микроба / Н.П. Коннов, Ю.П. Волков, А.Ю. Корсакова и др. // Проблемы особо опасных инфекций. 2004. Вып. 2(88). С. 34-36.

5. Kinetics of antimicrobial peptide activity measured on individual bacterial cells using high-speed atomic force microscopy / G.E. Fantner, R.J. Barbero, D.S. Gray, A.M. Belcher // Nature Nanotechnology. 2010. doi: 0.1038/nnano.2010.29.

6. Wang H., Brown H.R. Atomic force microscopy study of the photografting of glycidyl methacrylate onto HDPE and the microstructure of the grafted chains // Polymer. 2007. Vol. 48. P. 477-487.

7. Observing structure, function and assembly of single proteins by AFM / D.J. Muller, H. Janovjak, T. Lehto, L. Kuerschner, K. Anderson // Progress in Biophysics and Molecular Biology. 2002. Vol. 79. P. 1-43.

8. Оценка фаголизабельности штаммов холерного вибриона с использованием атомно-силовой микроскопии / Д.В. Уткин, П.С. Ерохин, Н.А. Осина, Н.П. Коннов // Известия Саратовского университета. Новая серия. Сер. Химия. Биология. Экология. 2013. Т. 13. Вып. 3. С. 81-84.

9. Biological applications of the AFM: from single molecules to organs / S. Kasas, N.H. Thomson, B.L. Smith et al. // International Journal Imaging System Technology. 1997. Vol. 8. P. 151-161.

10. Contribution of Type IV Pili to the virulence of *Aeromonas salmonicida* subsp. *salmonicida* in Atlantic Salmon (*Salmo salar* L.) / J.M. Boyd, A. Dacanay, L.C. Knickle et al. // Infection and Immunity. 2008. Vol. 76. № 4. P. 1445-1455.

11. Interactions of oritavancin, a new lipoglycopeptide derived from vancomycin, with phospholipid bilayers: effect on membrane permeability and nanoscale lipid membrane organization / O. Domenech, G. Francius, P.M. Tulkens et al. // Biochimica et Biophysica Acta. 2009. Vol. 1788. P. 1832-1840.

12. Biofilm formation by a Fimbriae-Deficient mutant of *Actinobacillus actinomycetem comitans* / T. Inoue, R. Shingaki, N. Sogawa et al. // Microbiol. Immunol. 2003. Vol. 47. № 11. P. 877-881.

Ерохин Павел Сергеевич –
младший научный сотрудник
Федерального казенного учреждения
здравоохранения «Российский научно-
исследовательский противочумный
институт «Микроб», Саратов

Pavel S. Erokhin –
junior researcher
Russian Research
Anti-Plague Institute «Microbe», Saratov

Коннов Николай Павлович –
главный научный сотрудник Федерального
казенного учреждения здравоохранения
«Российский научно-исследовательский
противочумный институт «Микроб», Саратов

Nikolay P. Konnov –
chief researcher
Russian Research
Anti-Plague Institute «Microbe», Saratov

Заднова Светлана Петровна –
старший научный сотрудник Федерального
казенного учреждения здравоохранения
«Российский научно-исследовательский
противочумный институт «Микроб», Саратов

Svetlana P. Zadnova –
senior researcher
Russian Research
Anti-Plague Institute «Microbe», Saratov

Бугоркова Татьяна Васильевна –
старший научный сотрудник Федерального
казенного учреждения здравоохранения
«Российский научно-исследовательский
противочумный институт «Микроб», Саратов

Tatyana V. Bugorkova –
senior researcher
Russian Research
Anti-Plague Institute «Microbe», Saratov

Статья поступила в редакцию 17.09.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 664.38:66.087.4

И.Л. Казанцева, С.С. Попова, И.В. Тимофеев, В.М. Седелкин, С.Н. Бутова**ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕТИКИ ИЗВЛЕЧЕНИЯ БЕЛКОВЫХ АГРЕГАТОВ ИЗ ЩЕЛОЧНЫХ ЭКСТРАКТОВ НУТА ПУТЕМ ЭЛЕКТРОФЛОТАЦИИ**

Представлены результаты изучения кинетики процесса извлечения белкового препарата из щелочных экстрактов нута методом электрофлотокоагуляции. Установлено, что для математического описания кинетики электрофлотации может быть использовано уравнение первого порядка, с учетом которого рассчитано значение константы скорости процесса. Проведена количественная оценка эффективности захвата частиц белка пузырьками газа.

Нут, белковый изолят, электрофлотация

I.L. Kazantseva, S.S. Popova, I.V. Timofeev, V.M. Sedelkin, S.N. Butova**KINETICS OF EXTRACTING PROTEIN FRACTIONS FROM CHICK-PEA ALKALINE EXTRACTS USING ELECTROFLOTATION**

The paper describes the results of research into extraction process kinetics for protein preparation received from the alkaline extract of chickpea by electro-flotocoagulation. It is found that for mathematical description of electroflotation kinetics we can use the first-order equation. The rate constant of the electroflotation process has been calculated. Efficiency of the protein particles trapping by the gas bubbles has been estimated.

Chick-pea, protein isolate, electroflotation

Развитие современной науки привело к широкому использованию исследователями математического аппарата для рационального планирования экспериментов, анализа количественных данных, полученных в результате экспериментов, подтверждения статистических гипотез, нахождения взаимосвязей, прогнозирования, построения математических моделей различных физико-химических процессов. В настоящее время наблюдается бурный рост числа математических приложений, связанный, прежде всего, с развитием компьютерных технологий и программирования. При изучении закономерностей протекания различных физико-химических процессов выявленные математические закономерности позволяют прогнозировать конкретное поведение системы в целом, выделить параметры, которые необходимо учитывать для интенсификации изучаемого процесса. Авторами данной работы рассмотрено применение математического аппарата при исследовании кинетики извлечения нутевого белка методом электрофлотокоагуляции, являющейся отдельной стадией разработанной технологии глубокой переработки нута.

В структуре мировых ресурсов пищевого белка растительный белок занимает ведущую роль [1]. Несмотря на приведенные в литературе убедительные данные, демонстрирующие отработанную технологию и ассортимент белковых продуктов из традиционного растительного сырья (сои, пшеницы) [2, 3], следует отметить, что отечественное промышленное производство белковых изолятов из растений отсутствует. В свете необходимости решения важнейшей в настоящее время в нашей стране проблемы импортозамещения создание отечественного производства по переработке местного высокобелкового растительного сырья, например нута [4, 5], является актуальным.

Реализованные в настоящее время в лабораторных условиях технологии глубокой переработки нута [4, 5] характеризуются достаточно низким выходом белка, являются многостадийными, связаны с многократностью стадии нейтрализации после обработки кислотами, обладают высокой аппаратоемкостью. Поиск более экономичных, экологически чистых и эффективных нетрадиционных методов обработки сырья, позволяющих внедрять ресурсосберегающие и энергосберегающие технологии нового поколения, является актуальным. Это, прежде всего, электрофизические и электрохимические методы обработки жидких сред [6, 7], среди которых можно выделить методы электрофлотации и

электрокоагуляции. Неоспоримым преимуществом этих методов является возможность благодаря полиэлектролитным свойствам белков на стадии их выделения из раствора осуществлять безреагентную корректировку pH среды путем регулирования плотности тока. Большим преимуществом методов электрофлота- и электрокоагуляции является низкая концентрация электролита фона, вводимого в раствор для обеспечения необходимой электропроводности, а подбор определенной конструкции ячейки (электролизера) и определенного расположения электродов позволяет обеспечить совместное протекание процессов электрофлотации и электрокоагуляции и обеспечить более высокий процент извлечения белка.

Сущность электрофлотационного процесса заключается в переносе частиц белка газовыми пузырьками из объема раствора на его поверхность, образующимися в результате электролитического разложения воды: водорода (на катоде) и кислорода (на аноде). Изоэлектрическое состояние белка (pH 4,1–4,4) достигается без использования дополнительных химических реагентов [7].

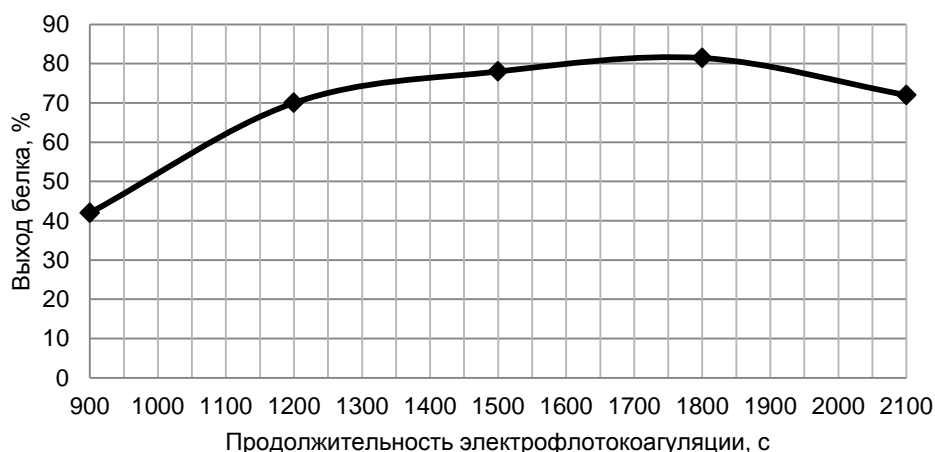


Рис. 1. Зависимость выхода белка от продолжительности процесса электрофлотокоагуляции при концентрации белка в растворе 15 мг/мл (на фоне КОН 0,1 масс %).

Экспериментальная зависимость степени извлечения нутевого белка от времени электролиза при плотности тока $(105 \pm 5) \text{ А/м}^2$ представлена на рис. 1. Указанное значение плотности тока, установленное ранее экспериментально [8], обеспечивает достижение максимального выхода белка при концентрации его в растворе $(15 \pm 1) \text{ мг/мл}$. Для контроля содержания белка в рабочем растворе (до и после электрофлотации) использовали биуретовый метод [9], основанный на образовании в щелочной среде окрашенных в фиолетовый цвет комплексов белковых молекул по месту пептидных связей с ионами меди (II). Оптическую плотность измеряли на спектрофотометре СФ-46 по стандартной методике. Выход белка (или степень извлечения) (α) , %, рассчитывали по формуле

$$\alpha = \frac{c_1 - c_2}{c_1} \times 100, \quad (1)$$

где c_1 – концентрация белка в исходном растворе до электрофлотации, мг/мл; c_2 – концентрация белка в растворе после электрофлотации, мг/мл.

В [10–12] показано, что для математического описания кинетики электрофлотации белковых агрегатов можно использовать основное уравнение кинетики химических реакций – дифференциальное уравнение (2) [13]:

$$\frac{dc}{dt} = -k \times c^n, \quad (2)$$

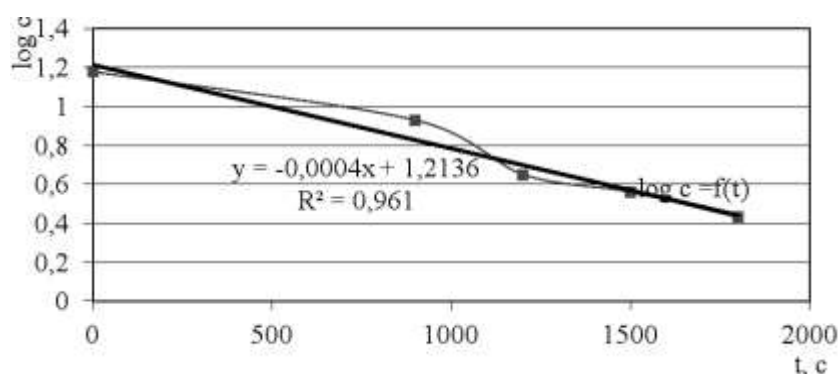
где t – продолжительность электролиза; k – константа скорости процесса; n – кинетический порядок процесса; $dc/dt = v$ – скорость реакции в данный момент времени, определяется как производная от концентрации по времени.

Для определения порядка n реакции обычно используют графический метод, в основе которого лежит построение и анализ графика, выражающего зависимость различных функций концентрации от времени, и определения, для которого из них зависимость выражается прямой линией:

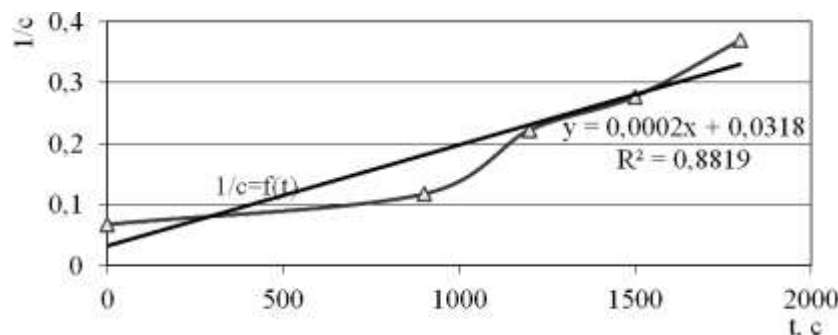
- в случае реакции первого порядка линейную зависимость от t дает $\log c$;
- из уравнения кинетики реакций второго порядка следует, что для этих реакций линейной функцией t является $1/c$;
- для реакций третьего порядка линейную зависимость от времени показывает $1/c^2$ [13].

При построении моделей рационально использовать линии тренда, которые позволяют графически отображать тенденции данных или их прогнозировать. Надежность линии тренда – R^2 . Наиболее надежна линия тренда, для которой значение R^2 равно или близко к 1. R^2 , или величина достоверности аппроксимации – это число от 0 до 1, которое отражает близость значений линии тренда к фактическим данным. Чем больше величина этого показателя, тем достовернее линия тренда.

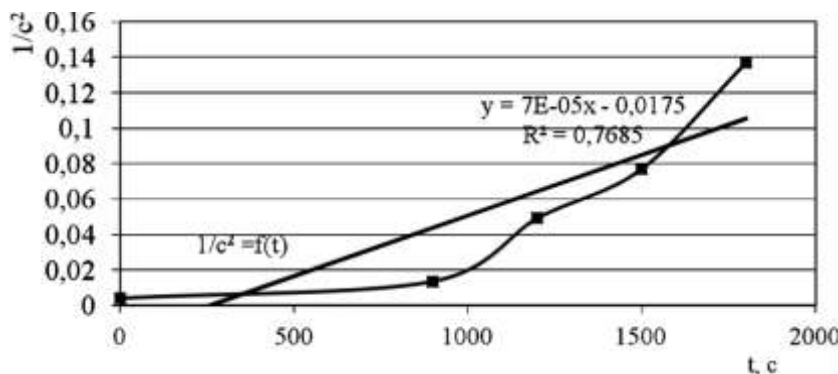
С использованием программы Excel нами были построены линейные одномерные модели в системах координат $\log c$ от t , $1/c$ от t и $1/c^2$ от t . Полученные графики представлены на рис. 2.



а



б



в

Рис. 2. Зависимость различных функций концентрации белка в растворе от времени

Наибольшее значение величины «достоверность аппроксимации данных R^2 » получено для линейной линии тренда в координатах $\log c$ от t . Следовательно, можно считать, что кинетика процесса электрофлотации описывается уравнением первого порядка:

$$\frac{dc}{dt} = -k \times c \quad \text{или} \quad -\frac{dc}{dt} = k \times c. \quad (3)$$

Разделяя переменные в уравнении (3), получаем выражение

$$-\frac{dc}{c} = k \times dt \quad (4)$$

и, интегрируя его, получаем

$$\ln c = -k \cdot t + B. \quad (5)$$

Обозначая через c_0 начальную концентрацию (при $t = 0$), определяем постоянную интегрирования:

$$B = \ln c_0.$$

Отсюда

$$\ln \frac{c}{c_0} = -k \cdot t \quad (6)$$

или

$$c = c_0 \cdot e^{-k \cdot t}. \quad (7)$$

Если через $x=c_0-c$ обозначить уменьшение концентрации исходного вещества к моменту времени t , то этому уравнению можно придать вид

$$\ln \frac{c_0 - x}{c_0} = -k \cdot t, \quad (8)$$

откуда степень извлечения (или выход) α может быть рассчитана по уравнению

$$\alpha = 1 - e^{-k \cdot t}. \quad (9)$$

В [4, 5] приводится теоретическое уравнение для константы скорости процесса флотации:

$$k = \frac{3 \cdot q \cdot E}{4 \cdot R_n}, \quad (10)$$

где q – удельный расход газа или скорость барботажа, равная объему газа, продуваемого в единицу времени через единицу поперечного сечения флотационной камеры, $\text{м}^3/\text{м}^2 \cdot \text{мин}$; R_n – усредненный эффективный радиус пузырька, м; E – эффективность захвата частицы пузырьком.

Согласно [12], скорость барботажа q при стационарном режиме барботирования не может превышать величину

$$q_{\max} = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot g \cdot \bar{d}^2}{\nu}, \quad (11)$$

где g – ускорение силы тяжести; ν – кинематическая вязкость среды; \bar{d} – средний диаметр частиц.

Известно, что размер пузырьков, выделяющихся в результате электролиза, составляет 0,015-0,2 мм [5]. Примем для расчетов средний радиус пузырьков 50 мкм.

Тогда удельный расход газа составит

$$q = \frac{2 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot (100 \cdot 10^{-6})^2}{10^{-6}} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ м/с} = 0,2 \text{ мм/с},$$

где кинематическая вязкость воды $\nu = 10^{-2} \text{ см}^2/\text{с} = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$

Для определения эффективности захвата используем выражение

$$E = A \cdot \frac{a^{3/2}}{R_n^2}, \quad (12)$$

где a – радиус частиц; R_n – радиус пузырьков; A – величина, определяемая силами, действующими между частицей и пузырьком [5].

Величину A можно оценить по формуле

$$A = 1,5 \cdot F \cdot a^{1/2}, \quad (13)$$

где F при правильном подборе реагентов может составить 0,1-0,8 [5].

В условиях рассматриваемой системы: «частица белка – пузырек газа» (водорода или кислорода) на основании данных снимков, полученных с помощью электронного микроскопа VEGA 3 TESCAN, средний размер частицы белка составляет $d \approx 20 \text{ мкм} = 20 \cdot 10^{-6} \text{ м} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ мм}$.

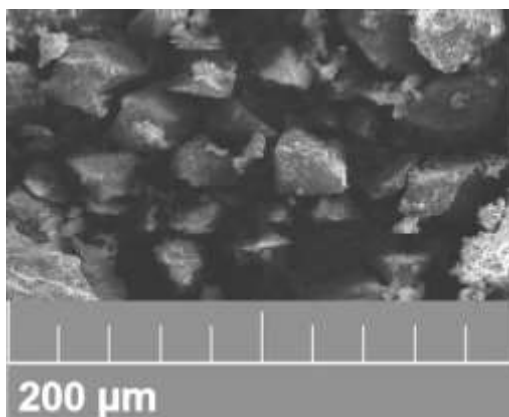


Рис. 3. Микрофотография белковых частиц нута

Принимая $F = 0,5$, получаем

$$A = 1,5 \cdot F \cdot a^{1/2} = 1,5 \cdot 0,5 \cdot (10 \cdot 10^{-6})^{1/2} = 0,0024.$$

Тогда эффективность захвата составит

$$E = A \cdot \frac{a^{3/2}}{R_n^2} = 0,0024 \cdot \frac{(10 \cdot 10^{-6})^{3/2}}{(50 \cdot 10^{-6})^2} = 0,0024 \cdot \frac{10^{-7,5}}{2500 \cdot 10^{-12}} = \frac{24}{25} \cdot 10^{-4-7,5-2+12} = 0,96 \cdot 10^{1,5} = 30,3.$$

С учетом рассчитанных значений составляющих уравнения (10) константа скорости процесса электрофлотации составит

$$k = \frac{3 \cdot q \cdot E}{4 \cdot R_n} = \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^{-4} \cdot 30,3}{4 \cdot 50 \cdot 10^{-6}} = 91 \text{ с}^{-1}.$$

Полученные данные способствуют более глубокому пониманию механизма процесса флотации и позволяют выявить факторы, влияющие на эффективность процесса извлечения нутового препарата при реализации глубокой переработки нута.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов П. И., Щеколдина Т.В., Слизская А.С. Современное состояние и структура мировых ресурсов растительного белка // Известия вузов. Пищевая технология. 2012. № 5-6. С. 7-10.
2. Толстогузов В.Б. Новые формы белковой пищи. М.: Агропромиздат, 1987. 303 с.
3. Бегеулов М.Ш. Основы переработки семян сои. М.: ДеЛиПринт, 2006. 181 с.
4. Пат. 2346456 Российская Федерация, МПК⁷ А23J1/14. Способ получения белкового изолята из нутового сырья / Н.В. Анিকেева; заявитель и патентообладатель: Анিকেева Н.В.; заявл. 07.06.2007; опубл. 20.02.2009. Бюл. № 5.
5. Пат. 2246226 Российская Федерация, МПК⁷ А23L1/20. Способ получения пищевого белка из нута / И.Ф. Горлов, А.З. Митрофанов, Л.Г. Сапожникова; заявитель и патентообладатель: «ГУ Волгоград-

ский научно-исследовательский технологический институт мясомолочного скотоводства и переработки продукции животноводства РАСХН»; заявл. 10.09.2003; опубл. 20.02.2005. Бюл. № 5.

6. Janson Henno V. Mike J. Lewis Electrochemical coagulation of whey protein // J. Soc. Dairy Technol. 1994. Vol. 47. № 3. P. 87-90.

7. Кисиленко П.Н., Колесников В.А., Капустин Ю.И. Извлечение белка из технологических растворов методом электрофлотации // Химическая промышленность. 2002. № 10. С. 19-22.

8. Разработка электрохимической технологии выделения пищевого белка из нута / Ю.А. Тырсин, И.Л. Казанцева, С.С. Попова, И.В. Тимофеев // Пищевая промышленность. Хранение и переработка сельхозсырья. 2014. № 6. С. 10-14.

9. Методы биохимического исследования растений / А.И. Ермаков, В.И. Араимович, М.И. Смирнова-Иконников и др. Л.: Колос, 1972. 456 с.

10. Реология в процессах и аппаратах химической промышленности / Н.В. Тябин, А.А. Мамаков, А.Б. Голованчиков, Г.Л. Дахина // Труды Волгоградского политехнического университета. Волгоград: Волгогр. политехн. ин-т, 1978.

11. Исследование кинетики процесса электрофлотации гидроксида кадмия / В.А. Колесников, Г.А. Кокарев, Е.А. Шалыт и др. // Электрохимия. 1989. № 9. С. 1265-1267.

12. Дерягин Б.В., Духин С.С., Рулев Н.Н. Микрофлотация. М.: Химия, 1986. 112 с.

13. Киреев В.А. Курс физической химии. М.: Химия, 1975. 776 с.

Попова Светлана Степановна –
доктор химических наук, профессор
кафедры «Химические технологии»
Энгельсского технологического института
(филиала) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Svetlana S. Popova –
Dr. Sc., Professor
Department of Chemical Engineering
Engels Technological Institute (branch)
of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Казанцева Ирина Леонидовна –
кандидат технических наук,
доцент, заведующий отделом
«Исследование материалов, веществ и изделий»
Федерального бюджетного учреждения
«Саратовская лаборатория судебной
экспертизы» Министерства юстиции России

Irina L. Kazantseva –
Ph.D., Associated Professor
Head of the Department Investigation of Materials,
Substances and Products
Federal Budget Institution «Saratov Laboratory
of forensic examination» Department of Justice
of Russia

Тимофеев Игорь Вячеславович –
аспирант
кафедры «Машины и аппараты нефтегазовых,
химических и пищевых производств»
Энгельсского технологического института
(филиала) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Igor V. Timofeev –
Postgraduate
Department of Machinery and Equipment of Oil
and Gas, Chemical and Food Industries
Engels Technological Institute (branch)
of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Седелкин Валентин Михайлович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Машины и аппараты нефтегазовых,
химических и пищевых производств»
Энгельсского технологического института
(филиала) СГТУ имени Гагарина Ю.А.

Valentin M. Sedelkin –
Dr. Sc., Professor
Department of Machinery and Equipment of Oil
and Gas, Chemical and Food Industries
Engels Technological Institute (branch)
of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Бутова Светлана Николаевна –
доктор биологических наук, профессор кафедры
«Биотехнология и технология продуктов
биоорганического синтеза»
Московского государственного
университета пищевых производств

Svetlana N. Butova –
Dr. Sc., Professor
Department of Biotechnology
and Bioorganic Synthesis Technology
Moscow State University of Food Production»

Статья поступила в редакцию 17.09.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 517.9

П.В. Купцов, А.В. Купцова**ФИЗИЧЕСКИ МОТИВИРОВАННЫЕ МОДЕЛИ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТЕЙ
НА ОСНОВЕ ОТОБРАЖЕНИЙ ИКЕДЫ**

Проанализированы известные из литературы формальные способы введения связей между отображениями Икеды и предложены три модели динамических сетей, допускающих реализацию в виде реальных физических систем. Ценность предложенных моделей в том, что результаты их теоретического исследования в отличие от формально построенных сетей заведомо можно будет проверить в эксперименте и найти им практические применения.

Сложные динамические сети, отображение Икеды, система Дуффинга, импульсное воздействие

P.V. Kuptsov, A.V. Kuptsova**PHYSICALLY MOTIVATED MODELS OF DYNAMICAL NETWORKS BASED
ON IKEDA MAPS**

The paper deals with analysis of the formal coupling schemes of Ikeda maps and presents three models of dynamical networks that can be implemented as real physical systems. These models are important for further theoretical studies since the expected results can obviously be verified experimentally and can be valuable for practical applications.

Complex dynamical networks, Ikeda map, Duffing oscillator, impulse action

В последнее время стало понятно, что сложные сети, т.е., состоящие из большого числа узлов с нетривиальной структурой связей, можно использовать в качестве моделей самых разных систем – от физических до биологических, социальных и экономических [1]. Существуют разные виды сложных сетей. Можно указать, например, случайные сети [1], сети с безмасштабной структурой (в английской литературе они называются scale-free networks) [2], маломировые сети (small-world networks) [3], географические сети [4].

Значительный интерес вызывают так называемые динамические сети, в узлах которых помещены динамические системы, взаимодействующие друг с другом по линиям связей сети [1, 5]. Большое количество работ посвящено изучению сложной динамики такого рода систем. Например, одной из наиболее важных задач является изучение различных форм синхронизации динамических сетей [1, 6-8]. В зависимости от топологии и свойств узловых осцилляторов синхронизация сети может быть полной или фазовой, захватывать всю сеть или приводить к формированию кластеров [5, 9, 10]. Ещё один вид синхронизации – так называемая опосредованная синхронизация (remote synchronization), изучается в [11, 12].

Известно, что даже простейшие сети, имеющие регулярную и однородную структуру связей, такие как, например, решётки связанных отображений, могут демонстрировать далеко нетривиальное поведение [13]. В случае же сложной топологии динамика может быть ещё более богатой. В работе [14] показано, что звездчатая структура связей между узлами приводит к очень сильной мультистабильности, а в [15] на примере безмасштабных сетей, базовыми «строительными» элементами которых являются звездчатые структуры, изучаются различные формы кластеризации и связанные с ней закономерности локализации так называемых ковариантных ляпуновских векторов [16].

При изучении сложной динамики нелинейных систем огромную роль играют канонические модели, которые строятся на основе физических систем посредством принятия определённых упрощающих предположений. В качестве примера можно привести систему Лоренца и логистическое отображение. Важность изучения таких упрощённых систем обусловлена универсальностью динамических сценариев. Известный детальный сценарий того или иного поведения, полученный для упрощённой системы, служит отправной точкой при исследовании более сложной реальной системы.

Аналогичный подход имеет смысл применять при изучении сложных динамических сетей. Очевидный шаг состоит в том, чтобы строить модельные сети, связывая между собой известные канонические осцилляторы. Однако проблема в том, что связь в уравнения может быть введена разными способами, и априори не ясно, существует ли хотя бы принципиальная возможность реализовать формально сконструированную связь в виде реальной физической системы. Цель данной работы состоит в том, чтобы выяснить, каким физическим системам отвечают некоторые изучаемые в литературе модели связанных систем, полученные формально. Важность этого состоит в том, что в результате мы получим канонические модели динамических сетей, заведомо имеющие физические аналоги. Очевидно, что дальнейшее исследование таких моделей будет иметь более высокую практическую ценность по сравнению с чисто формальными моделями.

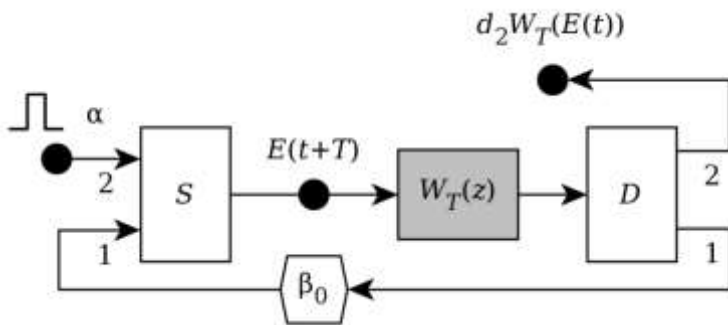


Рис. 1. Блок-схема системы Икеды

Рассмотрим так называемую систему Икеды, которая была впервые описана в [17, 18] как пример оптической системы, генерирующей хаос (см. рис. 1). На рисунке серой заливкой выделена нелинейная среда. Считая, что время прохождения излучения по системе значительно больше, чем характерное время отклика среды, её свойства можно задать комплексной функцией $W_T(z)$. Здесь индекс T обозначает время, необходимое излучению, чтобы пройти оптическую систему и вернуться через петлю обратной связи на вход.

Экспериментальная реализация этой системы описана в [19]. В качестве нелинейной среды в этой работе использовался отрезок одномодового оптоволокна.

Система Икеды работает следующим образом (рис. 1). Лазер накачки посылает импульсы с интервалом T и с амплитудой электрического поля α через сумматор S на нелинейную среду. Далее установлен делитель D , с коэффициентами деления амплитуды излучения d_1 и d_2 . Делитель необходим для того, чтобы осуществлять наблюдение за системой: с его входа 2 излучение поступает на регистрирующую аппаратуру. С выхода 1 делителя излучение проходит attenuator / усилитель с коэффициентом передачи β_0 . Значение этого коэффициента определяет глубину обратной связи. Затем излучение попадает на вход 1 сумматора S , где смешивается с очередным импульсом, что даёт очередное значение наблюдаемой динамической переменной $E(t+T)$. Таким образом, динамику системы можно описать следующим отображением:

$$E(t+T) = \alpha + W_T(E(t))d_1\beta_0 \tag{1}$$

В исходных работах Икеды и его соавторов [17-19] нелинейная среда в приближении быстрого отклика описывается функцией

$$W_T(z) = z \exp(i|z|^2 + \phi) \tag{2}$$

Таким образом, отображение Икеды можно записать в следующей форме:

$$z(t+1) = \alpha + \beta z(t) \exp\left(i\left(|z(t)|^2 + \phi\right)\right) \tag{3}$$

Здесь z обозначает перенормированную комплексную амплитуду электрического поля, время t нормировано так, чтобы интервал между импульсами был равен единице, ϕ – линейный набег фазы в резонаторе, α – нормированная амплитуда поля лазера накачки, $\beta \leq 1$ – вещественный параметр, характеризующий степень диссипации. При $\beta = 1$ система становится консервативной.

Позже, в работах [20, 21] была предложена модифицированная модель, в которой учитываются эффекты насыщения в среде, за которые отвечает дополнительный параметр γ :

$$W_T(z) = z \exp\left(i\left(\phi - \frac{\gamma}{1+|z|^2}\right)\right) \tag{4}$$

Соответствующее отображение имеет вид

$$z(t+1) = \alpha + \beta z(t) \exp \left(i \left(\phi - \frac{\gamma}{1 + |z(t)|^2} \right) \right). \quad (5)$$

Иногда в литературе оба эти отображения ошибочно называют отображением Икеды. Однако только (3) появляется в работах самого Икеды с соавторами. Отображение (5) получено по аналогии другими исследователями, и его корректно называть отображением Икеды – Хаммеля – Джонса-Молони.

В [22, 23] рассматривается система Икеды, в которой излучение, покидающее нелинейную среду, не возвращается через петлю обратной связи снова на вход, а направляется в другую систему, где смешиваясь с импульсом накачки, попадает на нелинейность. Положительная обратная связь в такой системе возникает за счёт того, что цепочка замкнута в кольцо – излучение из нелинейной среды последнего звена цепочки смешивается с накачкой первого элемента.

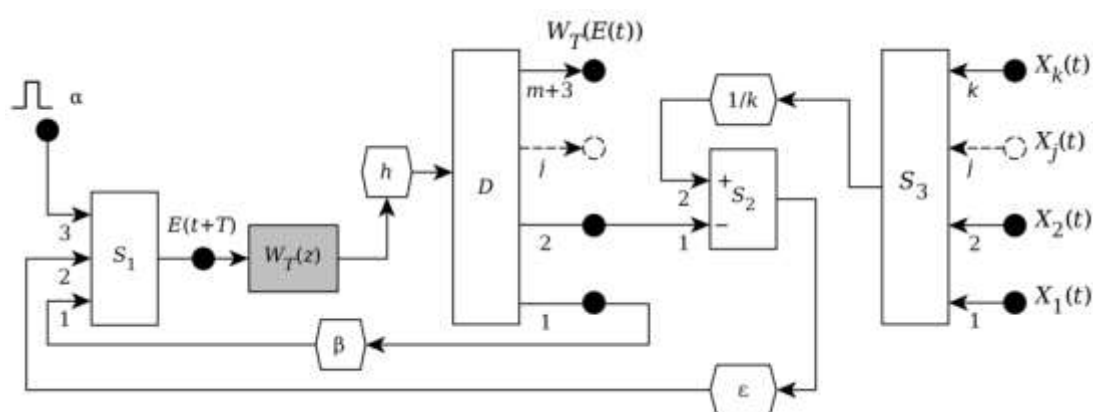


Рис. 2. Узел сети на основе оптических систем Икеды

Эту идею можно взять за основу для построения динамической сети. На рис. 2 показана блок-схема узла такой сети. Нелинейная среда выделена серой заливкой. Излучение складывается на сумматорах $S_{1,2,3}$. Вход 1 сумматора S_2 инвертирующий. Также используется делитель D , имеющий $m + 3$ выходов с одинаковыми коэффициентами деления. Здесь m – количество узлов сети, с которыми связан данный узел. Ослабление или усиление излучения осуществляются на аттенуаторах / усилителях, обозначенных шестиугольниками. Коэффициент передачи усилителя h подобран таким образом, чтобы на каждом выходе делителя D была восстановлена амплитуда излучения на выходе из нелинейной среды.

Лазер накачки создаёт импульсы с амплитудой α и периодом следования T , которые попадают в систему через вход номер 3 сумматора S_1 . Через другие входы этого сумматора в систему попадает излучение петли обратной связи, а также излучение от других узлов сети. Далее излучение проходит через нелинейную среду, а затем попадает на делитель D . Излучение с выхода 1 делителя через аттенуатор / усилитель β возвращается в систему через вход 1 сумматора S_1 . Излучение с выхода 2 делителя попадает на инвертирующий вход 1 сумматора S_2 , где смешивается с излучением от k соседних узлов сети и далее, через аттенуатор / усилитель ϵ , направляется на вход 2 сумматора S_1 . Выход 3 делителя предназначен для подключения регистрирующей аппаратуры, а оставшиеся m выходов направляют излучение данного узла на связанные с ним узлы сети. Таким образом, динамику этой системы можно описать следующим отображением:

$$E(t+T) = \alpha + W_T(E(t))\beta + \left(\left(\sum_{j=1}^k X_j \right) \frac{1}{k} - W_T(E(t)) \right) \epsilon. \quad (6)$$

Чтобы построить динамическую сеть на основе этого элемента, обозначим комплексную амплитуду поля в данном узле сети как $z_n(t) = E(t)$, где n – номер данного узла, и перенормируем вре-

мя так, чтобы интервал следования импульсов был равен единице. Хотя рассматриваемая схема допускает построение сети на основе ориентированного графа, когда связи от данного к соседним узлам и связи от соседних к данному могут не совпадать, мы ограничимся неориентированным, т.е. будем считать, что если узел i воздействует на узел j , то имеется также и обратное воздействие узла j на узел i . Тогда $k = m = k_n$, где k_n – количество связей узла с номером n . Пусть конфигурация связей задаётся матрицей связности \mathbf{A} . Так как мы рассматриваем сеть на основе неориентированного графа, эта матрица симметричная. Кроме того, ограничимся невзвешенными графами, т.е. величины всех связей равны друг другу. Тогда элементами матрицы \mathbf{A} будут единицы и нули, причём на главной диагонали всегда будут записаны нули. Элементы этой матрицы обозначим как a_{ij} . Тогда можно записать следующую систему связанных отображений:

$$z_n(t+1) = \alpha + \beta W_T(z_n(t)) + \varepsilon \left(\frac{1}{k_n} \sum_{j=1}^N a_{nj} W_T(z_j(t)) - W_T(z_n(t)) \right). \quad (7)$$

Здесь N – число узлов сети, а $W_T(z)$ задаётся формулой (2) или (4).

В уравнении (7) переменные, задействованные в связи, предварительно подвергаются нелинейному преобразованию функцией $W_T(z)$. С формальной точки зрения организация связи непосредственно через переменные $z_n(t)$ представляется более естественной. Теоретически такая форма связи отображений Икеды рассматривалась в [24]. Однако с точки зрения реализации в виде оптической системы это не так. Чтобы организовать связь непосредственно через $z_n(t)$, требуется параллельно с нелинейной средой включить линию задержки, которая, получая на вход порцию излучения перед нелинейной средой, передавала бы его в неизменной форме с задержкой T на сумматор S_1 . Очевидно, что такая система более сложна.

Тем не менее связь такого типа может быть реализована в виде радиофизической системы. В [25] показано, что отображение Икеды описывает динамику осциллятора с кубической нелинейностью, так называемый осциллятор Дуффинга, находящийся под действием последовательности δ -импульсов. Используя это, построим узел динамической сети, в которой связь включается одновременно с появлением очередного импульса. Блок-схема такой системы показана на рис. 3. Непосредственно система Дуффинга выделена серой заливкой. Реализацию этой системы в виде радиофизической системы можно найти, например, в [26].

Источник коротких импульсов P управляет электронным ключом K_1 , который замыкает цепь с интервалом T и подаёт на вход системы Дуффинга сигнал с сумматора S_1 , включающий постоянную составляющую α_0 и результирующий сигнал от других узлов сети. Выходными сигналами осциллятора Дуффинга являются вещественные переменные $x(t)$ и $y(t) \equiv \dot{x}(t)$. Так как действие δ -импульсов сводится к коррекции значения переменной $y(t)$, связь имеет смысл организовать также через эту переменную (но вообще говоря, точно так же можно было бы рассмотреть связь по $y(t)$). Сигнал $y(t)$ подаётся на делитель D , с одного из выходов которого он направляется на другие узлы сети, связанные с данным. С другого выхода сигнал подаётся на инвертирующий вход сумматора S_2 . На неинвертирующий вход этого сумматора подаётся суммарный сигнал от других узлов сети после его ослабления в k раз. Далее сигнал с выхода сумматора S_2 попадает на аттенуатор ε , а затем на вход системы через сумматор S_1 . Уравнение, соответствующее описываемой динамике, может быть записано в следующем виде:

$$\ddot{x}_n + g \dot{x}_n + \omega^2 x_n + q x_n^3 = \sum_{l=0}^{\infty} \left(\alpha_0 + \varepsilon \left(\frac{1}{k_n} \sum_{j=1}^N a_{nj} y_j - y_n \right) \right) \delta(t - lT). \quad (8)$$

Здесь нижний индекс у динамических переменных нумерует узлы сети, k_n – количество связей узла n с другими узлами, a_{nj} – элемент матрицы связности сети, наконец N – число элементов сети.

По аналогии с тем, как это сделано в [25], получим отображение Икеды для системы (8). В промежутке между импульсами правая часть уравнения превращается в ноль, и мы можем найти его приближённое решение, применив метод медленно меняющихся амплитуд. Далее учтём, что сразу после очередного δ -импульса координата $x(t)$ остаётся неизменной, а скорость $\dot{x}(t)$ получает добавку $\alpha_0 + \varepsilon \left(\sum_{j=1}^N a_{nj} y_j / k_n - y_n \right)$. Тогда состояние системы сразу после $(l+1)$ -го импульса можно найти таким образом (время перенормировано так, чтобы интервал между импульсами был равен 1):

$$z_n(t+1) = \alpha + \beta z_n(t) e^{i(|z_n(t)|^2 + \phi)} + \varepsilon \left(\frac{1}{k_n} \sum_{j=1}^N a_{nj} \operatorname{Re} z_j(t) - \operatorname{Re} z_n(t) \right). \quad (9)$$

Здесь

$$z_n = \sqrt{\frac{3q}{2\omega g} (1 - e^{-gT})} \left(i \frac{x_n}{2} + \frac{\dot{x}_n}{2\omega} \right), \quad \alpha = \frac{\alpha_0}{2\omega} \sqrt{\frac{3q}{2\omega g} (1 - e^{-gT})}, \quad \beta = e^{-gT/2}, \quad \phi = \omega T. \quad (10)$$

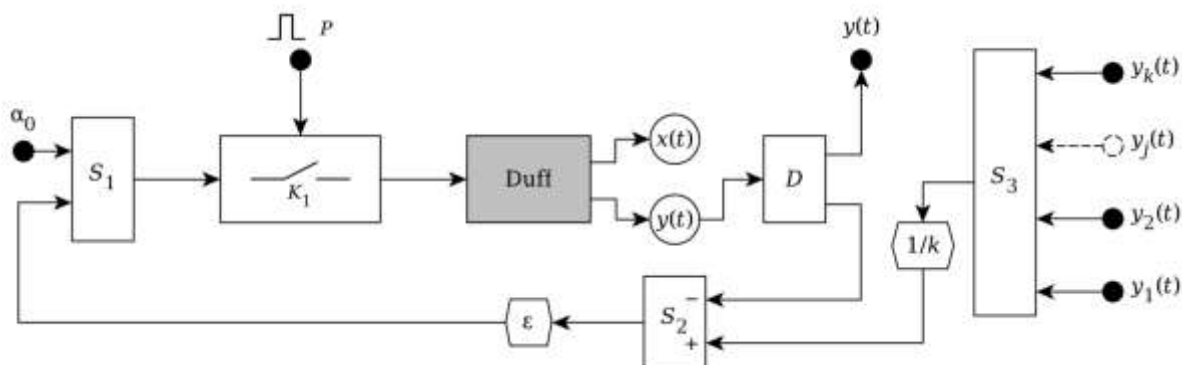


Рис. 3. Узел сети на основе осцилляторов Дуффинга под импульсным воздействием

Ещё один вид связи между системами Икеды рассматривается в теоретических работах [27, 28]. Здесь переменные связи добавляются к показателю экспоненты. Как обсуждалось выше, в случае оптической системы вид показателя экспоненты определяется свойствами нелинейной среды и допущениями, которые сделаны при её анализе. Поэтому такой вид связи следует отнести к параметрическому типу. При этом она должна быть ступенчатой, т.е. свойства нелинейной среды должны переключаться в зависимости от значений переменных связи только непосредственно в момент прихода очередного импульса. Реализация этого на основе оптических систем представляется затруднительной. Тем не менее существует, по меньшей мере, принципиальная возможность организовать связь такого типа на основе радиофизических систем Дуффинга.

Блок-схема узла сети показана на рис. 4. В отличие от предыдущего случая на рис. 3 здесь источник коротких импульсов P управляет сразу двумя электронными ключами. Ключ K_1 , как и раньше, управляет подключением постоянной компоненты воздействия α_0 . Вторым ключ K_2 управляет ступенчатой перестройкой параметров, отвечающих за собственную частоту системы Дуффинга. Вместе с приходом очередного импульса в зависимости от состояния переменных связи задаётся новое значение собственной частоты и оно сохраняется до прихода следующего импульса. Подобное поведение можно реализовать, дополнив систему Дуффинга цифровым блоком с запоминающим устройством.

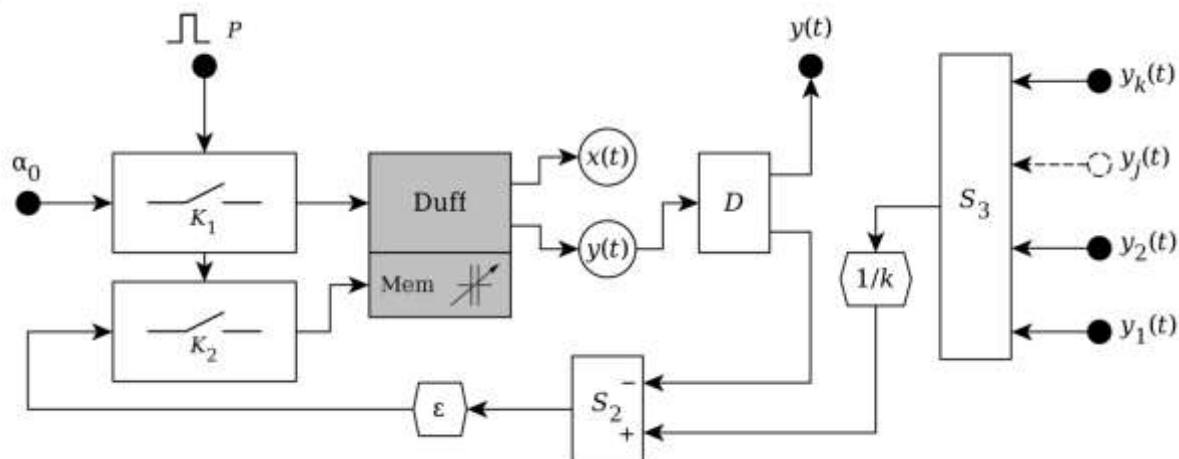


Рис. 4. Узел сети осцилляторов Дуффинга с параметрической ступенчатой связью

Уравнение, описывающее данную систему, имеет вид

$$\ddot{x}_n + g \dot{x}_n + (\omega^2 + V_n(t))x_n + q x_n^3 = \sum_{l=0}^{\infty} \alpha_0 \delta(t - lT). \quad (11)$$

Здесь $V_n(t)$ – ступенчатая функция, которая сохраняет своё значение между импульсами, а в момент появления очередного импульса принимает значение

$$V_n = \varepsilon_0 \left(\frac{1}{k_n} \sum_{j=1}^N a_{nj} y_j - y_n \right). \quad (12)$$

Проделав преобразования по аналогии с описанными выше, мы получим следующее отображение:

$$z_n(t+1) = \alpha + \beta z_n(t) \exp \left(i \left(|z_n(t)|^2 + \phi + \varepsilon \left(\frac{1}{k_n} \sum_{j=1}^N a_{nj} \operatorname{Re} z_j(t) - \operatorname{Re} z_n(t) \right) \right) \right). \quad (13)$$

Здесь $\varepsilon = T \varepsilon_0$ и остальные обозначения соответствуют (10).

Таким образом, мы рассмотрели три способа построения физически мотивированных моделей динамических сетей на основе отображений Икеды. Первая модель – уравнение (7) соответствует оптической системе, а две другие – уравнения (9) и (13) описывают связанные системы Дуффинга, находящиеся под действием δ -импульсов. Дальнейшее детальное изучение динамических свойств этих сетей представляется важным, так как полученные для них теоретические результаты могут с очевидностью быть проверены экспериментально и могут найти практические применения.

Работа частично поддержана грантом Президента РФ поддержки ведущих научных школ НШ-1726.2014.2.

ЛИТЕРАТУРА

1. Complex networks: Structure and dynamics / S. Boccaletti, V. Latora, Y. Moreno et al. // *Physics Reports*. 2006. Vol. 424. № 4-5. P. 175-308.
2. Barabási A.L., Albert R., Jeong H. Scale-free characteristics of random networks: the topology of the world-wide web // *Physica A*. 2000. Vol. 281. № 1-4. P. 69-77.
3. Watts D.J. *Small Worlds: The Dynamics of Networks between Order and Randomness*. Princeton: Princeton University Press, 2003. 280 p.
4. Barthelemy M., Gondran B., Guichard E. Spatial structure of the internet traffic // *Physica A*. 2003. Vol. 319. № 1. P. 633-642.
5. Wang X.F. Complex networks: topology, dynamics and synchronization // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2002. Vol. 12. № 5. P. 885-916.
6. Synchronization in complex networks / A. Arenas, A. Diaz-Guilera, J. Kurths, Y. Moreno, C. Zhou // *Physics Reports*. 2008. Vol. 469. № 3. P. 93-153.
7. Osipov G.V., Kurths J., Zhou C. *Synchronization in oscillatory networks*. Springer Science & Business Media, 2007.
8. Golubitsky M., Stewart I. Recent advances in symmetric and network dynamics // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 2015. Vol. 25. № 9. P. 097612.
9. Synchronization and graph topology / I. Belykh, M. Hasler, M. Lauret, H. Nijmeijer // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2005. Vol. 15. № 11. P. 3423-3433.
10. Arenas A., Diaz-Guilera A., Perez C.J. Vicente Synchronization Reveals Topological Scales in Complex Networks // *Phys. Rev. Lett.* Mar 2006. Vol. 96. P. 114102.
11. Remote synchronization in star networks / A. Bergner, M. Frasca, G. Sciuto et al. // *Phys. Rev. E*. Feb 2012. Vol. 85. P. 026208.
12. Analysis of remote synchronization in complex networks / L.V. Gambuzza, A. Cardillo, A. Fiasconaro et al. // *Chaos*. 2013. Vol. 23. P. 043103.
13. Kaneko K. Overview of coupled map lattices // *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*. 1992. Vol. 2. № 3. P. 279-282.
14. Kuptsov P.V., Kuptsova A.V. Wild multistability of star-like networks of Hénon maps // *arXiv:1505.05091*. 2015. P. 1-10.

15. Kuptsov P.V., Kuptsova A.V. Predictable nonwandering localization of covariant Lyapunov vectors and cluster synchronization in scale-free networks of chaotic maps // *Phys. Rev. E*. Sep 2014. Vol. 90. P. 032901.
16. Kuptsov P.V., Parlitz U. Theory and computation of covariant Lyapunov vectors // *Journal of nonlinear science*. 2012. Vol. 22. № 5. P. 727-762.
17. Ikeda K. Multiple-valued stationary state and its instability of the transmitted light by a ring cavity system // *Optics Communications*. 1979. Vol. 30. № 2. P. 257-261.
18. Ikeda K., Diado H., Akimoti O. Optical turbulence: Chaotic behavior of transmitted light from a ring cavity // *Physical Review Letters*. 1980. Vol. 45. № 9. P. 709-712.
19. Observation of Bifurcation to Chaos in an All-Optical Bistable System / H. Nakatsuka, S. Asaka, K. Itoh et al. // *Physical Review Letters*. 1983. Vol. 50. № 2. P. 109-112.
20. Moloney J.V. Coexistent attractors and new periodic cycles in a bistable ring cavity // *Optics Communications*. 1983. Vol. 48. № 6. P. 435-438.
21. Hammel S.M., Jones C.K.R.T., Moloney J.V. Global dynamical behavior of the optical field in a ring cavity // *JOSA B*. 1985. Vol. 2. № 4. P. 552-564.
22. Otsuka K., Ikeda K. Hierarchical multistability and cooperative flip-flop operation in a bistable optical system with distributed nonlinear elements // *Optics letters*. 1987. Vol. 12. № 8. P. 599-601.
23. Otsuka K., Ikeda K. Self-induced spatial disorder in a nonlinear optical system // *Physical Review Letters*. 1987. Vol. 59. № 2. P. 194.
24. Pal S. Spatiotemporal Dynamics of Coupled Ikeda Maps Over a Ring Network / S. Pal, S. Poria // *International Journal of Applied Mathematical Research*. 2012. Vol. 1. № 4. P. 383-390.
25. Кузнецов А.П., Тюрюкина Л.В. Динамические систем разных классов как модели нелинейного осциллятора с импульсным воздействием // *Известия вузов. ПНД*. 2000. Т. 8. № 2. С. 31-41.
26. Analog Simulation of the Dynamics of a van der Pol Oscillator Coupled to a Duffing Oscillator / J.C. Chedjou, H. B. Fotsin, P. Woafu, and S. Domngang // *IEEE Transactions on circuits and systems – I: Fundamental theory and applications*. 2001. Vol. 48. № 6. P. 748-757.
27. Lai Y.C. Unstable dimension variability and complexity in chaotic systems // *Physical Review E*. 1999. Vol. 59. № 4. P. R3807-R3810.
28. Harrison M.A., Lai Y.C. Bifurcation to high-dimensional chaos // *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2000. Vol. 10. № 6. P. 1471-1483.

Купцов Павел Владимирович –
доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры «Приборостроение»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel V. Kuptsov –
Dr. Sc., Professor
Department of Instrumentation Engendering
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Купцова Анна Викторовна –
кандидат физико-математических наук,
доцент кафедры «Приборостроение»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Anna V. Kuptsova –
Ph. D., Associated Professor
Department of Instrumentation Engendering
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 11.09.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 539.234

Д.В. Нефедов, С.Ю. Суздальцев, В.Я. Шаныгин, М.В. Самарский

ЖИДКОСТНОЕ И СВЧ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОЕ ТРАВЛЕНИЕ ПЛЕНОК SiO_x, ОСАЖДЕННЫХ В ПЛАЗМЕ ГАЗОВОГО РАЗРЯДА

Исследованы процессы жидкостного химического и плазменного травления пленок нестехиометрической окиси кремния, полученных в СВЧ плазме газового разряда. Уста-

новлено, что для полного удаления данных пленок необходимо применять последовательность жидкостного и плазменного травлений.

СВЧ плазма, тонкие пленки, окись кремния, жидкостное химическое травление, плазменное травление

D.V. Nefedov, S.Yu. Suzdaltsev, V.Ya. Shanigin, M.V. Samarskiy

LIQUID AND MICROWAVE PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF THE SiO_x FILMS DEPOSITED IN THE GAS DISCHARGE PLASMA

The research deals with the processes of the liquid chemical and plasma etching of non-stoichiometric silicone oxide films obtained in the microwave gas discharge plasma. To completely remove the given the films, it is necessary to utilize a step-by-step liquid and plasma etching procedure.

Microwave plasma, thin films, silicone oxide, liquid chemical etching, plasma etching

Актуальность. Применение автоэмиссионных катодов с высокой плотностью электронного тока способно улучшить характеристики электровакуумных приборов и дать дополнительное ускорение в развитии вакуумной микроэлектроники. Для получения высокой плотности тока необходимо увеличивать эффективность и концентрацию эмиссионных центров. Причем для исключения взаимного экранирования и снижения перегрева эмиссионных центров требуется создавать катоды с контролируемым распределением по поверхности. Эффективным путем распределения эмиссионных центров могут быть техпроцессы с использованием фотолитографии. Однако фотолитографические способы обработки могут существенно отличаться от стандартных для пленок из нестехиометрической окиси кремния (SiO_x), технологичного диэлектрика получаемого в СВЧ плазме газового разряда. Пленки SiO_x могут быть получены как методом резистивного испарения в вакууме порошка SiO [1], так и методами химического осаждения из газовой фазы (CVD), активированными плазмой из тетраэтилортосиликата, гексаметилдисилоксана или смеси моносилана с оксонитридом азота [2, 3], при этом значение x может варьироваться в диапазоне от 1 до 2. Так как пленки SiO_x являются менее распространенным материалом при изготовлении компонентов электроники, это приводит к необходимости адаптации имеющихся технологий к данному материалу [4]. Целью данной работы являлась отработка технологии травления нестехиометрической окиси кремния для создания автоэмиссионных катодных структур на основе имплантированного монокристаллического кремния при помощи фотолитографии.

Структура образца. В ходе выполнения работы были изготовлены образцы на подложках монокристаллического кремния имплантированного углеродом, показавшие способность к автоэлектронной эмиссии. На поверхность подложек последовательно осаждалась диэлектрическая пленка SiO_x и наносился фоторезист, в котором формировались окна 2×2 мкм (рис. 1). Из этих окон осуществлялось удаление диэлектрической пленки на всю ее толщину, так чтобы на дне окна открывалась эмитирующая подложка. На завершающем этапе фоторезистивная маска удалялась, и образец был готов для автоэмиссионных измерений.

Методика. В качестве подложек применялись пластины монокристаллического кремния размером 1×2 см. Поверхность пластин предварительно подвергалась имплантации ионами углерода с энергией 30 кэВ и с дозами 5×10^{17} ион/см² и 10^{18} ион/см² и без имплантации. На подложки подготовленного кремния осаждались пленки нестехиометрической окиси кремния SiO_x , полученного путем разложения паров тетраэтилортосиликата (ТЭОС, $\text{C}_8\text{H}_{20}\text{O}_4\text{Si}$) в СВЧ плазме газового разряда. Параметры процесса осаждения: температура подложки 200°C, смещающий потенциал на подложкодержателе –200 В, давление паров рабочего вещества 0,1 Па. Полученные пленки имели толщину 200-720 нм.

Позитивный фотолитографический процесс осуществлялся в установке экспозиции и совмещения МJB4. Использованный фотошаблон содержал рисунок, представляющий собой четыре области размером 4×4 мм, с окнами размером 2×2 мкм и расстоянием между окнами 5, 6, 7 и 8 мкм. Нанесение фоторезиста марки AZ 5214E осуществлялось в центрифуге при скорости вращения 4000 об/мин. Подсушивание проводилось при 80°C в течение 1 мин. Засветка фоторезиста УФ-излучением производилась через фотошаблон в контактном режиме, время экспозиции 1,4 с. Проявка в проявителе AZ

726MIF в течение 90 с. В результате происходили удаление фоторезиста из засвеченных областей и вскрытие окон согласно рисунку фотомаски.

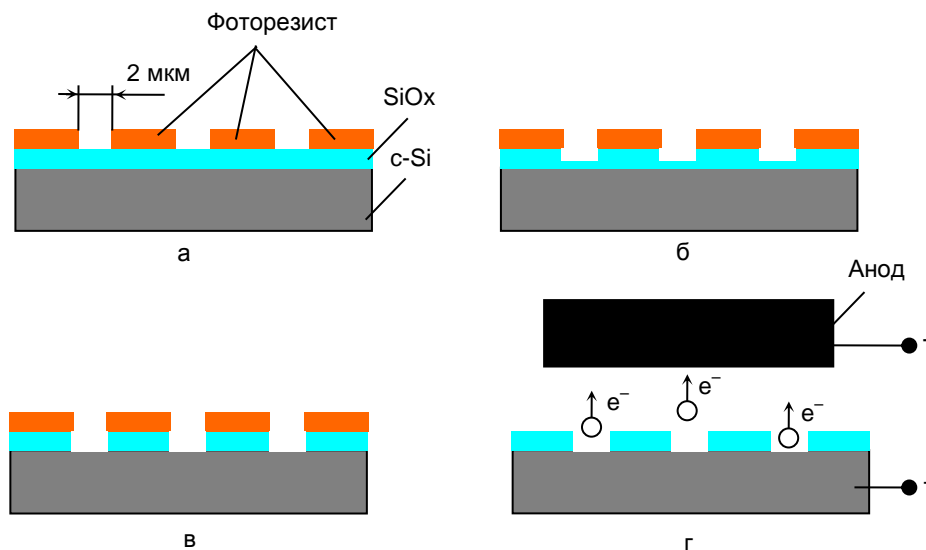


Рис. 1. Схематическое изображение образца на каждом этапе технологического маршрута: а – после фотолитографии и вскрытия окон в фоторезистивной маске; б – после жидкостного химического травления; в – после травления в плазме O₂; г – после удаления фоторезистивной маски, структура в схеме измерения автоэлектронной эмиссии

С целью удаления пленки SiO_x из вскрытых окон полученный образец подвергался жидкостному химическому травлению (ЖХТ). В качестве травящего состава применялся раствор плавиковой кислоты (HF) и фтористого аммония (NH₄F) в дистиллированной воде в пропорции 1:5:5. Температура ЖХТ 22(±1)°С. Данный раствор селективно взаимодействует с SiO – SiO₂ и не взаимодействует с монокристаллическим Si [5]. Окончательным этапом удаления остатков диэлектрической пленки из полученных окон являлся этап СВЧ плазмохимического травления (ПХТ) в кислородсодержащей плазме. В качестве кислородсодержащей газовой смеси использован осушенный воздух.

Качество всех вышеупомянутых процессов контролировалось с помощью оптического микроскопа Olympus MX51, оснащенного видеокамерой, и с помощью профилометра Dektak 150.

Жидкостное химическое травление. При проведении ЖХТ объем травящего состава HF:NH₄F:H₂O значительно превышал количество растворяемой пленки, использовалось непрерывное перемешивание и для каждого образца использовалась свежая порция раствора, что поддерживало химическую активность травящего состава на необходимом уровне. После травления измерялась толщина пленки и рассчитывалась средняя скорость травления за весь интервал проведения процесса ЖХТ.

Для определения динамики травления пленки SiO_x осуществлялась выдержка образцов в травящем растворе от 0,5 до 6 мин. На рис. 2 показана зависимость изменения толщины (Δh) пленок SiO_x с исходной толщиной 560±15 нм в растворе HF:NH₄F:H₂O от продолжительности процесса ЖХТ.

Как видно из рис. 2, максимальное изменение толщины пленки отмечено для первых минут процесса, далее с увеличением продолжительности травления изменения толщины не происходит, процесс ЖХТ останавливается. Если не учитывать обнаруженную особенность пленок нестехиометрической окиси кремния SiO_x, полученных в СВЧ плазме газового разряда, то при практическом применении таких пленок в литографических процессах это приведет к чрезмерному анизотропному подтраву под фоторезистивную маску и существенно исказит требуемую топологию.

При рассмотренных условиях использование ЖХТ оказалось малоэффективно для полного удаления пленки диэлектрика из SiO_x при разработке микроразмерных техпроцессов с фотолитографией.

СВЧ плазменное травление в кислородсодержащей плазме. Скорость травления, измеренная нами после ПХТ исходных (не подвергнутых ЖХТ) пленок SiO_x толщиной от 200 до 470 нм, составила 1,5 нм/мин. Режим плазменного травления: продолжительность 10 мин, потенциал на подложкодержателе –100 V, давление плазмообразующего газа 0,1 Па. Изменение продолжительности обработки и величины прикладываемого к подложке электрического потенциала (от –100 до –300 V) не оказало заметного влияния на скорость травления.

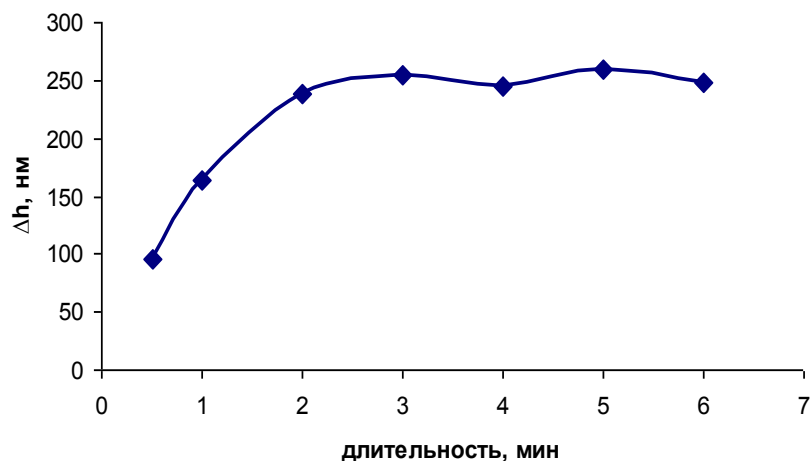
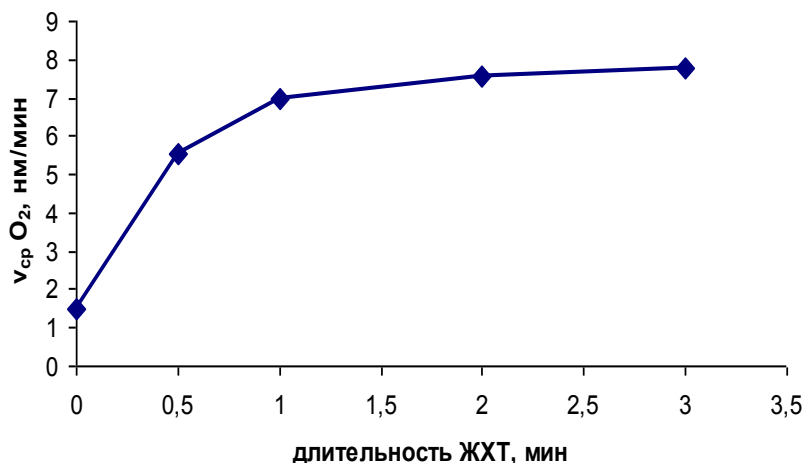


Рис. 2. Зависимость изменения толщины пленки от длительности процесса ЖХТ

На рис. 3 приведены значения средней скорости СВЧ ПХТ пленок толщиной 200-470 нм, не подвергавшихся ЖХТ (в нуле по оси X) и после ЖХТ продолжительностью от 0,5 до 3 мин.

Рис. 3. Изменение средней скорости СВЧ плазменного травления SiO_x пленки при различной длительности предварительного ЖХТ

Несмотря на то, что кислородсодержащая плазма оказывает слабое травящее воздействие на исходную пленку SiO_x , обнаружено, что она эффективно удаляет такую же пленку, но подвергнутую ЖХТ. Скорость травления в плазме для исходной пленки составляет около 1,5 нм/мин, а после обработки ЖХТ в 5 раз выше, около 8 нм/мин. Очевидно, что воздействие травящего раствора при ЖХТ на материал пленки SiO_x делает материал более восприимчивым к ионно-плазменной обработке в среде кислорода, причем избыточная продолжительность ЖХТ не приводит к дальнейшему улучшению эффективности ПХТ. Так, обработка пленок толщиной 200-470 нм методом ЖХТ в течение более 1,5 мин не изменила скорость ПХТ.

Обнаружено, что при ПХТ пленок после ЖХТ эффективность травления существенно возрастает с увеличением электрического потенциала, приложенного к подложке (рис. 4).

В случае использования подложек с различной дозой ионной имплантации монокремния углеродом скорость ПХТ возрастает с увеличением дозы и, соответственно, поверхностной электропроводности подложки.

Эксперименты по плазменному травлению пленок исходной толщины 200-720 нм после ЖХТ показали, что толщина пленки не оказывает влияния на скорость травления. Это создаёт удобства для расчета глубины протравки пленки при ПХТ и позволяет варьировать значения электрического потенциала и продолжительности процесса травления.

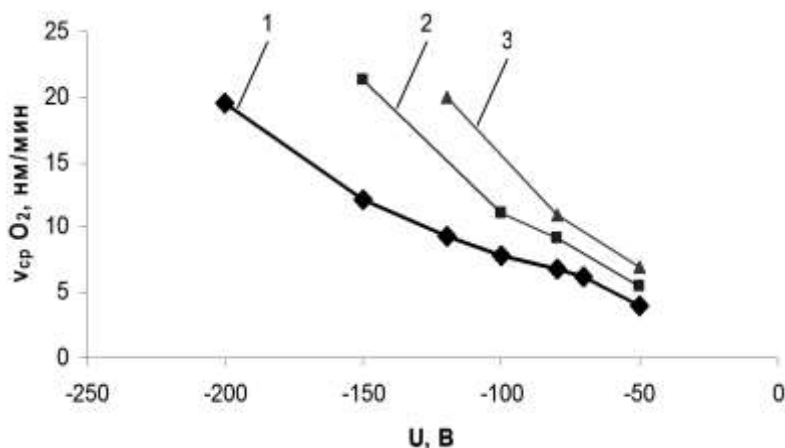


Рис. 4. Влияние электрического потенциала, приложенного к подложке, на скорость травления в кислородсодержащей плазме пленок SiO_x после ЖХТ. Пленки осаждены на подложки монокристаллического кремния без имплантации (1) и с дозами имплантации углерода 5·10¹⁷ ион/см² (2), 10¹⁸ ион/см² (3)

Заключение. Нами показано, что для пленок нестехиометрической окиси кремния SiO_x, полученных путем разложения ТЭОС в СВЧ плазме, неэффективно раздельное использование ЖХТ в HF:NH₄F:H₂O или СВЧ ПХТ в воздушной плазме. Однако при комбинации этих способов, т.е. при последовательном ЖХТ и плазменном травлении, пленки пригодны для создания распределенных объектов при помощи фотолитографии. Определено, что для корректного перенесения рисунка с фотошаблона на пленку SiO_x толщиной менее 470 нм при формировании отверстий с нарушением геометрии менее 10 % продолжительность ЖХТ должна быть от 1 до 1,5 мин. Скорость ПХТ в воздушной плазме для обработанной ЖХТ пленки на подложке из неимплантированного кремния составит 20 нм/мин при потенциале –200 В.

При выполнении работы было задействовано оборудование «Объединенной научно-исследовательской лаборатории СГУ-ИРЭ».

ЛИТЕРАТУРА

1. Исследование нанокристаллов кремния в слоях субоксида кремния методом комбинационно-го рассеяния света / Н.Е. Маслова, А.А. Антоновский, Д.М. Жигунов и др. // ФТП. 2010. Т. 44. в. 8. С. 1074-1077.
2. Borer B.U. SiO_x Thin Film Deposition on Particles by Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition in a Circulating Fluidized Bed Reactor: Diss. ETH № 16183 / B.U. Borer. Swiss Federal Institute of Technology Zurich. Switzerland, 2005. P. 125.
3. Silicon nanocluster crystallization in SiO_x films studied by Raman scattering / S. Hernández, A. Martínez, P. Pellegrino et al. // Journal of Applied Physics. 2008. 104, 044304.
4. Травление пленок на основе SiO_x, полученных в СВЧ плазме газового разряда / Д.В. Нефедов, С.Ю. Суздальцев, В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // Нанoeлектроника, нанoфотоника и нелинейная физика: тез. докл. X Всерос. конф. молодых ученых / СФ ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН. Саратов, 2015. С. 111-112.
5. Кривошеева А.Н., Лучинин В.В. Процессы жидкостного химического травления в технологии микросистем: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. 118 с.

Нефедов Денис Владимирович – кандидат технических наук, научный сотрудник Саратовского филиала Института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН

Denis V. Nefedov – Ph. D., Research Assistant Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS Saratov branch

Суздальцев Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Саратовского филиала Института радиоэлектроники им. В.А. Котельникова РАН

Sergey Yu. Suzdaltsev – Ph. D., Senior Research Assistant Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics of RAS Saratov branch

Шаныгин Виталий Яковлевич –
старший инженер Саратовского филиала
Института радиоэлектроники
им. В.А. Котельникова РАН

Vitalii Ya. Shanygin –
Senior Engineer
Kotel'nikov Institute of Radioengineering
and Electronics of RAS Saratov branch

Самарский Михаил Владимирович –
старший инженер Саратовского филиала
Института радиоэлектроники
им. В.А. Котельникова РАН

Mikhail V. Samarskiy –
Senior Engineer
Kotel'nikov Institute of Radioengineering
and Electronics of RAS Saratov branch

Статья поступила в редакцию 17.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 544.032. 52, 51-71

С.П. Романчук, Ю.В. Клинаев, Д.В. Терин, С.А. Корчагин

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ НЕЛИНЕЙНЫХ СВОЙСТВ ГЕТЕРОГЕННЫХ СРЕД

Проведено компьютерное моделирование многокомпонентных гетерогенных сред. Исследованы частотные зависимости диэлектрической проницаемости матричных композитов с неоднородными включениями в форме сфер и цилиндров. Расчеты проведены при помощи разработанного программного комплекса.

Гетерогенные среды, композитные материалы, математическое моделирование

S.P. Romanchuk, Yu.V. Klinaev, D.V. Terin, S.A. Korchagin

MATHEMATICAL MODELING AND MULTICRITERION ANALYSIS OF THE NONLINEAR PROPERTIES OF THE HETEROGENEOUS MEDIA

The modeling of nonlinear properties of multicomponent heterogeneous mediums. Investigated the frequency dependence of the dielectric constant of the matrix composites with heterogeneous inclusions in the form of spheres and cylinders. The calculations were performed using the developed software.

Heterogeneous mediums, composite materials, mathematical modeling

Введение. Развитие физики наноструктур позволило проектировать новые функциональные композитные материалы с заданными физико-химическими свойствами. Особенностью сред с включениями наночастиц является возможность создания композитного материала, характеристики которого кардинально отличаются от компонент в него входящих. В связи с этим математическое моделирование и анализ свойств гетерогенных сред приобретают особую актуальность.

Модели многокомпонентных гетерогенных сред. В данной работе проведено исследование взаимодействия внешнего электромагнитного поля с гетерогенными многокомпонентными средами различной конфигурации (рис. 1). Первый тип композита (рис. 1 а) представлен смесью проводящих сфер и проводящих цилиндров в диэлектрической матрице, второй тип (рис. 1 б) – смесью неоднородных сфер (сферическая частица в оболочке) и проводящих цилиндров в диэлектрической матрице, третий (рис. 1 в) – проводящие сферы и неоднородные цилиндры (цилиндр в оболочке) в диэлектрике и четвертый тип композита (рис. 1 г) – неоднородные сферы и неоднородные цилиндры в диэлектрической матрице.

Все рассматриваемые модели относятся к так называемым матричным структурам, т.е. среда представлена непрерывной матрицей, в которой взвешены (хаотически или ориентированно) включения в отличие от статистических смесей, где все компоненты являются равноправными. Для определения эффективных параметров композита на основе известных параметров (геометрическая форма, концентрация, ориентация в пространстве) компонент зачастую используют приближение Максвелла – Гарнетта [1] и теорию эффективной среды Бруггемана [2]. В ряде случаев прибегают к использованию модификаций, например формула Максвелла – Гарнетта – Силларса [3] или применяют формулы других авторов (Лоренц – Лорентца – Клаузиаса – Моссоти, Лихтенекера, Винера, Вагнера, Рэля, Ландау, Бетхера и др. [4, 5]). Для указанных моделей ограничением для применения служит размер включений, который должен быть много меньше длины волны внешнего электромагнитного излучения. Применение формулы Максвелла – Гарнетта (1) ограничено рассмотрением сред матричного вида, для которых концентрация включений не более 1/3 всего объема композита, т.к. в ином случае теряется смысл непрерывной среды, окружающей частицу. В случае статистической смеси (концентрация от 1/3 до 2/3 объема) применяют теорию эффективной среды Бруггемана и её модификации.

Для определения эффективных параметров среды необходимо связать электрическую индукцию $\langle D \rangle$, усредненную по объёму V , и величину напряженности внешнего электрического поля E_0 [5]:

$$\langle D \rangle = \frac{1}{V} \int_V D(r) dr = \frac{1}{V} \int_V \epsilon(r) E(r). \quad (1)$$

Здесь $D(r)$, $E(r)$ и $\epsilon(r)$ локальные значения электрической индукции, напряженности электрического поля и диэлектрической проницаемости. Данная связь и определяет эффективную диэлектрическую проницаемость гетерогенной среды: $\langle D \rangle = \epsilon_{eff} E_0$. Локальное поле $E(r)$ зависит от формы частиц и их взаимодействия между собой.

Модель Максвелла – Гарнетта для матричной среды с включениями в форме сфер выражается

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_2}{\epsilon_{eff} + 2\epsilon_2} = v \frac{\epsilon_1 - \epsilon_2}{\epsilon_1 + 2\epsilon_2}, \quad (2)$$

где ϵ_{eff} – эффективная диэлектрическая проницаемость нанокompозита, ϵ_1 – диэлектрическая проницаемость матрицы, ϵ_2 – диэлектрическая проницаемость частиц включений, v – объемная доля включений.

Для композитов, состоящих из цилиндров, окруженных непрерывной матрицей, можно использовать обобщенную модель Максвелла – Гарнетта с учетом фактора деполяризации [6]:

$$\frac{\epsilon_{eff} - \epsilon_2}{L_{1,2}(\epsilon_{eff} - \epsilon_2) + \epsilon_2} = v_1 \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{\epsilon_2 + L_{1,2}(\epsilon_1 - \epsilon_2)}, \quad (3)$$

где $L_{1,2}$ – фактор деполяризации для поля направленного вдоль оси вращения и перпендикулярно оси вращения.

Если в качестве матрицы используется диэлектрик с проводящими включениями, возникает необходимость сначала провести расчет частотной зависимости диэлектрической проницаемости для смеси с сферами используя модель (2).

Полученный результат является набором входных данных для модели (3) в качестве числовых значений диэлектрической проницаемости матрицы. Для частиц в оболочке применяется аналогичный подход.

Таким образом, для включений с любым количеством слоёв, можно использовать формулу (2) [7].

Для проведения компьютерного моделирования и анализа свойств многокомпонентных сред разработан проблемно-ориентированный программный комплекс «Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств композиционных материалов на основе эффективной среды» [8].

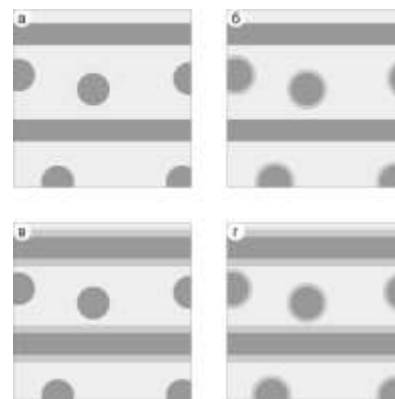


Рис. 1. Модели гетерогенных многокомпонентных сред

В ходе создания комплекса разработаны программные модели Максвелла – Гарнетта, Бруггемана, Лоренц – Лорентца, Лихтенекера, Рэлея и другие. Также разработан функционал для конфигурирования гетерогенных сред различной морфологии, что позволяет провести численные расчеты для рассматриваемых в данной работе композитов. Значения диэлектрической проницаемости веществ загружены в базу данных программного комплекса из источника [9].

На рис. 2 изображены графики зависимости эффективной диэлектрической проницаемости, реальной и мнимой части соответственно, матричной гетерогенной среды с включениями в форме сфер и цилиндров, матрица – Si, включения – Al, объемная доля включений составляет десятую часть композита, радиусы сфер и цилиндров – 10 нм. На изображениях присутствует явное различие зависимости диэлектрической проницаемости композита при хаотическом и ориентированном расположении цилиндров относительно вектора внешнего поля.

Графики на рис. 3 также указывают на зависимость диэлектрической проницаемости от ориентации цилиндров, матрица с включениями в форме сфер, покрытыми оболочкой, и цилиндров, матрица – Si, включения – Al, оболочка – SiO₂, объемная доля включений составляет десятую часть композита, радиусы сфер и цилиндров 10 нм, ширина оболочки 3 нм.

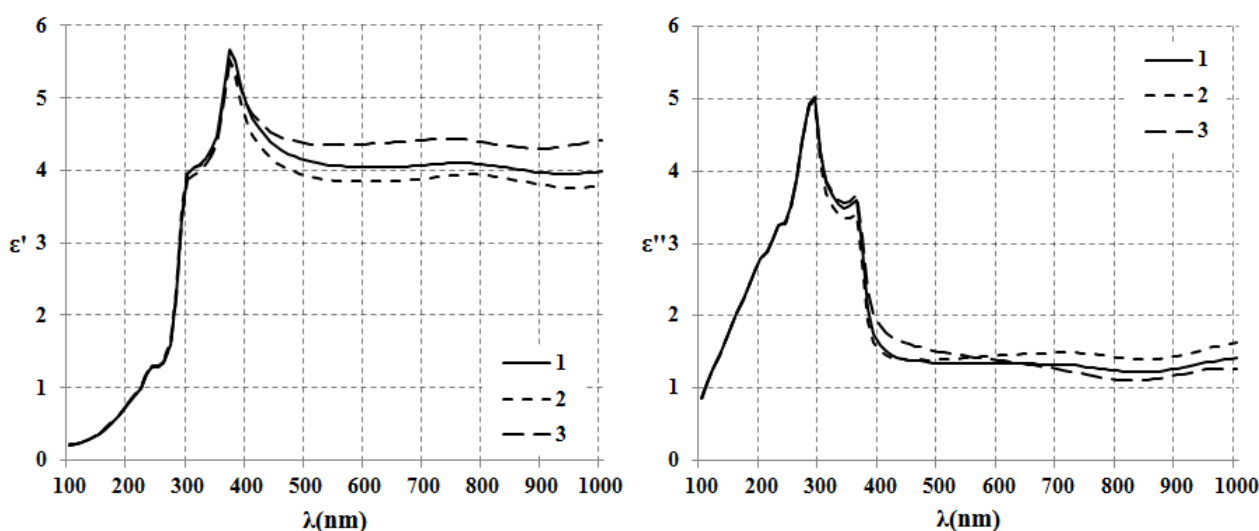


Рис. 2. Влияние ориентации цилиндров в матрице на диэлектрическую проницаемость среды, сферы и цилиндры без оболочек:
 1 – хаотическое расположение; 2 – ориентированы вдоль вектора поля;
 3 – ориентированы нормально вектору поля

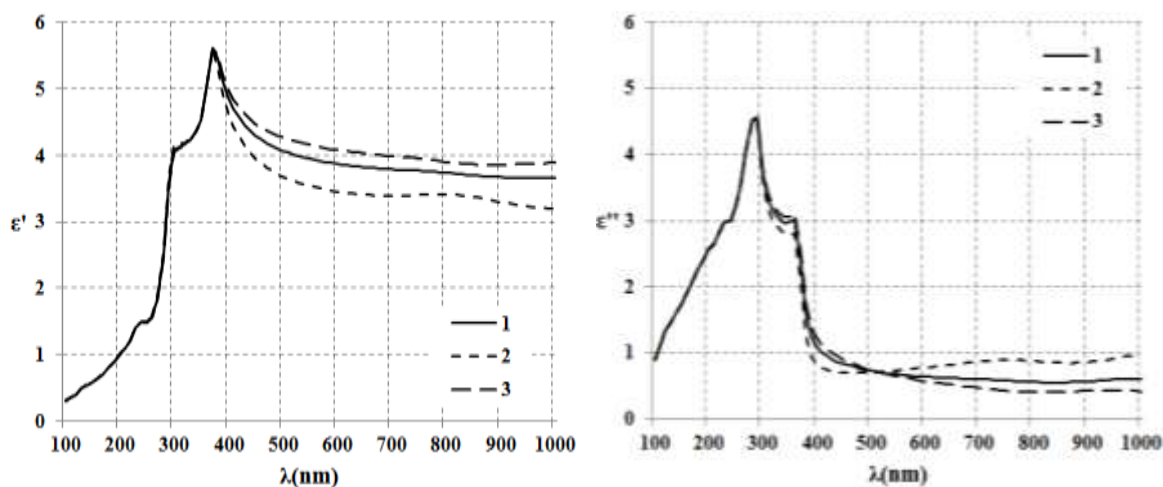


Рис. 3. Влияние ориентации цилиндров в матрице на диэлектрическую проницаемость среды, сферы, покрытые оболочками, и цилиндры: 1 – хаотическое расположение; 2 – ориентированы вдоль вектора поля; 3 – ориентированы нормально вектору поля

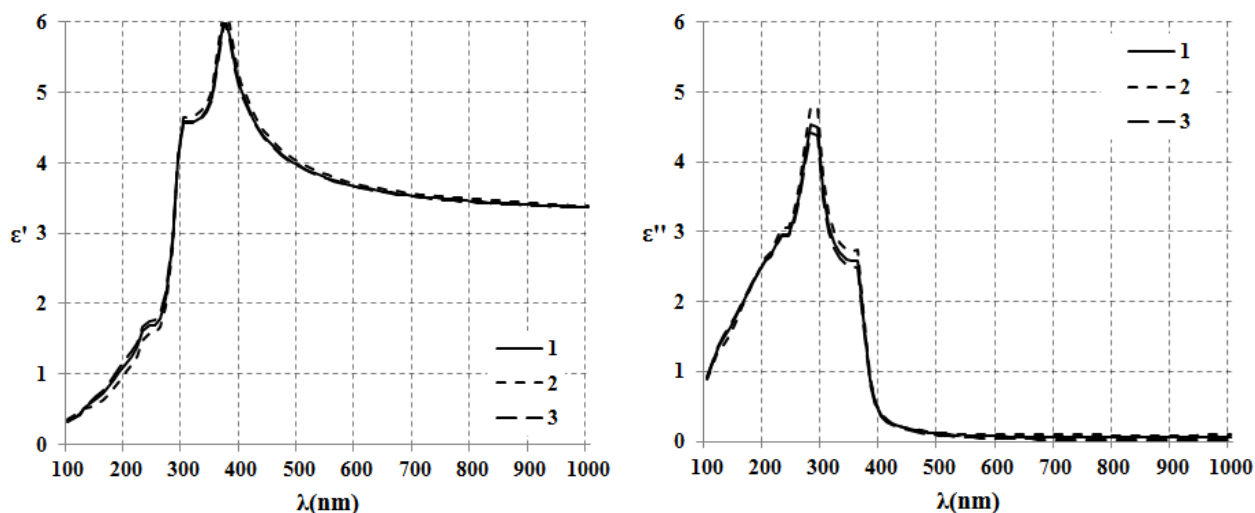


Рис. 4. Влияние ориентации цилиндров в матрице на диэлектрическую проницаемость среды, цилиндры, покрытые оболочками, и сферы: 1 – хаотическое расположение; 2 – ориентированы вдоль вектора поля; 3 – ориентированы нормально вектору поля

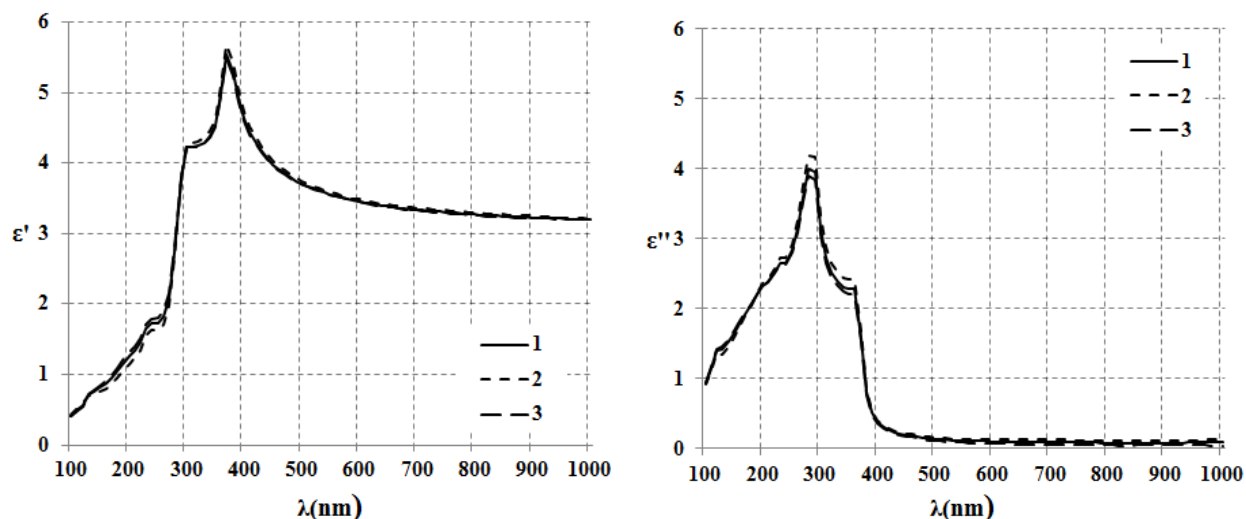


Рис. 5. Влияние ориентации цилиндров в матрице на диэлектрическую проницаемость среды, сферы и цилиндр, покрытые оболочками: 1 – хаотическое расположение; 2 – ориентированы вдоль вектора поля; 3 – ориентированы нормально вектору поля

Модель композита с частицами сферической формы и цилиндров, покрытых оболочками (цилиндры покрыты оболочкой (рис. 4), цилиндры и сферы покрыты оболочками (рис. 5) демонстрирует практически полное отсутствие влияния ориентации частиц в матрице на эффективные характеристики, матрица – Si, включения – Al, оболочка – SiO₂, объемная доля включений составляет десятую часть композита, радиусы сфер и цилиндров – 10 нм, ширина оболочки сферы – 3 нм, цилиндра – 1 нм.

Заключение. В данной работе получены частотные зависимости комплексной диэлектрической проницаемости гетерогенных многокомпонентных сред, состоящих из матрицы и включений в форме сфер и цилиндров, покрытых оболочкой. Показано, что изменение морфологической конфигурации гетерогенной среды значительно влияет на эффективные характеристики. Все расчеты проведены с использованием разработанного авторами программного комплекса «Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств композиционных материалов на основе эффективной среды».

ЛИТЕРАТУРА

1. Maxwell-Garnett J.C. Philos. Trans. R. Soc. London 203 385 (1904).
2. Bruggeman D A G Ann. Phys. (Leipzig) 24 636 (1935).
3. Fannin P.C., Marin C.N., Malaescu I., Stefu N. // J. Physics: Condensed Matter. 2007. Vol. 19. № 3. P. 036 104.
4. Челидзе Т.Л., Деревянко А.И., Кириленко О.Д. Электрическая спектроскопия гетерогенных систем. Киев: Наукова думка, 1977. 230 с.
5. Виноградов А.П., Дорофеенко А.В., Зухди С. К вопросу об эффективных параметрах метаматериалов // Успехи физических наук. 2008. Т. 178. № 5. С. 511-518.
6. Головань Л.А., Тимошенко В.Ю., Кашкаров П.К. Оптические свойства нанокompозитов на основе пористых систем // Успехи физических наук. 2007. Т. 177 № 6. С. 619-638.
7. Высокочастотный нагрев в электрическом поле / А.В. Нетушил и др. М.: Высш. шк., 1961.
8. Программный комплекс «Математическое моделирование и многокритериальный анализ нелинейных свойств композиционных материалов на основе моделей эффективной среды»: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2014615533 РФ / С.П. Романчук, Д.В. Терин; заявитель и патентообладатель Романчук Сергей Петрович, Терин Денис Владимирович. № 2014612918/69; заявл. 02.04.2014; зарегистр. 28.05.2014. [1] с.
9. Palik E.D. Handbook of Optical Constants of Solids. Academic, San Diego, CA 1985.

Романчук Сергей Петрович – ассистент кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey P. Romanchuk – Assistant
Department of Technical Physics and Information Technologies Engels Institute of Technology – Branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Клинаев Юрий Васильевич – доктор физико-математических наук, профессор кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri V. Klinaev – Dr. Sc., Professor
Department of Technical Physics and Information Technologies Engels Institute of Technology – Branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Терин Денис Владимирович – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Denis V. Terin – Ph.D., Associate Professor
Department of Technical Physics and Information Technologies Engels Institute of Technology – Branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Корчагин Сергей Алексеевич – аспирант кафедры «Техническая физика и информационные технологии» Энгельсского технологического института (филиала) Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Korchagin – Postgraduate
Department of Technical Physics and Information Technologies, Engels Institute of Technology – Branch of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 53.082.9+616.9

А.Н. Спицын, Д.В. Уткин, В.Г. Германчук, В.Е. Куклев

**ОПТИЧЕСКИЕ БИОСЕНСОРЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ
В ИНДИКАЦИИ ВОЗБУДИТЕЛЕЙ ИНФЕКЦИОННЫХ БОЛЕЗНЕЙ**

В обзоре представлены функциональные характеристики основных типов оптических биосенсоров: основанных на эффекте поверхностно-плазмонного резонанса, волоконно-оптических и колориметрических. Приведены примеры использования оптических биосенсоров для детекции патогенных биологических агентов в объектах окружающей среды.

Оптический биосенсор, индикация, инфекционные болезни, патогенные биологические агенты

A.N. Spitsyn, D.V. Utkin, V.E. Kouklev, V.G. Germanchuk

**OPTICAL BIOSENSORS: CURRENT STATE IN INDICATING PATHOGENIC
ORGANISMS OF INFECTIOUS DISEASES**

The overview presents the functional characteristics of the main types of biosensors, including those based on the surface plasmon resonance (SPR), fiber-optic and colorimetric effects. The provided examples demonstrate the application of optical biosensors for detection of pathogenic biological agents in environmental objects.

Optical biosensor, indication, infectious diseases, pathogenic biological agents

Индикация патогенных биологических агентов (ПБА) представляет собой комплекс мероприятий, направленных на обнаружение на объектах окружающей среды (воздух, вода, почва, поверхности сооружений и предметов) микроорганизмов, патогенных для людей и животных [1].

Неспецифическая индикация позволяет установить факт применения биологических средств без определения видовой принадлежности возбудителя. Специфическая индикация включает комплекс специальных организационных и диагностических мероприятий с целью подтверждения факта применения или выброса биологических агентов на биологически опасных объектах с определением вида ПБА [4]. При проведении специфической индикации используют молекулярно-генетические методы (полимеразную цепную реакцию (ПЦР)) и иммунологические методы (метод флуоресцирующих антител (МФА), иммуноферментный анализ (ИФА), реакцию непрямой гемагглютинации (РНГА), иммунохроматографический анализ (ИХА)). Чувствительность ПЦР составляет $1 \cdot 10^2$ - $1 \cdot 10^3$ м.к./мл, МФА – $1 \cdot 10^5$ - $1 \cdot 10^6$ м.к./мл, ИФА – $1 \cdot 10^5$ м.к./мл, РНГА – $1 \cdot 10^5$ 01· 10^6 м.к./мл, ИХА – $1 \cdot 10^6$ - $1 \cdot 10^7$ м.к./мл, а специфичность методов приближается к 100% [4]. Предварительные результаты специфической индикации могут быть получены через 2-8 ч при использовании МФА, ИФА, РНГА, ИХА и 3-4 ч при постановке ПЦР [4, 5].

Определяющим фактором быстрого реагирования на угрозу распространения возбудителей инфекционных болезней в результате применения биологических средств или при чрезвычайных ситуациях природного или техногенного характера и обеспечения защиты населения страны и окружающей среды является необходимость проведения индикации возбудителей в максимально сжатые сроки (от нескольких минут до 1 ч). В связи с этим разработка экспрессных средств индикации, обладающих высокой чувствительностью и специфичностью, является актуальной задачей.

Одними из возможных средств экспрессной индикации патогенов являются оптические биосенсоры. Принцип действия оптических биосенсоров основан на регистрации изменений оптических свойств измеряемой среды (оптической плотности, цвета, мутности, показателя преломления и других свойств) в результате присутствия биологического агента.

В настоящее время широкое развитие получили оптические биосенсоры, основанные на эффекте поверхностного плазмонного резонанса – ППР (англ. surface plasmon resonance (SPR)), открытом в 60-х гг. XX века [6]. ППР возникает на границе раздела оптических сред с различными коэффициентами преломления при условии выполнения полного внутреннего отражения падающего света. Данная технология определения изменений показателя преломления позволяет осуществлять регистра-

цию межмолекулярных взаимодействий в реальном масштабе времени без использования различных меток или сопряженных процессов [7]. В ППР биосенсорах биологический рецептор иммобилизован на сенсорной поверхности таким образом, чтобы минимизировать неспецифические связывания к поверхности и исключить влияние собственной биологической функции. Наиболее широко используемой трехмерной матрицей для иммобилизации молекул в структурированной среде является карбоксиметилированный декстран. Для двумерной (поверхностной) иммобилизации биологических рецепторов к чувствительной, чаще всего, золотой поверхности широко используют самособирающиеся монослои (англ. self-assembled monolayers, SAM) алкантиолов и дисульфидов [12].

Наиболее часто используемыми форматами выявления биологических веществ, применяемыми в ППР сенсорах, являются: прямой, «сэндвич», конкурентный и ингибирующий варианты детекции. В режиме прямой детекции биологический рецептор (например, антитело) иммобилизован на поверхности ППР сенсора, а исследуемое вещество в растворе связывается с ним, приводя к изменению показателя коэффициента преломления поверхности сенсора. Специфичность и чувствительность метода могут быть повышены при использовании «сэндвич» варианта детекции, в котором сенсорная поверхность с захваченным аналитом инкубируется со вторичными антителами. Небольшие аналиты (молекулярный вес <5 кДа) часто не генерируют значительное изменение в показателе преломления и по этой причине измеряются с помощью конкурирующего или ингибирующего варианта детекции. В конкурирующем варианте чувствительная поверхность покрыта антителами, взаимодействующими с исследуемым веществом; когда конъюгированный аналит добавляется к пробе, исследуемое вещество и его конъюгированный аналог конкурируют за ограниченное число мест связывания на поверхности сенсора. Отклик связывания обратно пропорционален концентрации аналита. В ингибирующем варианте постоянная концентрация антител, схожая с концентрацией аналита, смешивается с пробой, содержащей неизвестную концентрацию исследуемого вещества. Затем смесь вносится в проточную ячейку ППР сенсора и проходит над сенсорной поверхностью, в которой иммобилизован аналит или его аналог. Некомплексные антитела измеряются, в то время как они связываются с молекулами аналита, иммобилизованными на сенсорной поверхности. Отклик связывания обратно пропорционален концентрации аналита.

Биосенсоры, основанные на ППР принципе, впервые были запущены в серийное производство фирмой Pharmacia Biosensor AB (Швеция) в 1990 г. [33]. В начале своего развития ППР сенсоры являлись очень дорогостоящими, поэтому задача по разработке высокочувствительных ППР систем, обладающих низкой стоимостью, длительное время была актуальной. В настоящее время биосенсоры на основе ППР получили широкое применение в фармацевтической отрасли промышленности и в исследовательских лабораториях.

Рядом исследователей показано использование ППР биосенсоров для обнаружения отдельных возбудителей инфекционных болезней.

Так, Taylor *et al.* в изготовленном на заказ ППР сенсоре с модуляцией длины волны провели детекцию *E. coli* O157:H7 и исследовали воздействие различных методов обработки бактерий на производительность сенсора [31]. Чувствительность детекции лизированных детергентом, убитых нагреванием и не подвергшихся обработке бактерий составила $1 \cdot 10^4$, $1 \cdot 10^5$ и $1 \cdot 10^6$ м.к./мл, соответственно.

Meeusen *et al.* осуществили детекцию *E. coli* O157:H7 с использованием коммерчески доступного сенсора Spreeta (Texas Instruments Co., США) [23]. Биотинилированные поликлональные антитела к *E. coli* O157:H7 были иммобилизованы на покрытой авидином золотой поверхности. ППР биосенсор показал возможность определения *E. coli* O157:H7 в культурах с концентрациями на уровне $8,7 \cdot 10^6$ м.к./мл в течение 35 мин.

Su *et al.* использовали ППР сенсор на основе Spreeta для детекции *E. coli* O157:H7, в котором поликлональные антитела к *E. coli* O157:H7 были иммобилизованы посредством адсорбции белка А *Staphylococcus aureus* на сенсорной поверхности [28]. Чувствительность детекции *E. coli* O157:H7 в водной среде оказалась выше и составила $1 \cdot 10^6$ м.к./мл.

Subramanian *et al.* детектировали *E. coli* O157:H7 и *S. aureus* с помощью коммерческого ППР сенсора – SR7000 (Reichert Analytical Instruments, США) с присоединенными поликлональными антителами посредством алкантиоловых SAM слоев и активных аминогрупп [29, 30]. Исследователями была проведена детекция *E. coli* в «сэндвич» варианте с чувствительностью $1 \cdot 10^3$ м.к./мл, *S. aureus* – с чувствительностью $1 \cdot 10^5$ – $1 \cdot 10^7$ м.к./мл.

Waswa *et al.* для детекции *E. coli* O157:H7 и *Salmonella* sp. использовали два коммерческих ППР сенсора – Biacore 2000 (Biacore AB, Швеция) [35] и ППР сенсор Spreeta [36]. При этом чувствитель-

ность обнаружения *E.coli* O157:H7 с помощью биосенсора Biacore 2000 в пастеризованном молоке составила 25 м.к./мл. Диапазон чувствительности детектирования *E.coli* O157:H7 в молоке, яблочном соке и говядине с использованием биосенсора Spreeta составил $1 \cdot 10^2$ - $1 \cdot 10^3$ м.к./мл.

Mazumdar *et al.* с использованием коммерческого ППП сенсора Plasmonic (Plasmonic Biosensoren AG, Германия) в «сэндвич» варианте выявляли *Salmomell asp.* в молоке [20]. При этом поликлональные антитела были иммобилизованы на гидрофобной поверхности, активированной алкансиланами. Чувствительность детекции клеток *S.typhimurium* в молоке составила $1 \cdot 10^5$ м.к./мл.

Balasubramanian *et al.* сообщили об использовании коммерческого сенсора Spreeta для детекции *S.aureus* с использованием лизирующего фага в качестве биораспознающего элемента, иммобилизованного на поверхности сенсора путем прямой физической адсорбции [8]. Чувствительность детекции *S.aureus* в буфере составила $1 \cdot 10^4$ м.к./мл.

Тенденция развития оптических ППП биосенсоров связана с мультиплексированием биосенсорных систем с целью одновременного выявления и определения нескольких возбудителей.

Так, Taylor *et al.* сообщили о разработке мультиканального сенсора с модуляцией длины волны для обнаружения 4 возбудителей: *E.coli* O157:H7, *Salmonella choleraesuis*, *Listeria monocytogenes*, *Campylobacter jejuni* [32]. Биотинилированные поликлональные антитела к исследуемым бактериям были иммобилизованы посредством стрептавидина, присоединенного к смешанным SAM слоям и биотинилированных алкантиолов. Выявление убитых нагреванием бактерий было проведено в буфере, содержащем только бактерии каждого из указанных видов, в смеси четырех бактериальных видов и в яблочном соке. Было изучено влияние значения pH на чувствительность сенсора, которая оказалась выше для бактерий в яблочном соке с pH 7,4, чем в яблочном соке с pH 3,7. Установлена чувствительность – $1,4 \cdot 10^4$, $4,4 \cdot 10^4$, $3 \cdot 10^3$, $1 \cdot 10^5$ м.к./мл для бактерий *E.coli* O157:H7, *S.typhimurium*, *L.monocytogenes* и *C.jejuni*, содержащихся в буфере и $1 \cdot 10^5$, $1 \cdot 10^4$, $3 \cdot 10^3$, $5 \cdot 10^4$ м.к./мл для тех же бактерий, содержащихся в яблочном соке с pH 7,4, соответственно. Одновременная детекция отдельных видов бактерий в смеси показала хорошее соответствие с детекцией бактерий в буфере в отдельности.

Оптические биосенсоры используются также для выявления возбудителей опасных и особо опасных инфекционных болезней. Oh *et al.* и Jyoung *et al.* детектировали *Yersinia enterocolitica* [25] и *Vibrio cholerae* O1 серогруппы [13] с использованием коммерческого ППП сенсора Multiskop (Optrel GbR, Германия) и моноклональных антител, иммобилизованных посредством белка G присоединенного к алкантиоловому SAM слою на поверхности сенсора. Чувствительность детекции *Y.enterocolitica* и *V.cholerae* в буферном растворе составила $1 \cdot 10^2$ и $4 \cdot 10^5$ м.к./мл соответственно.

На основе принципа ППП разработаны биосенсоры для выявления спор возбудителя сибирской язвы *Bacillus anthracis*. Wang *et al.* детектировали споры *B.anthraxis* с использованием коммерческого SPR сенсора Biacore 3000 (Biacore AB, Швеция). Споры возбудителя сибирской язвы с концентрацией $1 \cdot 10^4$ спор/мл были выявлены в течение 40 мин, при этом споры других родственных бактерий рода *Bacillus* (*B.subtilis*, *B.cereus*, *B.thuringiensis*, *B.licheniformis*, *B.mycoides* и *B.pumilus*), содержащихся в концентрации $1 \cdot 10^7$ спор/мл, не выявлялись [34]. Farka *et al.* провели детекцию спор *Bacillustrophaeus*, использовавшихся в качестве непатогенного заменителя для *B.anthraxis* [10]. Удалось достичь чувствительности сенсора до $1 \cdot 10^5$ м.к./мл, а время анализа сократить до 30 мин.

Medina *et al.* сообщили о детекции стафилококкового энтеротоксина В (SEB) с использованием ингибированного варианта детекции. Исследуемый образец, содержащий SEB, был инкубирован с антителами к токсину с известной концентрацией в течение 20-30 мин, а затем смесь анализировалась ППП сенсором [21]. Чувствительность обнаружения SEB в молоке составила 0,3 нг/мл. Medina *et al.* также продемонстрировали детекцию стафилококкового энтеротоксина А (SEA) в сырых яйцах с использованием коммерческого ППП сенсора Biacore 1000 (Biacore AB, Швеция) и конкурентного варианта обнаружения [22]. SEA был иммобилизован в карбоксиметилированном декстрановом слое на поверхности сенсора посредством активных аминок групп. Анти-SEA-антитела были добавлены в исследуемый образец, позволяя SEA связываться с ними. Образовавшийся комплекс «антиген-антитело» был отделен от свободных антител центрифугированием. Супернатант был исследован над поверхностью, покрытой SEA. Используя этот подход, SEA был детектирован в концентрации 1 нг/мл.

В настоящее время широкое распространение и внедрение в производство аналитических устройств получила технология с использованием оптических волокон, которые представляют собой удобную и доступную платформу для создания волоконно-оптических биосенсоров. При этом, регистрация изменения свойств различных биологических объектов осуществляется при помощи подава-

емого через волокно биосенсора излучения инфракрасной (ИК), видимой и ультрафиолетовой (УФ) областей спектра электромагнитного излучения [2].

Волоконно-оптические биосенсоры используют специфические связывания между антителами и антигенами, наблюдаемые косвенно посредством флуоресцирующей оптической метки или непосредственно путем измерения показателя преломления или изменения показателя отражения, которые не требуют меток [17].

Иммобилизованные на волноводе захватывающие антитела селективно связывают специфические антигены-мишени, с последующей инкубацией с флуорофор-мечеными детектирующими антителами. Флуорофорами обычно являются цианин-5 или Alexa Fluor 647, которые при облучении лазером с длиной волны 637 нм способны генерировать определяемый сигнал. Флуоресцирующие молекулы в пределах 100-1000 нм поверхности волновода возбуждаются исчезающим полем, и часть их энергии излучения уходит внутрь волокна. Меченые антигены захватываются антителами в течение промежутка времени существования возбуждаемой лазером исчезающей волны. Фоновые сигналы от несвязанных частиц мало влияют на общий флуоресцирующий измеряемый сигнал.

Этот принцип был использован для детекции различных анализируемых веществ с высокой степенью чувствительности и специфичности с использованием разработанного в США оптоволоконного биосенсора с исчезающей волной Analyte 2000 (Research International, США) [9]. Analyte 2000 использует 635-нм диодный лазер для обеспечения возбуждающего света, который подается в ближайший конец полистироловых оптических волноводов и может анализировать до четырех образцов одновременно, используя четыре различных волновода. Фотодиод собирает и количественно измеряет свет излучения на длинах волн свыше 650 нм. Ohk *et al.* использовали Analyte 2000 для детекции трех основных пищевых патогенов: *L.monocytogenes*, *E.coli* O157:H7 и *S.enterica* из готовых к употреблению говядины, курятины и индюшатины с чувствительностью 10^3 м.к./мл [26].

Позже была разработана автоматизированная портативная версия биосенсора Analyte 2000 для детекции агентов биотерроризма в окружающей среде – RAPTOR (Research International, США), которая позволила сократить время анализа до 12 мин [18]. RAPTOR использует одноразовый образец для испытаний, содержащий четыре полистироловых оптических волновода. Компактный, портативный прибор может автоматически выполнять заданный пользователем многоэтапный протокол анализа для мониторинга четырех отдельных флуоресцентных иммуноанализов в одиночном образце, происходящих в четырех одноразовых оптических волноводных сенсорах.

Kim *et al.* с использованием сенсора RAPTOR™ провели детекцию *L.monocytogenes* [15]. Чувствительность детекции *L.monocytogenes* в образцах составила $5,4 \cdot 10^7$ м.к./мл. Nanduri *et al.* детектировали *L.monocytogenes* с использованием RAPTOR™ в фосфатно-солевом буфере [24]. Была установлена чувствительность $1 \cdot 10^3$ м.к./мл.

Maraldo *et al.* использовали конический волоконно-оптический биосенсор для обнаружения роста *E.coli JM 101* [19]. Коническая поверхность была покрыта поли-L-лизинном и иммобилизованными клетками *E.coli JM 101*, экспрессирующими зеленый флуоресцирующий белок. Рост бактерий наблюдали путем измерения через конический световод лазерной трансмиссии, которая уменьшалась экспоненциально с ростом клеток.

Rijal *et al.* использовали волоконно-оптический биосенсор с ковалентно прикрепленными к конической поверхности антител к *E.coli* O157:H7. Биосенсор позволил определить *E.coli* в концентрации до 70 м.к./мл [27].

Geng *et al.* разработали конический волоконно-оптический биосенсор для детекции *E.coli* O157:H7 с использованием «сэндвич» варианта иммуноанализа и флуоресцирующих детектирующих антител [11]. Сенсор выявлял клетки *E.coli* в концентрации $1 \cdot 10^3$ м.к./мл.

Ko *et al.* использовали метод передачи энергии посредством флуоресцентного резонанса энергии (англ. fluorescence resonance energy transfer, FRET), заключенный в переносе энергии от флуоресцирующей молекулы донора к молекуле акцептора, в концевом волоконно-оптическом датчике для детекции *S.typhimurium* [16]. Наконечник волоконно-оптического биосенсора был изготовлен путем травления с использованием плавиковой кислоты. Антитела к *Salmonella sp.*, были мечены FRET донорным флуорофором (Alexa Fluor 546), а белок G был мечен FRET акцепторным флуорофором (Alexa Fluor 594). Испытания световода показали чувствительность при определении *S.typhimurium* в концентрации $1 \cdot 10^5$ м.к./г в течение 5 мин.

К оптическим биосенсорам также относят колориметрические биосенсоры, принцип действия которых основан на регистрации изменения цвета исследуемой среды. В 1980 г. Leuvering *et al.* предложил метод иммуноанализа на частицах золя (sol particle immunoassay, SPIA) [14], который позволяет проводить количественный анализ белков и нуклеиновых кислот в растворе [3]. Метод основан на двух важнейших свойствах золь золотa, когда их ярко красный цвет практически не меняется при адсорбции на частицах золотa высокомолекулярных соединений и изменяется при агрегации частиц в результате образования иммунных комплексов.

Таким образом, оптические биосенсоры представляют собой высокочувствительные средства индикации патогенов, позволяя проводить быстрый анализ в режиме реального времени с минимальной дополнительной подготовкой анализируемого материала. Обладая высокой избирательностью, доступностью, безопасностью в использовании, малыми габаритными размерами и возможностью массового производства, оптические биосенсоры являются перспективными средствами биомониторинга окружающей среды, позволяя получать сигнальный ответ для предупреждения биологической угрозы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Биологическая безопасность. Термины и определения / под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко, чл.-корр. РАМН В.В. Кутырева. Саратов: Приволж. кн. изд-во, 2006. 112 с.
2. Биосенсорные технологии в диагностике инфекционных болезней / под ред. акад. РАН, проф. В.В. Кутырева. Тверь: Триада, 2014. 112 с.
3. Дыкман Л.А., Богатырев В.А. Наночастицы золотa: получение, функционализация, использование в биохимии и иммунохимии // Успехи химии. 2007. Вып. 76 (2). С. 199-213.
4. Специфическая индикация патогенных биологических агентов: практ. руководство / под ред. акад. РАН Г.Г. Онищенко, акад. РАН В.В. Кутырева. 2-е изд., перераб. и доп. М., 2015.
5. Оценка диагностической эффективности наборов реагентов для выявления ДНК возбудителей сибирской язвы, бруцеллеза и холеры методом ПЦР с учетом результатов в режиме «реального времени» / А.С. Абдрашитова, Л.В. Саяпина, А.Н. Малахаева, Н.А. Осина // Здоровье населения и среда обитания. 2013. Вып. 1(238). С. 32-34.
6. New perspectives in biosensors technology and applications / Ed. by Prof. Pier Andrea Serra. 2011. 448 p.
7. Иванов А.С. Исследование межмолекулярных взаимодействий с помощью оптических биосенсоров, работающих на эффекте поверхностного плазмонного резонанса // Современные технологии в медицине. 2012. Вып. 4. С. 142-153.
8. Lytic phage as a specific and selective probe for detection of *Staphylococcus aureus* – A surface plasmon resonance spectroscopic study / S. Balasubramanian, I.B. Sorokulova, V.J. Vodyanoy, A.L. Simonian // Biosens. Bioelectron. 2007. Vol. 22 (6). P. 948-955.
9. Recent development in optical fiber biosensors / M.E. Bosch, A.J.R. Sánchez, F.S. Rojas, C.B. Ojeda // Sensors. 2007. Vol. 7. P. 797-859.
10. Piezoelectric and surface plasmon resonance biosensors for *Bacillus atrophaeus* spores / Z. Farka, D. Kovář, J. Příbyl, P. Skládal // Int. J. Electrochem. Sci. 2013. Vol. 8. P. 100-112.
11. Fiber-optic biosensor employing Alexa-Fluor conjugated antibody for detection of *Escherichia coli* O157: H7 from ground beef in four hours / T. Geng, J. Uknalis, S.I. Tu, A.K. Bhunia // Sensors. 2006. Vol. 6(8). P. 796-807.
12. Homola J. Surface plasmon resonance sensors for detection of chemical and biological species / J. Homola // Chem. Rev. 2008. Vol. 108 (2). P. 462-493.
13. Immunosensor for the detection of *Vibrio cholerae* O1 using surface plasmon resonance / J.Y. Jyoung, S. Hong, W. Lee, J.W. Choi // Biosens. Bioelectron. 2006. Vol. 21(12). P. 2315-2319.
14. Analytical and theranostic applications of gold nanoparticles and multifunctional nanocomposites / N. Khlebtsov, V. Bogatyrev, L. Dykman et al. // Theranostics. 2013. Vol. 3(3). P. 167-180.
15. Detection of *Listeria monocytogenes* using an automated fiberoptic biosensor: RAPTOR / G. Kim, M.T. Morgan, D. Ess // Advanced Nondestructive Evaluation I. Pts 1 and 2, Proceedings. 2006. Vol. 321-323. P. 1168-1171.
16. Ko S.H. A novel FRET-based optical fiber biosensor for rapid detection of *Salmonella typhimurium* / S.H. Ko, S.A. Grant // Biosens. Bioelectron. 2006. Vol. 21(7). P. 1283-1290.

17. Leung A. A review of fiber-optic biosensors / A. Leung, P.M. Shankar, R. Mutharasan // *Sensors and Actuators B*. 2007. Vol. 125. P. 688-703.
18. Current developing technologies for monitoring agents of bioterrorism and biowarfare / D.V. Lim, J.M. Simpson, E.A. Kearns, M.F. Kramer // *Clin. Microbiol. Reviews*. 2005. Vol. 18 (4). P. 583-607.
19. Maraldo D., Shankar P.M., Mutharasan R. Measuring bacterial growth by tapered fiber and changes in evanescent field // *Biosens. Bioelectron*. 2006. Vol. 21(7). P. 1339-1344.
20. Rapid method for detection of Salmonella in milk by surface plasmon resonance (SPR) / S.D. Mazumdar, M. Hartmann, P. Kampfer, M. Keusgen // *Biosens. Bioelectron*. 2007. Vol. 22(9-10). P. 2040-2046.
21. Medina M.B. A biosensor method for a competitive immunoassay detection of staphylococcal enterotoxin B (SEB) in milk // *J. Rapid Methods Autom. Microbiol*. 2005. Vol. 13(1). P. 37-55.
22. Medina M.B. A biosensor method for detection of staphylococcal enterotoxin A in raw whole egg // *J. Rapid Methods Autom. Microbiol*. 2006. Vol. 14(2). P. 119-132.
23. Meeusen C.A. Detection of E. coli O157:H7 using a miniaturized surface plasmon resonance biosensor / C.A. Meeusen, E.C. Alocilja, W.N. Osburn // *Trans. ASAE*. 2005. Vol. 48(6). P. 2409-2416.
24. Antibody immobilization on waveguides using a flow-through system shows improved Listeria monocytogenes detection in an automated fiber optic biosensor: RAPTOR (TM) / V. Nanduri, G. Kim, M.T. Morgan et al. // *Sensors*. 2006. Vol. 6(8). P. 808-822.
25. Surface plasmon resonance immunosensor for the detection of Yersinia enterocolitica / B.K. Oh, W. Lee, B.S. Chun et al. // *Colloids. Surf. A Physicochem. Eng. Asp*. 2005. Vol. 257-58. P. 369-374.
26. Ohk S.H., Bhunia A.K. Multiplex fiber optic biosensor for detection of Listeria monocytogenes, Escherichia coli O157:H7 and Salmonella enterica from ready-to-eat meat samples // *Food Microbiol*. 2013. Vol. 33 (2). P. 166-171.
27. Detection of pathogen Escherichia coli O157: H7 AT 70 cells/mL using antibody-immobilized biconical tapered fiber sensors / K. Rijal, A. Leung, P.M. Shankar, R. Mutharasan // *Biosens. Bioelectron*. 2005. Vol. 21(6). P. 871-880.
28. Su X.L., Li Y. Surface plasmon resonance and quartz crystal microbalance immunosensors for detection of Escherichia coli O157:H7 // *Trans. ASAE*. 2005. Vol. 48(1). P. 405-413.
29. Subramanian A., Irudayaraj J., Ryan T. A mixed self-assembled monolayer-based surface plasmon immunosensor for detection of E. coli O157:H7 // *Biosens. Bioelectron*. 2006. Vol. 21(7). P. 998-1006.
30. Subramanian A., Irudayaraj J., Ryan T. Comparison of mono and dithiol surfaces on surface plasmon resonance biosensors for detection of Staphylococcus aureus // *Sens. Actuators B*. 2006. Vol. 114. P. 192-198.
31. Comparison of E. coli O157:H7 preparation methods used for detection with surface plasmon resonance sensor / A.D. Taylor, Q.M. Yu, S.F. Chen et al. // *Sens. Actuators B*. 2005. Vol. 107(1). P. 202-208.
32. Quantitative and simultaneous detection of four foodborne bacterial pathogens with a multi-channel SPR sensor / A.D. Taylor, J. Ladd, Q.M. Yu et al. // *Biosens. Bioelectron*. 2006. Vol. 22(5). P. 752-758.
33. Tudos A.J., Schasfoort R.B.M. Handbook of surface plasmon resonance // Royal Society of Chemistry. 2008. 426 p.
34. Label-free detection of B. anthracis spores using a surface plasmon resonance biosensor / D.B. Wang, L.J. Bi, Z.P. Zhang et al. // *Analyst*. 2009. Vol. 134(4). P. 738-742.
35. Waswa J.W., Debroy C., Irudayaraj J. Rapid detection of Salmonella enteritidis and Escherichia coli using surface plasmon resonance biosensor // *J. Food Process Eng*. 2006. Vol. 29(4). P. 373-385.
36. Waswa J.W., Debroy C., Irudayaraj J. Direct detection of E. Coli O157:H7 in selected food systems by a surface plasmon resonance biosensor // *LWT-Food Sci. Technol*. 2007. Vol. 40(2). P. 187-192.

Спицын Алексей Николаевич –
младший научный сотрудник
Федерального казенного учреждения
здравоохранения Российский
научно-исследовательский противочумный
институт «Микроб», Саратов

Aleksey N. Spitsyn –
Junior Researcher
Russian Research Anti-Plague
Institute «Microbe», Saratov

Уткин Денис Валерьевич –
ведущий научный сотрудник
Федерального казенного учреждения
здравоохранения Российский научно-
исследовательский противочумный
институт «Микроб», Саратов

Denis V. Utkin –
Leading Researcher
Russian Research Anti-Plague
Institute «Microbe», Saratov

Германчук Валерий Геннадиевич –
ведущий научный сотрудник
Федерального казенного учреждения
здравоохранения Российский научно-
исследовательский противочумный
институт «Микроб», Саратов

Valery G. Germanchuk –
Leading Researcher
Russian Research Anti-Plague
Institute «Microbe», Saratov

Куклев Василий Евгеньевич –
заведующий лабораторией
Федерального казенного учреждения
здравоохранения Российский научно-
исследовательский противочумный
институт «Микроб», Саратов

Vasily E. Kouklev –
Chief of Laboratory
Russian Research Anti-Plague
Institute «Microbe», Saratov

Статья поступила в редакцию 12.09.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.385.6

М.А. Фурсаев

К АНАЛИЗУ ВЕЛИЧИНЫ ТОКА СРЫВА ГЕНЕРАЦИИ В МАГНЕТРОНЕ

Рассмотрена простейшая модель магнетрона, позволяющая проводить анализ величины тока срыва генерации магнетрона, при котором электрическое поле резонаторной системы перестает управлять процессом формирования электронных спиц. Определена зависимость величины этого тока от параметров резонаторной системы этого прибора.

Магнетрон, электронная спица, ток срыва генерации, напряженность электрического поля, резонаторная система

M.A. Fursaev

ANALYSIS OF OSCILLATION FAILURE IN THE MAGNETRON

The paper considers the simplest model for the magnetron, which allows conducting analysis of the intensity of oscillations in the magnetron under conditions when the electric field of the resonator system fails to control the process related with accumulation of electron spokes. The inter-dependence between the current rate and the parameters of the resonator system in the given device is determined.

Magnetron, electronic spoke, current of blowing off a generation, tension of electric field, resonator system

В приборах магнетронного типа имеет место ограничение рабочего участка вольт-амперной характеристики при больших значениях анодного тока, не связанного с ограниченностью эмиссионной способности катода, рассмотренной в [1]. В наибольшей степени такое явление проявляется в амплитроне и получило наименование срыва усиления [2]. Аналогичное явление наблюдается и в магнетронах с малой величиной нагруженной добротности. Так, в работах по миниатюризации магне-

тронов, выполненных Л.Г. Некрасовым, было экспериментально установлено, что срыв колебаний при больших токах практически не зависит от термоэмиссии катода [3, 4].

А.Н. Каргиным [3, 4] явление срыва генерации магнетрона при больших величинах тока связывается с достижением плотности пространственного заряда в спицах критического значения, равного плотности Бриллюэна. На основании этого им показано, что величина тока в критическом режиме пропорциональна произведению ρQ_n , где ρ – волновое сопротивление резонаторной системы, Q_n – ее нагруженная добротность, откуда следует, что ток срыва генерации увеличивается с увеличением напряженности ВЧ электрического поля резонаторной системы. Однако в полученных в [3, 4] соотношениях величина напряженности этого поля отсутствует, что не позволяет их использовать при анализе работы магнетрона, в том числе в режиме синхронизации.

В простейшей модели амплитрона [2] полагается, что явление тока срыва усиления связано с малой величиной ВЧ напряжения электрического поля анодной системы, при которой прекращается управление этим полем процессом формирования электронных спиц. В ее соотношениях величина напряженности ВЧ электрического поля анодной системы присутствует, что позволяет выявить зависимость тока срыва усиления от уровня входного сигнала. Для обоснования аналогии физики процессов срыва усиления в амплитроне и срыва генерации в магнетроне представляется целесообразным построение простейшей модели магнетрона, описывающей явление срыва генерации, на основе исходных положений модели амплитрона [2]. Такая модель магнетрона, рассматриваемая ниже, позволяет анализировать зависимость тока срыва генерации от параметров как самого прибора, так и режима его работы.

Необходимо отметить, что для определения значений электрических параметров амплитрона в режиме срыва усиления, кроме простейшей модели [2], созданы модели, использующие метод крупных частиц [5]. Модели для определения значений электрических параметров магнетрона в режиме срыва генерации не известны. Такое положение объясняется тем, что основное внимание уделялось разработке магнетронов сантиметрового и дециметрового диапазонов высокого уровня мощности, у которых величина амплитуды ВЧ напряжения резонаторной системы соизмерима с величиной анодного напряжения. Однако и в таких магнетронах срыв генерации проявляется при их работе на рассогласованную нагрузку [6].

1. Исходные положения простейшей модели магнетрона

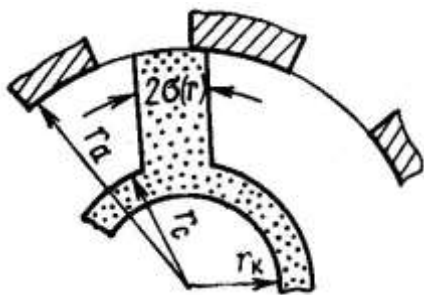


Рис. 1. Предполагаемое распределение электронного потока в пространстве катод – анод магнетрона

В модели полагается, что в пространстве между катодом и анодом магнетрона при его работе электронный поток формируется в виде двух областей, как отражено на рис. 1.

Электроны из втулки, области, примыкающей к катоду, поставляются во вторую, в которой формируются электронные спицы, вращающиеся вокруг катода с угловой скоростью, равной скорости распространения ВЧ волны в резонаторной системе

$$\Omega_0 = \frac{2\pi f}{\gamma}, \quad (1)$$

где f – генерируемая магнетроном частота, γ – постоянная распространения ВЧ волны. Границей между этими областями является слой, в котором угловая скорость электронов равна скорости распространения ВЧ волны в резонаторной системе. Его радиус определяется соотношением

$$r_c = \frac{r_k}{\sqrt{1 - 2 \frac{\Omega_0}{\omega_{II}}}}, \quad (2)$$

где $\omega_{II} = \frac{e}{m_0} B$ – циклотронная частота, $\frac{e}{m_0}$ – отношение заряда электрона к его массе, B – магнитная индукция.

Электронная спица, симметричная относительно радиальной прямой, суживается при увеличении радиуса в соответствии с уравнением

$$r^{m\gamma} \sin \gamma \sigma(r) = r_c^{m\gamma} \sin \gamma \sigma(r_c) = \text{const}, \quad (3)$$

где m – величина, определяемая эмпирически с целью обеспечения соответствия расчетных и экспериментальных данных. Средняя плотность пространственного заряда в спице определяется как

$$\rho = -4\epsilon_0 \frac{U_a - U_c}{r_a^2 - r_c^2}, \quad (4)$$

где ϵ_0 – диэлектрическая проницаемость вакуума, U_a – анодное напряжение,

$$U_c = \frac{m_0}{8\epsilon_0} \omega_{Ц}^2 r_c^2 \left(1 - \frac{r_k^2}{r_c^2}\right)^2$$

– потенциал в основании спицы. Фазовое положение оси симметрии спицы в ВЧ волне $\gamma\phi_1$, а также ширина спицы у ее основания определяются из диаграмм фазовой фокусировки [7]

$$\cos 2\gamma\phi_1 = \frac{U_a - U_{nop}}{U_1}, \quad (5)$$

$$-\cos 2\gamma\sigma(r_c) = \frac{U_a - U_{nop}}{U_1}, \quad (6)$$

где U_1 – амплитуда напряжения ВЧ волны резонаторной системы, взаимодействующей с электронной спицей, U_{nop} – пороговый потенциал Хартри

$$U_{nop} = \frac{B\Omega_0}{2} (r_a^2 - r_k^2) - \frac{m_0}{2e} \Omega_0^2 r_a^2. \quad (7)$$

Полагается также, что взаимодействие электронной спицы происходит лишь тангенциальной компонентой поля ВЧ волны резонаторной системы, а также рассматривается двухмерная задача.

2. Уравнения модели

Для определения величины активной компоненты мощности взаимодействия электронной спицы с ВЧ полем волны резонаторной системы магнетрона используется соотношение, полученное в [8], определяющее величину тока, наведенного спицей. С учетом оговоренных выше исходных положений соотношение для амплитуды этого тока имеет вид

$$I_{nm} = 8\sqrt{2} \frac{\epsilon_0 h f N (U_a - U_c)}{\gamma^2} \Phi_1 \sqrt{1 + \chi}, \quad (8)$$

где

$$\Phi_1 = \frac{S_c^{m\gamma}}{(S_a^2 - S_c^2)(S_a^\gamma - S_a^{-\gamma})} \left[\frac{S_a^{(1-m)\gamma+2} - S_c^{(1-m)\gamma+2}}{(1-m)\gamma+2} + \frac{S_c^{-(1+m)+2} - S_a^{-(1+m)+2}}{(1+m)-2} \right],$$

$$S_a = \frac{r_a}{r_k}, \quad S_c = \frac{r_c}{r_k},$$

$$\chi = \frac{U_a - U_{nop}}{U_1}, \quad (9)$$

h – высота междуэлектродного пространства; N – число ячеек в резонаторной системе магнетрона. Величина χ считается параметром режима магнетрона, указывающим, насколько анодное напряжение отличается от порогового напряжения Хартри.

Тогда активная компонента мощности взаимодействия всех γ электронных спиц с ВЧ полем резонаторной системы определяется как

$$P_e = 4\sqrt{2} \frac{\varepsilon_0 h f N (U_a - U_c)}{\gamma} \Phi_1 U_1 \sqrt{1 + \chi}, \quad (10)$$

Выходная мощность магнетрона связана с амплитудным значением напряжения ВЧ волны резонаторной системы соотношением

$$P_{вых} = 0,5 \frac{U_1^2}{\rho Q_H}, \quad (11)$$

где Q_H – нагруженная добротность резонаторной системы.

Предположив, что вся активная компонента мощности электронного взаимодействия передается в нагрузку, можно получить соотношения, связывающие анодное напряжение и амплитуду ВЧ напряжения волны резонаторной системы в режиме с величиной параметра χ .

$$U_a = \frac{U_{пор} - U_c \alpha \chi \sqrt{1 + \chi}}{1 - \alpha \chi \sqrt{1 + \chi}}, \quad (12)$$

$$U_c = \alpha (U_a - U_c) \sqrt{1 + \chi}, \quad (13)$$

где $\alpha = 8\sqrt{2} \frac{\varepsilon_0 h f N}{\gamma} \Phi_1 \rho Q_H$.

В [2] получено соотношение для определения величины тока, протекающего в спице под действием напряжения ВЧ волны анодной системы, равной U_1 . В магнетроне электронный поток состоит из одинаковых спиц. Поэтому соотношение для определения его анодного тока записывается как

$$I_a = 4\varepsilon_0 \frac{U_1 h \gamma}{B} \left(\frac{r_c}{r_a} \right)^{m\gamma} \frac{U_a - U_c}{r_a^2 - r_c^2} (1 + \chi). \quad (14)$$

Анодное напряжение в режиме, при котором ВЧ поле резонаторной системы перестает управлять электронным потоком, согласно представлениям, развитым в [9], равно

$$U_{a \text{ срыва}} = U_{пор} + U_1. \quad (15)$$

Поэтому величина параметра χ , равная 1, соответствует режиму срыва генерации в магнетроне.

Полученные выше соотношения позволяют проводить анализ электрических параметров и характеристик магнетрона в зависимости от его электрических и геометрических параметров и параметров электрического режима. При расчете рабочих характеристик осуществляется варьирование значения параметра χ в интервале от $-0,5$ до 1. При $\chi = 1$ определяются значения параметров магнетрона в режиме срыва генерации.

3. Результаты расчета

С целью оценки возможности использования соотношений модели ниже приводятся расчет и сравнение с экспериментом рабочих характеристик магнетрона 8-миллиметрового диапазона, анодный блок которого содержит 16 резонаторов. Он работает на минус первой гармонике ($\gamma = 13$). При расчете полагалось, что величина m в формуле для Φ_1 равна 0,05, а в соотношении (14) – 0,35.

На рис. 2 и 3 приведены результаты расчета вольт-амперной характеристики и зависимости выходной мощности магнетрона и соответствующие экспериментальные данным. Из их сравнения следует, что приближенная модель вполне адекватно отражает ход экспериментальных зависимостей.

На рис. 4 приведены данные расчета зависимости тока срыва генерации в магнетроне от величины произведения ρQ_n , определяющего величину амплитуды ВЧ напряжения резонаторной системы магнетрона. Видно, что уменьшение величины этого произведения, т.е. уменьшение амплитуды ВЧ напряжения приводит к уменьшению максимальной величины анодного тока, при котором обеспечивается работа магнетрона. Аналогичная зависимость имеет место и в амплитуде [2].

Как видно из рис. 4, в общем случае имеет место зависимость тока срыва генерации от произведения ρQ_n , которая отличается от линейной. Она может быть аппроксимирована тангенсоидой, откуда следует, что оговоренная в [3, 4] пропорциональность между током срыва генерации и произведением ρQ_n имеет место при малых величинах последнего. При больших величинах произведения ρQ_n происходит более резкое увеличение тока срыва. Такая зависимость объясняет факт, что в магнетронах сантиметрового и дециметрового диапазонов высокого уровня мощности величина амплитуды ВЧ напряжения резонаторной системы соизмерима с величиной анодного напряжения. В результате токи срыва генерации существенно превышают рабочие токи.

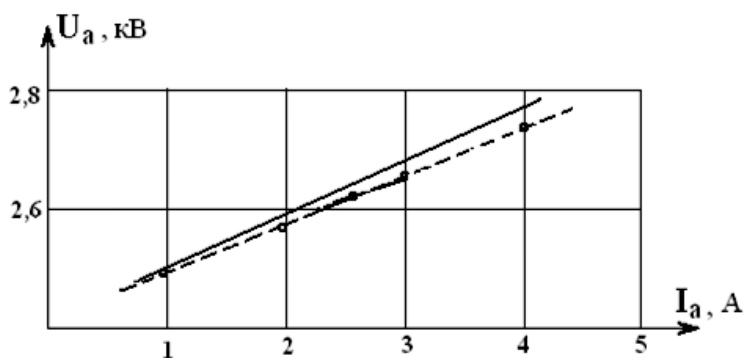


Рис. 2. Расчетная и экспериментальная (пунктир) вольт-амперные характеристики магнетрона

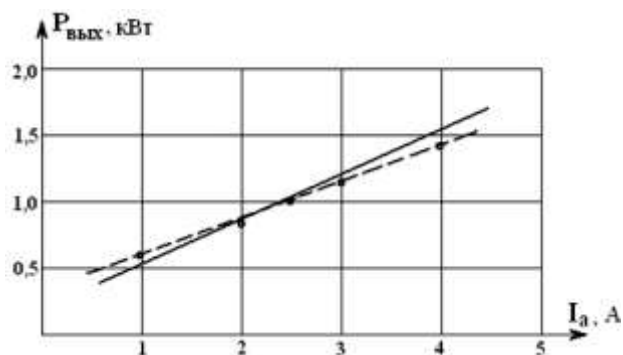


Рис. 3. Расчетная и экспериментальная (пунктир) зависимости выходной мощности магнетрона от анодного тока

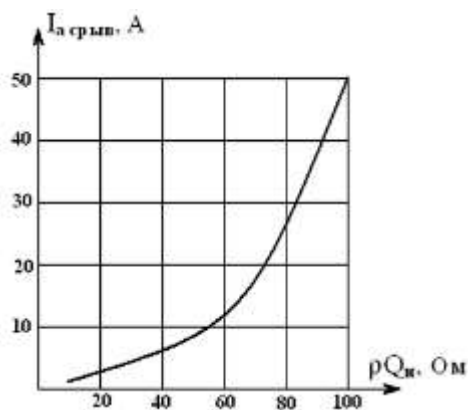


Рис. 4. Расчетная зависимость тока срыва генерации в магнетроне от величины произведения ρQ_n

4. Заключение

Рассмотренная приближенная модель магнетрона может быть использована при анализе его параметров, в том числе в режиме срыва генерации, ограничивающего работу при больших токах из-за того, что теряется способность ВЧ поля резонаторной системы управлять электронным потоком. Такие режимы имеют место при работе магнетрона на нагрузку с высокими значениями коэффициента отражения, а также при его работе в режиме синхронизации.

Очевидно, использование приближенной модели весьма ограничено. Более полные представления о электронных процессах в магнетроне в режиме срыва генерации могут быть получены при использовании численных моделей, в основу которых положен метод крупных частиц.

ЛИТЕРАТУРА

1. Степанов Ю.Д. О предельных токах в приборах М-типа с катодом в пространстве взаимодействия // Электронная техника/ Электроника СВЧ. 1966. Вып. 1. С. 104.
2. Цейтлин М.Б., Фурсаев М.А., Бецкий О.В. Сверхвысокочастотные усилители со скрещенными полями. М.: Сов. радио, 1978. 279 с.
3. Генераторы и усилители СВЧ / под ред. И.В. Лебедева. М.: Радиотехника, 2005. 325 с.
4. Каргин А.Н. Миниатюрные синхронизированные магнетроны для систем связи // Радиотехника. 2000. № 2. С. 62-66.
5. Численная многоволновая модель магнетронных усилителей с замкнутым электронным потоком, учитывающая возбуждение побочных видов колебаний / В.Б. Байбуурин, А.С. Зяблов, А.В. Ляшенко, А.А. Терентьев // Гетеромагнитная микроэлектроника. 2011. № 9. С. 56-60.
6. Электронные приборы СВЧ / В.М. Березин, В.С. Буряк, Э.М. Гутцайт, В.П. Марин. М.: Высш. шк., 1985. 296 с.
7. Welch H. Production traveling wave magnetron frequency characteristics: frequency pushing and voltage tuning // Proc. IRE. 1053. Vol. 41. № 1. P. 1631.
8. Бычков С.И. Вопросы теории и практического применения приборов магнетронного типа. М.: Сов. радио, 1967. 216 с.
9. Фурсаев М.А. К использованию диаграмм фазовой фокусировки для анализа работы приборов магнетронного типа // Вопросы радиоэлектроники. Сер. 1. Электроника. 1965. Вып. 4. С. 30.

Фурсаев Михаил Александрович –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Электротехника и электроника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail A. Fursaev –
Dr. Sc., Professor
Department Electrical Engineering
and Electronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.385.624

В.А. Царев, Д.А. Нестеров

**КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛУЧЕВОГО МОНОТРОНА
W-ДИАПАЗОНА С РЕЗОНАТОРОМ РАСПРЕДЕЛЕННОГО
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ**

В результате компьютерного моделирования показана возможность создания в W-диапазоне длин волн многолучевой конструкции монотрона с полным КПД около 8%. В качестве колебательной системы этого прибора используется четырехзворный резонатор, который возбуждается на π -виде колебаний и связан с нагрузкой через дополнительные пассивные резонаторы. Полученные в малосигнальном приближении данные подтверждают возможность получения на частоте 91 ГГц выходной мощности в режиме автогенерации около 1.5 кВт при полном КПД 8.4%, величине ускоряющего напряжения 25 кВ и плотности тока в луче 100 А/см². При этом в качестве источника термоэмиссии в монотроне может быть использован скандатный катод. Возможно также использование автоэмиссионных источников тока.

Монотрон, резонатор, распределенное взаимодействие, W-диапазон, автогенератор, КПД, многолучевой поток

V.A. Tsarev, D.A. Nesterov

COMPUTER SIMULATION OF A MULTIBEAM W-BAND MONOTRON WITH EXTENDED – INTERACTION RESONATOR

Computer simulation allowed for the possibility of designing a multibeam W-band monotron with the total efficiency about 8 percent. A four-gap cavity is utilized as the resonator of the system, which is excited by n π -mode and is connected to the loading via additional passive cavities. The data obtained in a small-signal approximation confirms the possibility of achieving an output power of 2.7 kW with the total efficiency about 8.4% at self-exciting oscillation mode with the frequency at 91 GHz, using the accelerating voltage at 25 kV and the cathode current density at 100 A/cm² per beam. The scandate cathode can be applied as a source of thermionic emission, whereas the field-emission current can be used as an additional source.

Monotron, cavity, distributed interaction, W-band, self-excited oscillator, efficiency, multiple-beam flow

Введение. Активное освоение миллиметрового диапазона длин волн требует разработки мощных эффективных усилителей и генераторов этого диапазона. Наибольшее распространение в миллиметровом диапазоне длин волн получили однолучевые клистроны с распределенным взаимодействием – Extended Interaction Klystron (EIK) [1, 2].

Наряду с этим представляет интерес возможность создания в этом диапазоне других типов микроволновых генераторов с распределенным взаимодействием – Extended Interaction Oscillator (EIO). К их числу можно отнести монотрон распределенного взаимодействия (MPB) – Monotron Extended Interaction Oscillator (MEIO) [3, 4].

Принцип работы прибора основан на использовании пролетных эффектов, возникающих при длительном взаимодействии электронного потока с высокочастотными (ВЧ) полями дискретных зазоров резонатора. Эти эффекты приводят к возникновению отрицательной электронной проводимости, шунтирующей резонатор [5].

Для повышения эффективности MPB генераторов требуется переход от однолучевой конструкции к многолучевой, а также применение многозазорных резонаторов, обладающих по сравнению с однозазорными резонаторами повышенным характеристическим сопротивлением [6, 7].

$$\rho = \frac{R_{\Sigma}}{Q_0} = \frac{(n \int |E| ds)^2}{2\omega W_s}, \text{ Ом}, \quad (1)$$

где R_{Σ} – параллельно включенное сопротивление эквивалентного резонансного контура; Q_0 – собственная добротность; W_s – запасенная энергия; n – число зазоров.

В многолучевой конструкции монотрона (MMPB) используются лучи с малым пространственным зарядом, зависящим от величины микроперванса:

$$p_{\mu 1} = I_{01} / U_0^{3/2} \cdot 10^6, \text{ мкА/В}^{3/2}, \quad (2)$$

где I_{01} – ток одного луча, U_0 – ускоряющее напряжение.

Однако при создании многолучевой конструкции монотрона, работающего в миллиметровом диапазоне длин волн, возникают серьезные проблемы.

Они связаны с тем, что микроперванс отдельных лучей в MMPB обычно невелик (0,3–0,5 мкА/В^{3/2}). Число лучей N , также как и многолучевых клистронов [8] ограничено условием выбора максимального размера T многоканальной пролетной трубы (3):

$$T \leq \lambda / 2, \quad (3)$$

где λ – рабочая длина волны.

Выбор приведенного радиуса пролетного канала γa также ограничен следующим условием:

$$\gamma a = (\beta_e^2 - k^2)^{1/2} \leq 1,3, \text{ рад}, \quad (4)$$

где $\beta_e = \omega/V_0$ – электронная постоянная распространения; $\gamma = (\beta_e^2 - k^2)^{1/2}$ – радиальное волновое число; $k = \omega/c$ – волновое число, $\omega = 2\pi f$ [рад/с] – угловая частота; $V_0 = 5,93 \cdot 10^5 \sqrt{U_0}$ [м/с] – скорость электронов.

В свою очередь, радиус пучка b при отсутствии компрессии пучка определен величиной коэффициента заполнения b/a . Он зависит от предельной плотности тока на катоде $J_{k \max}$, которая для самых современных скандатных катодов не должна превышать 100 А/см^2 [9].

Однако в настоящее время сведения о разработке и исследовании таких приборов отсутствуют как в отечественной, так и в зарубежной литературе.

Целью работы является определение необходимого комплекса электронных и электродинамических параметров ММРВ, обеспечивающего достижение максимальных значений электронного КПД и выходной мощности этого устройства при работе в W -диапазоне.

Описание конструкции резонаторов. Объектом исследований являлся резонатор, работающий на частоте $f = 91 \text{ ГГц}$ ($\lambda = 3,3 \text{ мм}$) на противофазном виде колебаний и имеющий четыре зазора. Корпус резонатора и три пролетные трубы имеют прямоугольную форму. Расположение каналов в пролетной трубе линейное.

Из конструктивных соображений радиус одного пролетного канала был выбран равным $a = 0,2 \text{ мм}$. Тогда из условия (3) находим максимальный размер пролетной трубы $T = 1,65 \text{ мм}$. Плотность тока скандатного катода принимаем равной $J_k = 100 \text{ А/см}^2$. С учетом коэффициента заполнения пучком пролетного канала $b/b_a = 0,8$, радиус пучка будет равен $b = 0,16 \text{ мм}$. Исходя из этих величин, ток одного луча составит $I_{01} = J_b(\pi b^2) = 0,08 \text{ А}$.

Уравнение (4) можно преобразовать к следующему виду:

$$U_0 \geq \frac{10^7}{39,5 + (\gamma a)^2 \cdot (\lambda/a)^2}, [\text{В}]. \quad (5)$$

Компьютерное моделирование резонансной системы проводилось в программе REZON [10]. Исследовались две конструкции резонаторов, представленные на рис. 1.

В первой конструкции (рис. 1 а) каналы расположены в 2 ряда ($N = 6$). Во второй (рис. 1 б) каналы расположены в 3 ряда ($N = 9$). Щели связи, которые находятся на боковых гранях пролетных труб, создают сильную электромагнитную связь, что превращает четыре парциальных резонатора в единую колебательную систему. Суммарный ток определяется числом лучей N и равен $0,48 \text{ А}$ (для $N = 6$) и $0,72 \text{ А}$ (для $N = 9$).

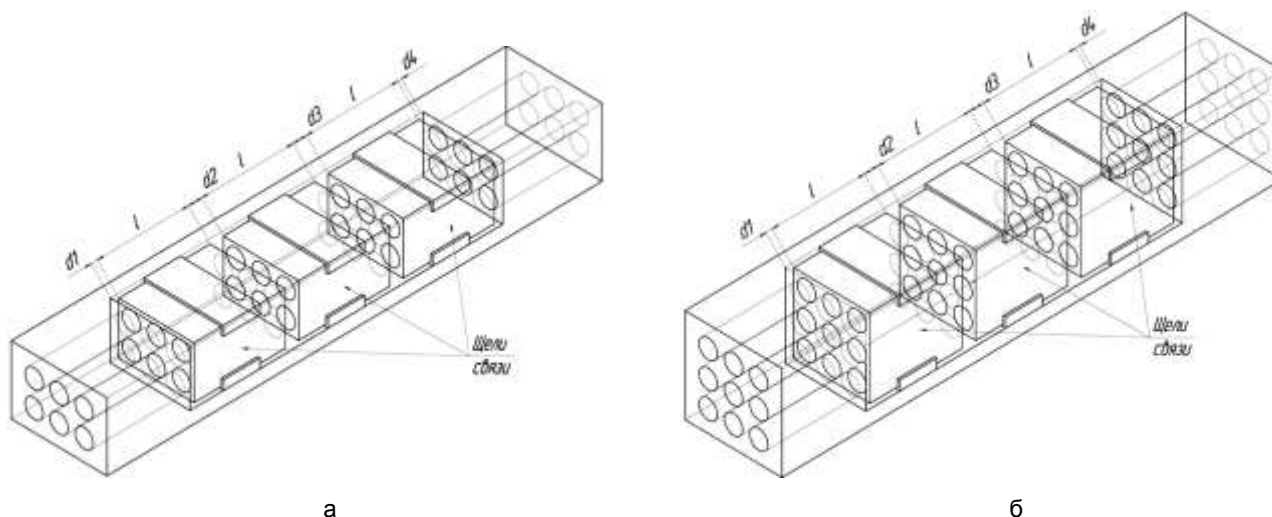


Рис. 1. Компьютерные модели двухрядного (а) и трехрядного (б) четырехзачорных резонаторов

Результаты электродинамического моделирования

Расстояние между центрами зазоров L определялось из известного фазового условия самовозбуждения для π -вида колебаний [11].

$$\gamma L = \frac{\pi}{2} + 2\pi n = 2\pi(0,25 + n), \quad (6)$$

где $n = 0, 1, 2 \dots$ – номер зоны генерации.

Для увеличения КПД в ММРВ требуется, чтобы характер изменения максимального значения напряженности электрического поля E_{zi} в зазорах в направлении движения электронного потока был нарастающим. В данной статье это было достигнуто за счет использования оптимальных длин зазоров.

При этом длины зазоров для двухрядной конструкции оказались равными: $d_1 = 0,134$ мм, $d_2 = 0,296$ мм, $d_3 = 0,296$ мм, $d_4 = 0,138$ мм.

Для трехрядной конструкции оптимальные длины имели следующие значения: $d_1 = 0,282$ мм, $d_2 = 0,564$ мм, $d_3 = 0,564$ мм, $d_4 = 0,281$ мм. Длины пролетных труб были выбраны одинаковыми и равными $l_1 = l_2 = l_3 = l_4 = 2$ мм.

На рис. 2 приведены картины распределения нормированной напряженности электрического поля вдоль пространства взаимодействия для двух конструкций резонаторов.

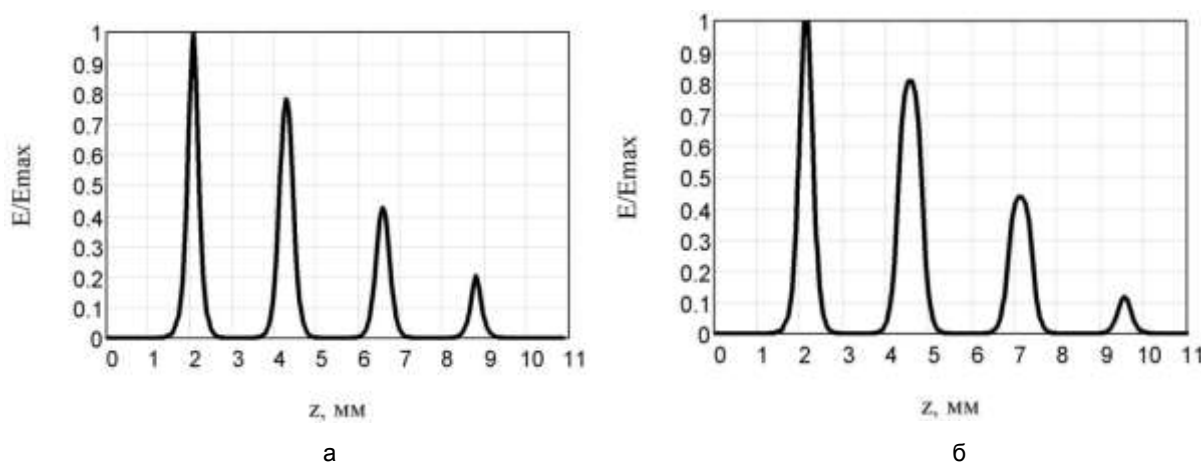


Рис. 2. Распределение нормированной напряженности электрического поля вдоль пространства взаимодействия для двухрядной (а) и трехрядной (б) резонансных систем

Результаты моделирования показали, что в исследуемых колебательных системах могут быть возбуждены разные виды колебаний с синфазным и противофазным распределением полей в зазорах. Однако на заданной частоте $f = 91,0$ ГГц π -вид колебаний имеет наибольшую величину характеристического сопротивления (около 200 Ом).

Результаты численного расчета комплекса электронных и электродинамических параметров. Для определения амплитудных условий самовозбуждения монотронного автогенератора необходимо определить следующий комплекс параметров многозазорного резонатора: его электродинамические параметры (характеристическое сопротивление ρ и собственная добротность Q_0), параметры вносимой нагрузки Q_n , а также электронные параметры (коэффициент взаимодействия M и нормированная проводимость электронного потока G_e / G_0).

Расчет электронных параметров проводился в режиме малого сигнала с помощью уравнений, предложенных Вессель – Бергом в [12]:

$$M = \frac{\left| \int_{-\infty}^{\infty} E_z e^{j\beta_e z} dz \right|}{\int_{-\infty}^{\infty} |E_z| dz}, \quad (7)$$

$$\frac{G_e}{G_0} = \frac{1}{8} \frac{\beta_e (M_-^2 - M_+^2)}{\beta_q}; \quad (8)$$

где β_q – постоянная распространения редуцированной плазменной волны, M_- и M_+ – медленная и быстрая волна пространственного заряда, определяемые как

$$M_{\pm} = \sqrt{\frac{I_0(\gamma b) - I_1(\gamma b)}{I_0(\gamma a)}} \frac{\int E_z(z) e^{-(\beta e \pm \beta q)z} dz}{\int |E_z(z)| dz}. \quad (9)$$

На рис. 3 представлены зависимости коэффициента взаимодействия M и относительной активной проводимости G_e / G_0 от величины ускоряющего напряжения для двухрядной и трехрядной резонансных систем.

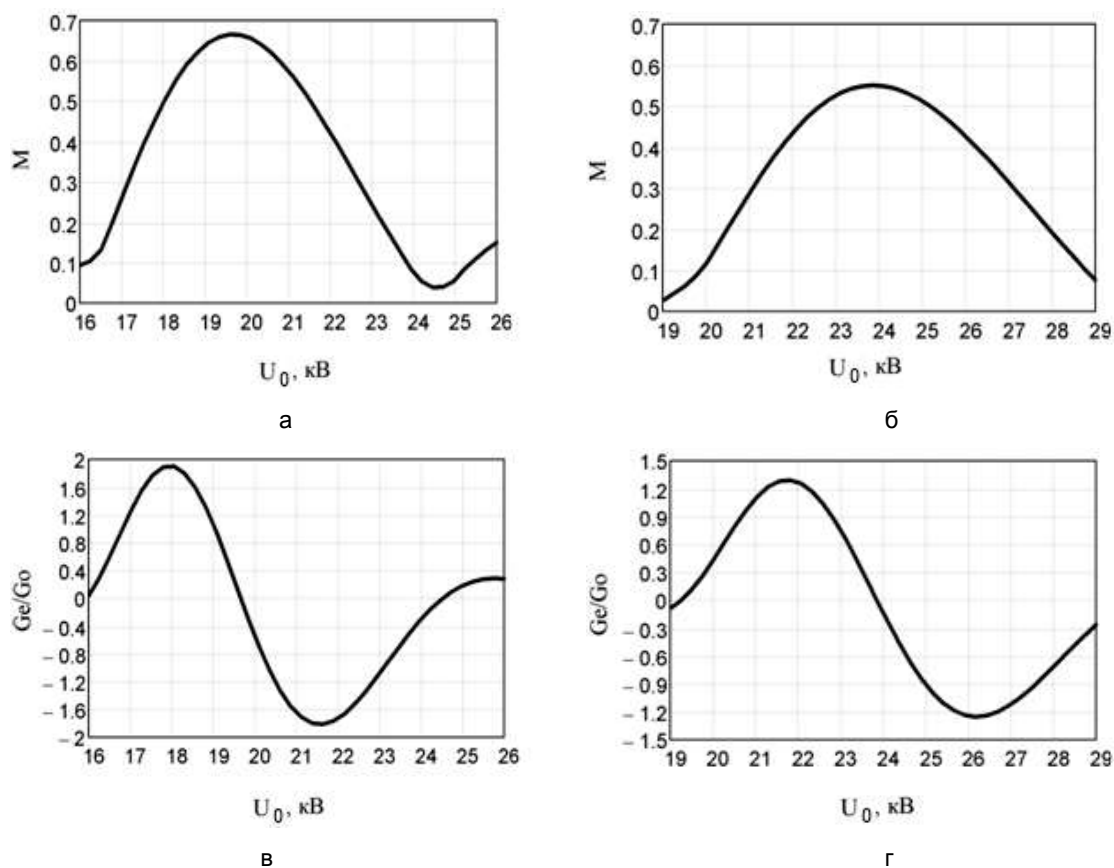


Рис. 3. Зависимость коэффициента взаимодействия для двухрядной (а) и трехрядной системы (б) и активной проводимости для двухрядной (в) и трехрядной системы (г) от ускоряющего напряжения

Из рис. 3 видно, что самовозбуждение монотрона возможно при ускоряющем напряжении около 21 кВ для двухрядной системы и 26 кВ – для трехрядной. При этом величина отрицательной электронной проводимости имеет минимальное значение ($G_e / G_0 = -1,6$ и $G_e / G_0 = -1,2$, соответственно). Параметры двух конструкций представлены в таблице, где обозначены следующие величины: Q_0 – собственная добротность, ρM^2 – произведение характеристического сопротивления на квадрат коэффициента взаимодействия, G_e / G_0 – относительная активная электронная проводимость.

Электронные и электродинамические параметры резонаторов для центрального ряда пролетных каналов

Число лучей, N	Q_0	I_0, A	$\rho, \text{Ом}$	G_e/G_0	M	$U_0, \text{кВ}$
6	226	0.48	142.6	-1.6	0.6	22
9	267	0.72	151.6	-0.9	0.5	25

Проверим, может ли монотрон эффективно работать в режиме автогенерации. Для этого исследуем обе конструкции на возможность реализации режима самовозбуждения.

Для возникновения автоколебаний требуется компенсация проводимости нагруженного резонатора G_n / G_0 электронной проводимостью G_e / G_0 [12]:

$$-\frac{G_e}{G_0} + \frac{G_n}{G_0} = 0. \quad (10)$$

Учтем, что проводимость нагруженного резонатора G_n / G_0 связана с нагруженной добротностью Q_n следующим соотношением:

$$\frac{G_n}{G_0} = \frac{R_0}{\rho \cdot k \cdot Q_n}, \quad (11)$$

где $R_0 = U_0 / I_0$ – сопротивление электронного потока; $k \leq 2$ – коэффициент, учитывающий наличие в выходной цепи пассивных резонаторов.

С учетом (11) уравнение (10) может быть переписано в виде

$$\left| \frac{G_e}{G_0} \right| \geq \frac{U_0}{I_0 \cdot \rho \cdot k \cdot Q_n}. \quad (12)$$

С другой стороны, величину относительного напряжения на резонаторе можно определить следующим образом:

$$\xi = \frac{\tilde{U}}{U_0} = \frac{I_1 / I_0 \cdot M \cdot k \cdot \rho \cdot Q_n \cdot I_0}{U_0}, \quad (13)$$

где I_1 / I_0 – относительная величина первой гармоники конвекционного тока.

Преобразовав (13), получим

$$\xi = \frac{I_1 / I_0 \cdot M \cdot k \cdot \rho \cdot Q_n \cdot I_0}{U_0}. \quad (14)$$

Из (14) найдем величину нагруженной добротности:

$$Q_n = \frac{\xi \cdot U_0}{I_1 / I_0 \cdot M \cdot k \cdot \rho \cdot I_0}. \quad (15)$$

Подставляя уравнение (15) в выражение (12) и сократив соответствующие переменные, запишем первое условие самовозбуждения в виде

$$\left| \frac{G_e}{G_0} \right| \geq \frac{U_0 \cdot I_0 \cdot \rho \cdot k \cdot Q_n \cdot I_1 / I_0 \cdot M}{U_0 \cdot I_0 \cdot \rho \cdot k \cdot Q_n \cdot \xi} = \frac{I_1 / I_0 \cdot M}{\xi}. \quad (16)$$

Учитывая результаты компьютерного моделирования многолучевого монофона, полученные в [4], можно, для определенности задаться следующими значениями параметров взаимодействия: $I_1 / I_0 = 1,37$, $\xi = 1,26$. Кроме того, будем считать величину электронного КПД заданной $\eta_e = 0,4$. Тогда можно сделать вывод, что обе конструкции удовлетворяют первому условию самовозбуждения:

$$\left| \frac{G_e}{G_0} \right| \geq 0,54. \quad (17)$$

Однако условие (17) является недостаточным для определения вероятности самовозбуждения, так как оно не учитывает условие нагрузки резонатора, приводящее к изменению нагруженной добротности Q_n согласно уравнению (15). Ее величину можно определить из этого уравнения, используя заданные выше параметры взаимодействия. Тогда для двухрядной конструкции резонатора $Q_n = 246$, а для трехрядной – 211. Отсюда следует, что двухрядная система не удовлетворяет условию самовозбуждения из-за больших потерь в резонаторе ($Q_n > Q_0$).

Поэтому при дальнейшем рассмотрении будем рассматривать только трехрядную конструкцию резонатора монофона.

Теперь можно дать оценку выходной мощности прибора $P_{ВЫХ}$:

$$P_{ВЫХ} = \eta_e (1 - Q_n / Q_0) \cdot I_0 \cdot U_0 = 1510 \text{ Вт}. \quad (18)$$

При этом полный КПД в нагрузке равен $\eta = P_{ВЫХ} / (I_0 U_0) = 1510 / 18000 = 8,4\%$.

Заключение

В данной статье впервые показана возможность создания в W -диапазоне длин волн 9-лучевой конструкции монотрона, четырехзворный резонатор которого возбуждается на π -виде колебаний и связан с нагрузкой через дополнительные пассивные резонаторы. Полученные в малосигнальном приближении данные подтверждают возможность получения на частоте 91 ГГц выходной мощности в режиме автогенерации около 165 кВт при полном КПД 864%, величине ускоряющего напряжения 25 кВ и плотности тока в луче 100 А/см². При этом в качестве источника термоэмиссии в монотроне может быть использован скандатный катод. Возможно также использование автоэмиссионных источников тока.

Результаты исследования были получены при выполнении научно-исследовательской работы в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности по заданию № 8.1065.2014/К.

ЛИТЕРАТУРА

1. Современные радиоэлектронные системы терагерцового диапазона / В.М. Исаев и др. // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. № 4(34). С. 5-21.
2. Roitman A., Berry D., Steer B. State-of-the-Art W-band Extended Interaction Klystron for the CloudSatProgram // IEEE Transactions on Electron Devices. 2005. Vol. 52. № 5. P. 895-898.
3. Пат. 2474914 Российская Федерация, МПК⁷ Н 01 J 25/74. Мощный СВЧ генератор монотронного типа / Н.А. Акафьева, А.Ю. Мирошниченко, В.А. Царев; заявитель и патентообладатель «ГОУ ВПО «СГТУ». 2011133860/07; заявл. 11.08.2011; опубл.: 10.02.2013, Бюл. № 4. 13 с.: ил.
4. Akafyeva N.A., Miroshnichenko A.Yu., Tsarev V.A. Some Results of Investigation of Power Multi-beam Monotron Oscillator // Proceeding of International Vacuum Electronics Conference. USA, Monterey, 2012. P. 87-88.
5. О создании приборов с большими углами пролета / В.П. Панов и др. // Вестник РГРТУ. 2010. № 2 (32). С. 110-113.
6. Kostov K.G., Barroso J.J. Triple-beam monotron // IEEE Transactions on Plasma Science. 2002. Vol. 30. № 3. P. 1169-1175.
7. Царев В.А., Мучкаев В.Ю. Теоретическое исследование путей увеличения выходной мощности многолучевого микроволнового генератора монотронного типа К-диапазона, выполненного на основе трехзворного сплит-резонатора с неоднородным полем // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 9. С. 155-158.
8. Пугнин В.И., Юнаков А.Н. Проблемы создания мощных широкополосных многолучевых клистронов // Радиотехника. 2004. № 2. С. 17-21.
9. Капустин В., Ли И. Скандатные катоды СВЧ-приборов: достижения и перспективы // Электроника: наука, технология, бизнес. 2015. № 2. С. 124-136.
10. Мучкаев В.Ю., Царев В.А. Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ № 2011611748 от 24.02.2011 г.
11. Акимова Т.С., Федяев В.К., Горлин О.А. Условия самовозбуждения питрона // Вестник Рязан. гос. ун-та. Вып. 33. Электроника. 2010. № 3. С. 64-68.
12. Wessel-Berg T. A general theory of klystrons with arbitrary, extended interaction fields. Stanford: Stanford U., Ginzton Lab., 1957. 291 p.

Нестеров Дмитрий Анатольевич – аспирант кафедры «Электронные приборы и устройства», младший научный сотрудник Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Царев Владислав Алексеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Электронные приборы и устройства» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Nesterov – Postgraduate
Department of Electronic Devices
and Equipment
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladislav A. Tsarev – Dr. Sc., Professor
Department of Electronic Devices
and Equipment
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.07.15, принята к опубликованию 10.11.15

МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ

УДК: 538.97:621.375.826

Д.А. Бессонов, И.А. Попов, Т.Н. Соколова, Е.Л. Сурменко, Ю.В. Чеботаревский

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ КОРОТКОГО И УЛЬТРАКОРОТКОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ПРЕЦИЗИОННОЙ МИКРООБРАБОТКИ МАТЕРИАЛОВ. ОБЗОР И АНАЛИЗ

Рассмотрены особенности технологического применения пико- и фемтосекундного лазерного излучения для операций прецизионной резки, прошивки и скрайбирования материалов электронной техники.

Лазер, пикосекундный импульс, фемтосекундный импульс, холодная абляция, микрообработка

D.A. Bessonov, I.A. Popov, T.N. Sokolova, E.L. Surmenko, Yu.V. Chebotarevsky

APPLICATION SPECIFICS OF ULTRAFAST LASERS IN PRECISE MICROMACHINING: OVERVIEW AND ANALYSIS

The paper deals with technological details required in application of picosecond and femtosecond lasers for precise cutting, drilling and scribing operations of electronic materials.

Laser, picosecond pulse, femtosecond pulse, cold ablation, micromachining

С повышением степени миниатюризации и снижением массогабаритных характеристик современных электровакуумных приборов требования к качеству их конструктивно-технологической базы, воспроизводимости геометрических и физических параметров их комплектующих, обеспечению стабильных эксплуатационных свойств и необходимой механической прочности их структурных элементов значительно возросли. В связи с этим потребовалась разработка новых технологий изготовления прецизионных микроструктур различного назначения, например миниатюрных матричных автоэмиссионных катодов, позволяющих повысить производительность, снизить себестоимость, обеспечить экологическую чистоту производства и нужное качество выпускаемой продукции. Очевидно, что в основу таких технологий должны быть положены нетрадиционные способы (принципы) формирования подобного рода микроструктур, например, использующие специфические особенности импульсного короткого и ультракороткого воздействия лазерного излучения на вещество.

Преимущества применения лазерных технологий для решения подобного рода задач хорошо известны. Они обусловлены:

- гибкостью, надежностью и высокой производительностью лазерных технологических процессов;
- простотой программирования процессов обработки материалов с возможностью придания практически любой конфигурации траектории движения пятна лазерного воздействия;
- многофункциональностью лазерного оборудования, позволяющей совмещать в одном процессе недостижимые для других технологий сочетания скорости и уникальной точности обработки;
- легкостью перенастройки лазерного оборудования на выполнение различных технологических операций и возможностью придания практически любой формы обрабатываемым деталям;

– локальностью воздействия только на участок ограниченный размерами лазерного пятна без возмущения остального объема обрабатываемого материала, нарушения его внутренней структуры, физических свойств и механических характеристик;

– отсутствием механического контакта в процессе обработки.

подавляющее большинство лазерных технологий, получивших на сегодняшний день наибольшее распространение в машиностроительном производстве и приборостроении, основано на быстрым интенсивном нагреве обрабатываемого материала сфокусированным интенсивным когерентным излучением до весьма высоких температур и в зависимости от вида технологического процесса его дальнейшем плавлении или испарении. Для реализации таких процессов в импульсном режиме, как правило, используется лазерное излучение с длительностью импульсов миллисекундного диапазона. При импульсном воздействии лазерного излучения в этом диапазоне длительностей разрушение межмолекулярных связей в материале является вторичным следствием высоких температур, возникающих при поглощении энергии излучения веществом. И, несмотря на локальность воздействия, это во многих случаях влечет за собой реструктуризацию обрабатываемого материала и возникновение в окрестностях зоны обработки нежелательных побочных термических эффектов в виде оплавленных участков или микротрещин при обработке хрупких материалов.

С недавним появлением ряда промышленных лазеров с более коротким импульсным излучением (10^{-8} - 10^{-14} с) и сверхвысокой интенсивностью (10^{10} - 10^{14} Вт/см²) указанных выше негативных последствий лазерного воздействия удается избежать и, более того, достичь нового уровня её качества. И в этом ряду особое место отведено наносекундным и пикосекундным лазерам в силу предоставляемых ими не доступных ранее специфических возможностей прецизионной микрообработки материалов.

Высокая вероятность успешного применения наносекундных и пикосекундных лазеров в целях создания технологических процессов прецизионной микрообработки материалов была предсказана более чем три десятка лет назад, когда различные миллисекундные, а несколько позднее и наносекундные лазеры продемонстрировали новые возможности использования импульсных лазеров в производстве элементов и узлов компонентной базы изделий электронной техники.

В отличие от традиционных способов микрообработки сфокусированными наносекундными и пикосекундными импульсами достаточной энергии позволяет не только избежать большинства побочных эффектов, в том числе и температурных, но и создать качественно новые технологии так называемых «труднообрабатываемых материалов». И в этом смысле весьма примечателен тот факт, что при переходе к более коротким длительностям с одновременным увеличением вкладываемой в импульс пиковой мощности уменьшается зависимость результата лазерного воздействия на материал от его поглощающих свойств. Это делает технологическое оборудование на базе таких лазеров более универсальным инструментом обработки.

При переходе к более коротким и более мощным импульсам физическая картина взаимодействия излучения с обрабатываемым материалом принципиально изменяется. С уменьшением длительности импульсов и ростом их мощности температурное влияние перестает быть определяющим, и основную роль в механизме разрушения вещества начинают выполнять процессы непосредственного перехода энергии из возбужденных состояний. Ниже при описании процессов удаления вещества с поверхности обрабатываемого материала за счет воздействия лазерных импульсов с длительностью порядка 10^{-8} - 10^{-14} с и с интенсивностью в интервале 10^{10} - 10^{14} Вт/см² будем использовать термин «абляция», получивший широкое распространение в научной литературе за два последних десятилетия сначала в зарубежных источниках, а затем и в русскоязычной литературе.

Термин «абляция» является междисциплинарным. Им обычно обозначают совокупность сложных физико-химических процессов, результатом которых является удаление (унос) вещества с поверхности или из объема твердого тела. В физике он употреблялся задолго до появления лазеров для обозначения удаления вещества в электрическом разряде, в потоке горячего газа или плазмы. Подавляющее большинство исследователей [1-5] под лазерной абляцией подразумевает процесс разрушения твердого вещества, аналогичный испарению или сублимации, обычно осложненный наличием конденсированной фазы в продуктах разрушения. В зависимости от характера температурного состояния обрабатываемой среды различают два режима лазерной абляции: тепловой – термическое испарение (жесткая абляция) и нетепловой – холодная абляция (мягкая абляция).

По дозе облучения лазерная абляция носит пороговый характер [5-8]. Плотность энергии порога абляции для металлов находится в пределах от 1 до 10 Дж/см². Для большинства неорганических

диэлектриков он составляет 0,5-2 Дж/см², для органических материалов 0,1-1 Дж/см² [9]. После нескольких импульсов порог абляции может уменьшиться в связи с накоплением дефектов.

Основной мотивацией для использования коротких лазерных импульсов наносекундной длительности в технологиях прецизионной микрообработки является снижение в её процессе негативного теплового воздействия на материал. При воздействии наносекундного лазерного импульса с плотностью энергии выше порога абляции взаимодействие происходит длительное время, достаточное для передачи тепла кристаллической решётке, её нагреву, быстрому плавлению и испарению. При этом часть материала превращается в плазменный факел, расширяющийся в течение нескольких пикосекунд. Часть энергии, поглощенной плазменным факелом, передаётся на твердую или расплавленную поверхность кратера, продолжая способствовать удалению материала из кратера. Расплавленный материал в виде капель выносится из зоны «тепловой» абляции под действием градиента давления вызванного расширением плазменного факела. Глубина распространения тепла внутрь материала не превышает величины

$$\approx \sqrt{4k\tau},$$

где τ – длительность импульса, а k – температуропроводность материала. В качестве примера на рис. 1 приведена фотография формы лазерного факела при воздействии на поверхность образца из стеклоглерида СУ-2000 импульса лазерного излучения наносекундной длительности, полученная с помощью видеокамеры VAA-135 производства фирмы EVS.



Рис. 1. Форма лазерного факела при наносекундной длительности импульса

На фотографии видны разветвляющиеся следы движения светящихся частиц удаляемого материала с увеличением угла наклона треков их разлета от 30 до 45° относительно первоначального направления, что свидетельствует о наличии нагрева вещества за счет лазерного воздействия до температуры его разрушения, сопровождающегося появлением парогазового облачка, первичных и вторичных твердых частиц и частиц каплевидной формы, причем скорость разлета вторичных частиц меньше начальной скорости истечения материала примерно в 1,5-2 раза. Одновременно с этим явлением наблюдается процесс прямого перехода вещества в парогазовое состояние без дробления на более мелкие части, при этом заметного изменения скорости истечения вещества не наблюдается. Вынос вещества из зоны воздействия продолжался и после окончания импульса лазерного излучения. Промежуток времени, в течение которого происходил вынос вещества из зоны обработки, при нано-

секундном воздействии лазерного излучения находился экспериментально путем регистрации времени свечения плазменного факела. На рис. 2 приведена осциллограмма свечения плазменного факела, образующегося при воздействии импульса лазерного излучения с длиной волны 1064 нм, энергией 120 мДж и длительностью 10 нс на поверхность пластины из монолитного стеклоглерода марки СУ-2000. Измеренное время выноса вещества из зоны воздействия излучения радиусом $r_0 = 20$ мкм в описанных выше условиях составило 5 мкс, что превышает длительность импульса в 500 раз.

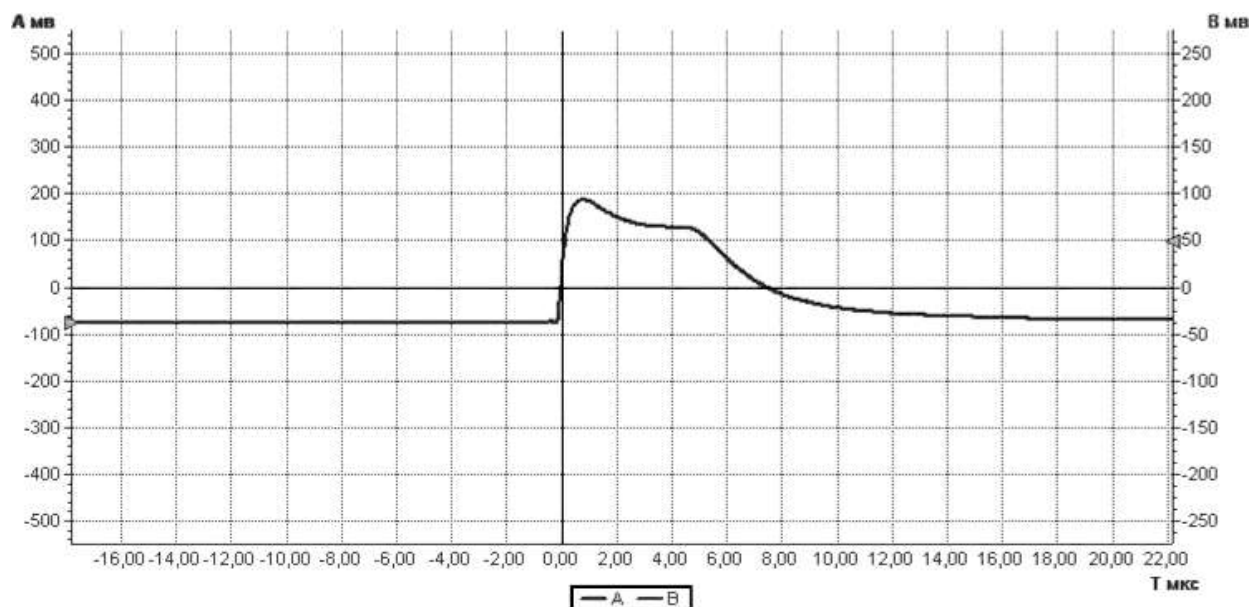


Рис. 2. Осциллограмма длительности свечения плазменного факела, возникающего при воздействии лазерного импульса длительностью 10 нс на поверхность монолитного стеклоглерода

Так как в основе наносекундного импульсного лазерного воздействия на вещество лежит процесс специфического поглощения волн для разогрева материала и «абляции выпариванием», при использовании наносекундных лазеров в технологиях микрообработки полностью избежать появления побочных негативных тепловых эффектов не удастся. Кроме того, эффективность обработки с применением таких лазеров остается в значительной степени зависящей от поглощающих свойств обрабатываемого материала. В связи с этим наносекундные лазеры должны каждый раз выбираться для длины волны поглощения конкретного обрабатываемого материала. Это зачастую порождает противоречивые технологические требования, когда наилучшая длина волны поглощения не соответствует наилучшей длине волны при фокусировке на специфический размер области обработки или труднодостижима преобразованием длин волн.

При переходе к импульсному лазерному воздействию пикосекундной длительности с интенсивностью излучения, превышающей порог холодной абляции, негативные термические последствия практически удастся исключить. Дело в том, что при микрообработке импульсами пикосекундной длительности реализуется принципиально отличный от традиционного физический процесс взаимодействия лазерного излучения с веществом. В его основе лежит механизм так называемого кулоновского взрыва. Суть этого физического процесса состоит в том, что интенсивное электрическое поле пикосекундных импульсов с плотностью мощности порядка 10^{10} - 10^{14} Вт/см² отрывает электроны малой массы от атомов, после чего одноименно положительно заряженные атомы, отталкиваясь друг от друга, порождают кулоновский взрыв, сопровождающийся разрушением атомно-ядерного каркаса обрабатываемого материала с образованием поверхностного облака плазмы [9-17].

Микрообработка с применением импульсного пикосекундного лазерного излучения фактически не сопровождается никакими температурными побочными эффектами. Высокое качество лазерного луча с $M^2 > 1,5$ (характеризует соотношение теоретического диаметра сфокусированного одномодового (чистого) Гауссова пучка и фактического диаметра) дает возможность сфокусировать излучение в области от 5 до 50 мкм, что позволяет вести обработку элементов соответствующих размеров. При наиболее распространенном на практике диаметре фокусировки рабочей области в 25 мкм для превышения порога абляции в 1 Дж/см² требуется энергия импульса приблизительно в 10 мкДж.

За один импульс в области фокуса снимается от 20 до 100 нанометров материала. Наибольшая эффективность достигается при обработке твердых материалов с размерами зоны лазерного воздействия от 1 до 50 мкм. Существенным недостатком, ограничивающим применение пикосекундных лазеров в промышленном производстве, является их низкая производительность и высокая стоимость эксплуатации. На рис. 3 приведены данные сравнительного анализа качества и скорости лазерной резки пластины кремния, проведенного в [18].

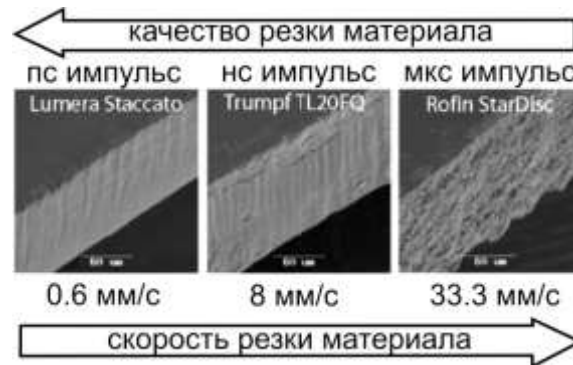


Рис. 3. Поверхность реза пластины кремния лазерным излучением различной длительности импульса

Увеличение энергии импульса свыше 50 мкДж для повышения производительности обработки не приводит к желаемому результату в связи с тем, что облако плазмы, образующееся при взаимодействии излучения такой интенсивности с материалом, уже не может отделиться (оторваться) от обрабатываемой поверхности вследствие того, что оно становится плотнее. Хуже того, оно начинает играть роль определенного рода теплоносителя, уничтожающего эффект холодной абляции с возможным появлением негативных температурных последствий. Увеличение частоты следования импульсов свыше 1 МГц также не приводит к повышению производительности обработки, так как при этом происходит наложение облака плазмы от предыдущего импульса на облако плазмы от текущего импульса (теневой эффект), что приводит с повышением частоты следования импульсов к постепенному уменьшению эффективности обработки. Анализ изложенного выше позволяет сделать вывод о том, что для целей микрообработки материалов элементов и узлов электронной техники наиболее рациональный диапазон энергии импульса пикосекундной длительности лежит в пределах от 10 до 50 мкДж при частоте следования импульсов, не превышающей 1 МГц.

Для повышения производительности микрообработки различных материалов с применением пикосекундных лазеров немецкая фирма-производитель «LUMERALASER» предложила пакетный режим [19]. Проведенные в опытно-экспериментальной лаборатории упомянутой выше фирмы исследования показали, что формирование пакетов из нескольких пикосекундных импульсов, следующих с отставанием друг от друга порядка наносекунд (режим высокочастотных пульсаций), не только увеличивает скорость микрообработки (рис. 4), но и значительно улучшает её качество, например уменьшает шероховатость поверхности несквозных отверстий.

Экспериментальные исследования влияния частоты следования импульсов внутри пакета на производительность обработки [19] показали, что путем повышения частоты следования импульсов внутри пакета в режиме высокочастотных пульсаций можно достичь значительного увеличения производительности обработки (рис. 5). При этом рост объема удаляемого вещества с увеличением частоты следования импульсов внутри пакета оказался существенно зависящим от вида обрабатываемого материала. Наилучшие результаты были получены для стекла. В экспериментах с пикосекундными лазерами мощностью 50 Вт при обработке образцов из боросиликатного стекла в лабораторных условиях скорость удаления материала в зависимости от вида обработки (прошивка, резка, скрайбирование) и технологических параметров (глубина/диаметр отверстия, ширина/глубина) достигала 20-60 мм³/мин, в то время как повышение производительности при обработке нержавеющей стали оказалось значительно меньшим – всего до 10 мм³/мин. При обработке кремния скорость абляции с увеличением частоты следования импульсов в пакете достигала 30 мм³/мин, результаты воздействия на органические и биоматериалы были намного скромнее – до 10 мм³/мин [20-21].

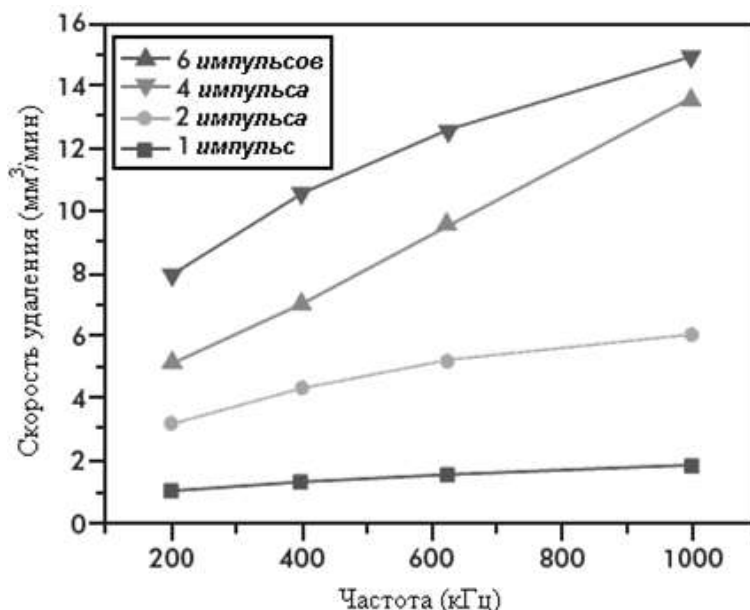


Рис. 4. Графики поведения скорости удаления обрабатываемого материала в режиме высокочастотных пульсаций от 1 до 6 импульсов в пакете при частотах их следования от 200 кГц до 1 МГц

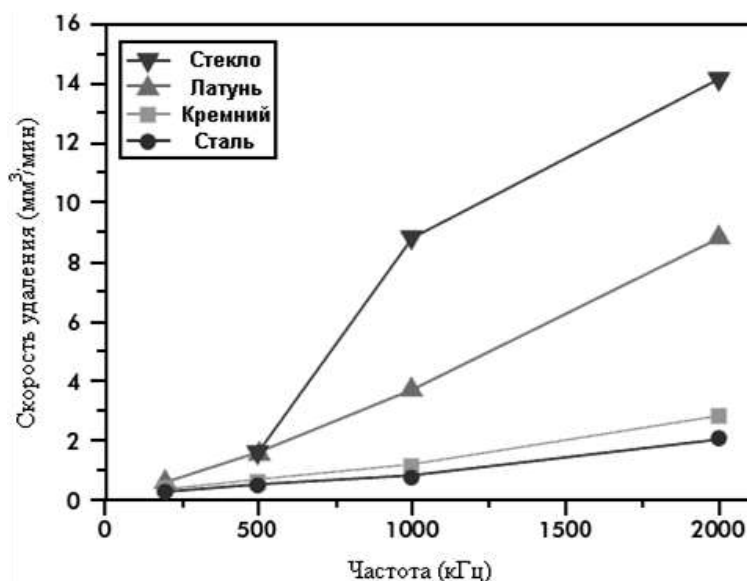


Рис. 5. Влияние частоты следования импульсов в пакете на скорость удаления материала

С учетом результатов проведенного выше исследования можно сделать вывод о том, что микрообработка сфокусированными пикосекундными импульсами достаточной энергии позволяет не только избежать большинства побочных эффектов, в том числе и температурных, но и создать качественно новые технологии для так называемых «труднообрабатываемых материалов». В силу специфики физического процесса взаимодействия лазерного излучения с веществом пикосекундные лазеры подходят для любого материала независимо от его поглощающих свойств, что делает технологическое оборудование на базе пикосекундных лазеров универсальным инструментом обработки.

Можно ожидать, что переход к более коротким лазерным импульсам порядка фемтосекундной длительности позволит повысить эффективность воздействия лазерного излучения и получить еще более качественные эффекты при микрообработке материалов. Однако на данный мо-

мент возможность использования фемтосекундных лазеров в промышленном производстве мало изучена. Существуют весьма обоснованные опасения в том, что огромная мощность фемтосекундных импульсов, требующая очень точного преобразования, будет порождать нелинейные побочные эффекты при обработке материалов, негативно сказывающиеся на её качестве. Фемтосекундные лазеры более сложны, часто выходят из строя и обладают меньшей средней мощностью при более высокой стоимости их эксплуатации. Кроме того, качество их работы весьма чувствительно к влиянию внешней среды, что влечет за собой необходимость создания особых условий для их размещения, исключающих воздействие внешних вибраций и других негативных факторов. На сегодняшний день наибольшее распространение получило их использование не в промышленных целях, а в лабораторных условиях при исследовании кинетики быстропротекающих физических и биологических процессов. В связи с тем, что электрических полей, генерируемых наносекундными и пикосекундными лазерными импульсами, вполне достаточно для инициации процесса абляции выпариванием или холодной абляции в обрабатываемом материале, переход к более коротким импульсам в технологических целях на данном этапе исследования представляется нецелесообразным. Он только усложнит процедуру принятия конструктивных решений при формировании лазерных технологических комплексов для целей микрообработки материалов электронной техники.

Подводя итоги проведенного исследования, можно сделать вывод о том, что импульсное лазерное воздействие наносекундной и пикосекундной длительностей с успехом может быть использовано при создании конструктивно-технологической базы различных изделий электронной техники. Однако при разработке технологических процессов микрообработки с применением короткого и ультракороткого импульсного лазерного излучения наряду с отмеченными выше позитивными факторами надо учитывать и возможные негативные последствия, которые могут иметь место при таких воздействиях на хрупкие материалы. Дело в том, что удаление вещества с обрабатываемой поверхности в процессе холодной абляции или абляции выпариванием в столь короткие промежутки времени со столь высокой скоростью его истечения создает в зоне воздействия излучения область высокого давления, способного в некоторых случаях вызвать микроразрушение хрупких материалов за пределами зоны обработки, что может негативно сказаться на качестве получаемого в процессе микрообработки продукта.

Работа выполнена на оборудовании Поволжского филиала ЦКП «Лазерные и оптические технологии» (ФЦП, ГК № 02.552.11.7021 от 08.05.2007; базовая часть государственного задания Министерства образования и науки Российской Федерации 2014-2016 гг. (СГТУ-147).

ЛИТЕРАТУРА

1. Laser Ablation of Electronic Materials: Basic Mechanisms and Applications / eds. E. Fogarassy, S. Lazare // Proc. European Materials Res. Vol. 4. Amsterdam: North-Holland, 1992.
2. Laser Ablation / Eds. E. Fogarassy, D. Geohegan, M. Stuke // Proc. European Materials Res. Vol. 55. Amsterdam: Elsevier, 1996.
3. Laser Ablation: Proc. of the Fourth Intern / Eds. R. Russo et al. // Conf. on Laser Ablation, COLA-IV. Amsterdam: North-Holland, 1998.
4. Bäuerle D. Laser Processing and Chemistry. 3rd ed. Berlin: Springer, 2000.
5. Анисимов С.И., Лукьянчук Б.С. Избранные задачи теории лазерной абляции // УФН. 2002. Т. 172. № 3. С. 301-333.
6. Emil N. Sobol Phase transformations and ablation in laser-treated solids. New York: Wiley, 1995. 332 p.
7. Bäuerle D. et al. in Ref. [3] p. 39.
8. Bäuerle D. et al. in Excimer Lasers / Ed. L. D. Laude // NATO ASI Series, Ser. E. Vol. 265. Dordrecht: Kluwer Academic Publ., 1994. p. 39.
9. Bäuerle D. Laser Processing and Chemistry. Berlin: Springer, 2000.
10. Ruf A. Modellierung des Perkussionsbohrens von Metallen mit kurz- und ultrakurzgepulsten Lasern: Ph.D. thesis. Universitaet Stuttgart, 2004
11. Behavior $X^{(2)}$ of during a laser-induced phase transition in GaAs / E.N. Glezer, Y. Siegal, L. Huang, E. Mazur // Phys. Rev. B. 1995. № 51. P. 9589-9596.

12. Miotello A., Kelly R. Laser-induced phase explosion: new physical problems when a condensed phase approaches the thermodynamic critical temperature // *Appl. Phys. A Suppl.* 1999. № 69. P. S67-S73.

13. Thermal and nonthermal melting of gallium arsenide after femtosecond laser excitation / K. Sokolowski-Tinten, J. Bialkowski, M. Boing et al. // *Phys. Rev. B.* 1998. № 58. P. R11805-R11808.

14. *Molecules and Clusters in Intense Laser Fields* / Ed. by Jan Posthumus. Cambridge: Cambridge University, 2001. 272 p.

15. Tam A.C., Park H.K., and Grigoropoulos C.P. Laser cleaning of surface contaminants // *Appl. Surf. Sci.* 1998. 127-129. P. 721-725.

16. Brand J.L., Tam A.C. Mechanism of picosecond ultraviolet laser sputtering of sapphire at 266 nm // *Appl. Phys. Lett.* 1990. № 56. P. 883-885.

17. Laser processing of sapphire with picosecond and sub-picosecond pulses / D. Ashkenasi, A. Rosenfeld, H. Varel et al. // *Appl. Surf. Sci.* 1997. № 120. P. 65-80.

18. Sugioka K., Meunier M., Piquere A. *Laser Precision Microfabrication* // 1st Edition. Springer Series in Materials Science. Vol. 135. XVI. 344 p.

19. Muller D. Picosecond Lasers for High-Quality Industrial Micromachining / D. Muller // *Photonics Spectra.* November, 2009. P. 46-47.

20. Weingarten K. High Energy Picosecond Lasers: Ready for Prime Time // *LTJ.* May 2009. № 3. P. 51-54.

21. Weingarten K. Optimizing cold ablation processing with picosecond micromachining // *Laser+Photonics.* 2012. № 3. P. 44-46.

Бессонов Дмитрий Александрович – аспирант кафедры «Приборостроение» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Dmitry A. Bessonov – Postgraduate Department of Instrument making Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Попов Иван Андреевич – кандидат технических наук, инженер учебно-исследовательской лаборатории лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ivan A. Popov – Ph.D., Engineer of Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Соколова Татьяна Николаевна – кандидат технических наук, заведующий учебно-исследовательской лабораторией лазерной техники и технологии Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatiana N. Sokolova – Ph.D., Head of Educational-Research Laboratory of Laser Technics and Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сурменко Елена Львовна – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Сварка и металлургия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena L. Surmenko – Ph.D., Associate Professor Department of Welding and Metallurgy Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Чеботаревский Юрий Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная математика и системный анализ» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri V. Chebotarevsky – Dr. Sc., Professor Department of Applied Mathematics and Systems Analysis Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.07.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.86.001

А.Н. Васин, Б.М. Изнаиров, И.В. Злобина, А.Г. Мирошкин, Г.Х. Мукатова**ВЕРОЯТНОСТНЫЙ РАСЧЁТ НАПРЯЖЁННОГО СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕМЕНТОВ ШРУС***Выявлен новый метод расчета напряженного состояния элементов ШРУС, в результате которого увеличиваются его прочность и работоспособность.*

Шарнир, контактная группа, прочность, работоспособность

A.N. Vasin, B.M. Iznairov, I.V. Zlobina, A.G. Miroshkin, G.H. Mukatova**PROBABILITY CALCULATIONS OF THE STRESS STATE
OF CONSTANT VELOCITY JOINTS***The paper presents a new method for calculating the strained state of the elements in constant velocity joints, which provides an increase in their durability and performance.*

Joint, contact group, strength, performance efficiency

В технической литературе [1-3] представлены различные конструкции шарниров равных угловых скоростей (ШРУС). Расчёт этих узлов на прочность производится разработчиками по существующим традиционным методикам, которые основаны на детерминированном подходе, использующем эмпирические или полумэмпирические зависимости. Возникающие несоответствия между результатами проектных расчётов и эксплуатационными свойствами объектов расчётов устраняются путём введения в расчётные формулы большого числа эмпирических коэффициентов, среди которых превалирует по величине коэффициент запаса прочности.

Этот общий недостаток существующих методик расчётов является следствием слабого учёта реальных условий взаимодействия рабочих элементов и, в частности, случайного характера процессов этих взаимодействий. Отсутствие методики расчёта, адекватно учитывающей случайный характер процессов, происходящих в проектируемых объектах, особенно в зоне контакта поверхностей их рабочих элементов, приводит к необходимости проведения большого числа дорогостоящих и зачастую бесплодных экспериментов. При разрушении таких механизмов в процессе их эксплуатации причины видят, прежде всего, в неправильной эксплуатации и т.д., а ошибки проектирования не могут быть обнаружены или признаны таковыми, поскольку результаты расчётов полностью соответствуют общепризнанным методикам. Это положение не может удовлетворить требования к современной технике, особенно используемой в потенциально опасных объектах; в механизмах, определяющих безопасность людей; дорогостоящих изделиях.

Один из возможных путей наиболее общего анализа контактных взаимодействий в этих механизмах заключается в следующем [2].

Пусть имеется механизм, включающий K пар элементов, предназначенных для передачи рабочих сил и моментов. Допустим, что профили рабочих поверхностей этих элементов в некоторой произвольной декартовой системе координат описываются уравнениями:

$$\varphi_1(x_1, y_1, z_1) = 0; \quad \varphi_2(x_2, y_2, z_2) = 0. \quad (1)$$

Элементы, передающие силовые воздействия, расположены с некоторым шагом, номинальное значение которого равно S . Шаг S имеет погрешности систематического и случайного характера, укладываемые в некоторую величину допуска. Если элементы механизма собраны без предварительного натяга, между их рабочими поверхностями образуются зазоры, имеющие вследствие погрешности шага различную величину в различных парах. Если к рабочему органу этого механизма приложить элементарную внешнюю силу, в одной из пар рабочих элементов возникает в общем случае точечный контакт.

С точки зрения рассмотрения закономерностей передачи силовых воздействий удобно ввести новую систему координат XYZ с центром O в точке первоначального контакта и одну из координатных

осей совместить с направлением шага силовых элементов механизма (или с каким-либо другим характерным направлением, например приложения силы и т.п.). Эта ось в зависимости от конструкции механизма может быть прямолинейной, круговой, винтовой и др. Допустим, это будет ось OZ .

Тогда уравнения можно переписать относительно этой координаты в новой системе:

$$z_1 = f_1(x, y); \quad z_2 = f_2(x, y). \quad (2)$$

Имея указанные уравнения, можно найти величины зазоров или натягов между соответствующими точками рабочих поверхностей:

$$h = z_1 - z_2; \quad (3)$$

$$h = f_1(x, y) - f_2(x, y) = f(x, y). \quad (4)$$

Известно, что величина контактных деформаций зависит от величины действующих на область контакта сил:

$$\alpha_i = \alpha(Q_i), \quad (5)$$

где α_i – упругая контактная деформация рабочих поверхностей i -й пары рабочих элементов; Q_i – часть внешней силы, приходящаяся на i -ю пару.

Очевидно также, что

$$Q = \sum_{i=1}^m Q_i, \quad (6)$$

где Q – полная величина внешней силы, действующей на все контактирующие пары рабочих элементов; m – количество пар рабочих элементов, находящихся в контакте в данный момент.

Упругая деформация тел под действием силы Q_i определяется выражением

$$\alpha := C \cdot Q_i^{\frac{n}{n+1}}; \quad (7)$$

где

$$C = \frac{n+1}{n-\lambda} \cdot k(l) \cdot (V_1 + V_2)^{\frac{n}{n+1}} \cdot B^{\frac{1}{n+1}}, \quad (8)$$

где α_i – суммарная деформация поверхностей i -й контактной группы под действием приходящейся на неё составляющей Q_i внешней силы Q ; λ – коэффициент, определяемый из графиков 1п и 2п [2]; V_1, V_2 – упругие постоянные материалов контактирующих тел.

$$V := \frac{1 + \mu^2}{E}, \quad (9)$$

где μ – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; $k(l)$ – полный эллиптический интеграл 2-го рода.

Согласно (6) можем записать

$$Q = Q_1 \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{h_i}{\alpha_i}\right)^{\frac{n+1}{n}}. \quad (10)$$

Из выражения (10)

$$Q_1 = \frac{Q}{\sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{h_i}{\alpha_i}\right)^{\frac{n+1}{n}}}. \quad (11)$$

Математическое ожидание величины h_m :

$$\overline{h_m} = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sigma; \quad (12)$$

$$Mh(\varphi) = \frac{k}{\sigma^2} C_{k-1}^{i-1} \int_0^{\infty} h_m^2 e^{-\frac{h_m^2}{2\sigma^2}(k-i+1)} \cdot \left(1 - e^{-\frac{h_m^2}{2\sigma^2}}\right)^{i-1} dh_m. \quad (13)$$

Максимальное контактное напряжение на площадке контакта в i -й группе:

$$\sigma_{\kappa_{\max}} = \frac{Q_i \cdot k_n}{\pi \cdot a_i \cdot b_i}, \quad (14)$$

где

$$b_i = \lambda \left(\frac{Q_i (V_1 + V_2)}{B} \right)^{\frac{1}{n+1}};$$

$$a_i = b_i \sqrt{1 - e^2},$$

где e – эксцентриситет площадки контакта; b_i – большая полуось площадки контакта; a_i – малая полуось площадки контакта.

С использованием (11)-(14) выполним расчеты и построим соответствующие им графики для механизма ШРУС автомобиля УАЗ.

Математическое ожидание величины зазора в звеньях в зависимости от σ и i (13):

i	$M(h)$		
	$\sigma = 0,1$	$\sigma = 0,363$	$\sigma = 0,5$
1	0.256	0.929	1.279
2	0.08	0.292	0.402
3	0.053	0.193	0.266
4	0.067	0.242	0.333
5	0.166	0.601	0.828
6	1.075	3.902	5.375

Построим график зависимости $Mh(\varphi)$ от i .

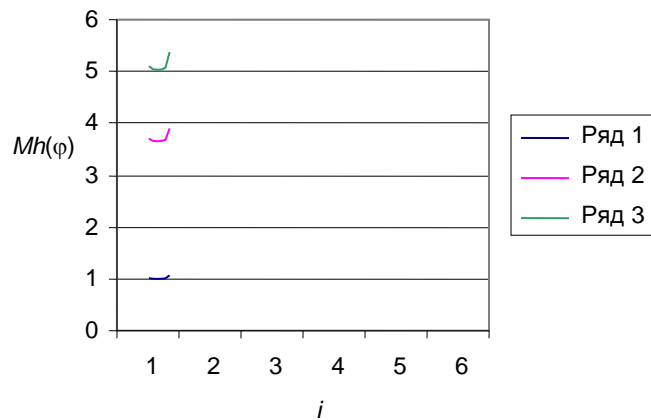


Рис. 1. График зависимости математического ожидания случайной величины зазора $Mh(\varphi)$ от номера контактной пары i

Определим величину Q в зависимости от величины зазора h и от общего числа контактных групп m с использованием (11) (рис. 2):

m	Q		
	$h = 0,0256$	$h = 0,0331$	$h = 0,0406$
1	$3,032 \cdot 10^3$	$3,379 \cdot 10^3$	$3,799 \cdot 10^3$
2	$1,516 \cdot 10^3$	$1,69 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
3	$1,011 \cdot 10^3$	$1,126 \cdot 10^3$	$1,266 \cdot 10^3$
4	757,938	844,874	949,8
5	606,35	675,899	759,84
6	505,292	563,249	633,2

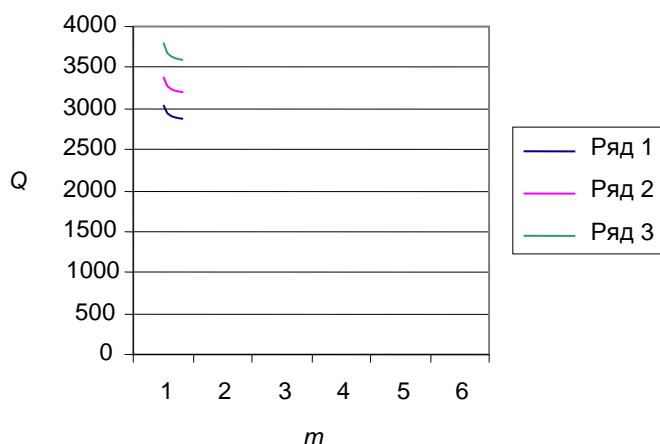


Рис. 2. График зависимости силы, действующей на первую контактную группу, от общего числа контактных групп и величины зазора

Из рис. 2 видно, что с увеличением числа контактных групп и уменьшением величины зазора уменьшается величина силы, действующей на первую контактную группу.

Определим максимальное контактное напряжение на площадке контакта в i -й группе (14) и построим график зависимости максимального контактного напряжения на площадке контакта в наиболее нагруженной паре σ_{\max} , от общего числа силовых групп m и величины зазора h (рис. 3):

m	σ_{\max}		
	$h = 0,0256$	$h = 0,0331$	$h = 0,0406$
1	$9,375 \cdot 10^3$	$8,722 \cdot 10^3$	$8,067 \cdot 10^3$
2	$1,488 \cdot 10^4$	$1,384 \cdot 10^4$	$1,28 \cdot 10^4$
3	$1,95 \cdot 10^4$	$1,815 \cdot 10^4$	$1,678 \cdot 10^4$
4	$2,363 \cdot 10^4$	$2,198 \cdot 10^4$	$2,033 \cdot 10^4$
5	$2,741 \cdot 10^4$	$2,55 \cdot 10^4$	$2,359 \cdot 10^4$
6	$3,096 \cdot 10^4$	$2,88 \cdot 10^4$	$2,663 \cdot 10^4$

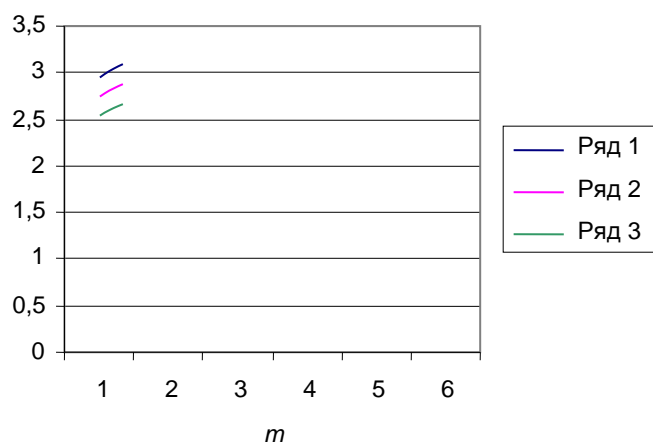


Рис. 3. График зависимости максимального контактного напряжения на площадке контакта в наиболее нагруженной паре σ от общего числа силовых групп m и величины зазора h

Из рис. 3 видно, что с увеличением числа контактных групп и уменьшением величины зазора увеличивается максимальное контактное напряжение в наиболее нагруженной паре.

Из приведенных графиков видно, что с точки зрения обеспечения прочности узла ШРУС и его работоспособности нет необходимости применять более пяти контактных групп, т.е. вводить в конструкцию более пяти шаров и пяти пар силовых элементов.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.с. 314934 СССР, МПК F 16с 11/06. Шарнир / А.Ф. Карпухин, Л.К. Мельников // Открытия. Изобретения. 1971.
2. Королёв А.В., Изнаиров Б.М. Вероятностный расчёт точностных параметров передающих механизмов. Саратов: СГТУ, 1994.
3. Захаров О.В. Управление точностью бесцентрового шлифования статистическими методами // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 32-35.

Васин Алексей Николаевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey N. Vasin – Dr. Sc., Professor
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Изнаиров Борис Михайлович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris M. Iznairov – PhD, Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Мирошкин Артем Григорьевич – ассистент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem G. Miroshkin – Assistant Lecturer
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мукатова Гульнара Хамидуллоевна – аспирант Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gulnara H. Mukatova – Postgraduate
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 20.07.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.86

А.Н. Васин, Б.М. Изнаиров, И.В. Злобина, А.Г. Мирошкин, Г.Х. Мукатова

СТОХАСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАБОЧИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЗУБЧАТЫХ ПЕРЕДАЧ ВНУТРЕННЕГО ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Разработана новая методика расчета передач с внутренним зацеплением при помощи стохастического анализа взаимодействия рабочих элементов зубчатых передач.

Зубчатая передача, звено, контактные напряжения

A.N. Vasin, B.M. Iznairov, I.V. Zlobina, A.G. Miroshkin, G.H. Mukatova

STOCHASTIC INTERACTIONS ANALYSIS OF THE WORKING ELEMENTS
IN INTERNAL-GEAR TRAINS

A new method is developed for calculations referring internal gear trains using the stochastic analysis for interactions between the elements of gear systems.

Gear, unit, contact stress

В настоящее время силового расчета для зубчатых передач внутреннего зацепления не существует. Разработчики пользуются методикой расчета для передач внешнего зацепления, считая его аналогичным. Используемые при этом математические зависимости являются эмпирическими и могут быть справедливы только в частных случаях. Между тем условия контактирования зубьев в передачах внутреннего зацепления существенно отличаются от таковых при наружном зацеплении и, прежде всего, за счет существенно большего коэффициента перекрытия, обеспечивающего нахождение в зацеплении одновременно нескольких пар зубьев. Поэтому является актуальной разработка методики расчета передач с внутренним зацеплением.

Пусть имеется передача с внутренним зацеплением, включающая K элементов, предназначенных для передачи рабочих сил и моментов. К этим элементам относится деталь 1 (колесо, рис. 1) и деталь 2 (шестерня, рис. 2). Каждая из изображённых на рисунках деталей приобрела в процессе изготовления погрешности формы и размеров контактирующих поверхностей. Все погрешности носят как систематический, так и случайный характер, укладываемые в некоторую величину соответствующего допуска.

На рис. 1 изображен профиль детали 1 (колесо). Он имеет рабочие элементы 1, у которых поверхность 2 является рабочими, а остальные поверхности – несопряженные.

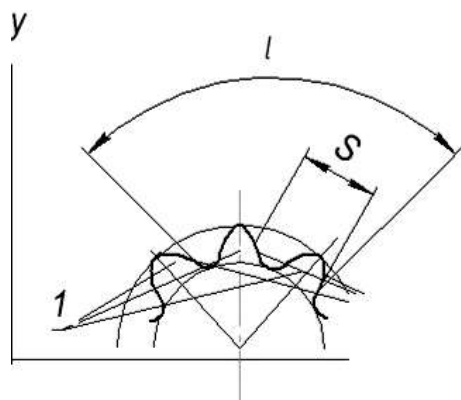


Рис. 1. Профиль детали 1

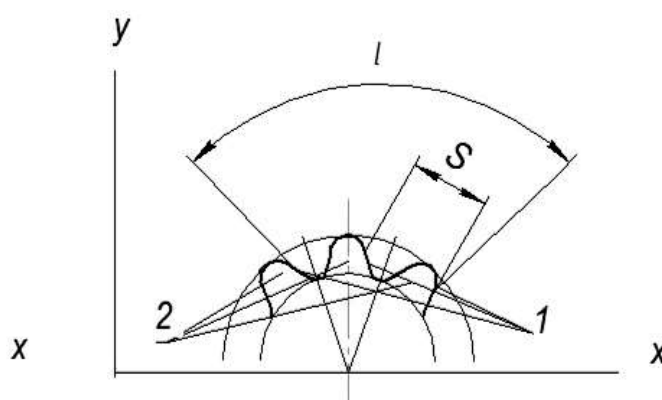


Рис. 2. Профиль детали 2

Соответствующие рабочие элементы деталей (пары зубьев), расположенные друг против друга и имеющие возможность вступать в контакт с созданием обособленного силового замыкания, будем называть звеном. Обозначим общее число таких звеньев, зависящее от величины коэффициента перекрытия, через k . Если к шестерне приложить элементарный крутящий момент, то в одном из звеньев рабочих элементов возникает точечный контакт.

Из-за погрешностей изготовления вначале в контакт вступают только элементы одного из звеньев. Так как внешняя нагрузка уравнивается силой взаимодействия рабочих элементов деталей, под действием этих нагрузок контактирующие поверхности рабочих элементов звена упруго деформируются.

Рассмотрим произвольный λ -элемент первой детали. Дуговое расстояние рабочей поверхности λ -элемента детали 1 до её первого рабочего элемента равно следующей алгебраической сумме:

$$l_1 = (\lambda - 1)S_1 + \zeta_{1\lambda} + \xi_1, \quad (1)$$

где λ – порядковый номер рассматриваемой группы элементов, начиная от первого элемента первой детали; S_1 – величина шага первого рабочего элемента первой детали; $\zeta_{1\lambda}$ – систематическая погрешность шага расположения элементов первой детали; $\xi_{1\lambda}$ – случайная составляющая погрешности шага первой детали.

Сумма в выражении (1) является алгебраической, т.к. систематические и случайные погрешности, являясь векторами, могут иметь различные направленности (и знаки).

Подобной же зависимостью определяем расстояние рабочей поверхности i -го элемента от первого рабочего элемента второй детали:

$$l_2 = (i - 1)S_2 + \zeta_{i2} + \zeta_2, \quad (2)$$

где S_2 – шаг рабочих элементов второй детали; $\zeta_{2\lambda}$ – систематическая погрешность шага второй детали; $\xi_{2\lambda}$ – случайная погрешность шага второй детали.

Шаги первого рабочего элемента у всех деталей из партии различны, но средний шаг составляет S_{10} . Величина систематической погрешности при каждой реализации также различна, а ее среднее значение составляет $\zeta_{10\lambda}$. Поле рассеивания случайных значений расстояний i -го рабочего элемента от первого суммируется от всех реализации размеров детали 1 и составляет ω_{ξ_1} . Среднее значение расстояний i -го рабочего элемента от первого $l_{10\lambda}$ определяется алгебраической суммой величин S_{10} и $\zeta_{10\lambda}$.

Функции (1) и (2) случайные, так как аргумент функции – случайная величина.

Все геометрические погрешности размеров деталей вызываются разными причинами, например, погрешностью настройки технологического оборудования на заданный размер и погрешностью позиционирования.

Систематическая погрешность вызывается рядом других причин. Обычно такими причинами бывают: износ инструмента и температура деформации технологической системы, деформация деталей под действием внутренних напряжений, перенос размеров и формы детали-копира, имеющий систематическую погрешность, на обработанную деталь. Величина ξ_i зависит от порядкового номера рабочего элемента детали, т.е. она либо равномерно возрастает, либо равномерно убывает, и описывается выражением вида

$$\zeta_{1\lambda} = 0,5(\lambda - 1)(\lambda - 2)e_1, \quad (3)$$

где e_1 – приращение значение шага рабочих элементов деталей.

Величина e_1 имеет знак «плюс» или «минус» в зависимости от того, возрастает значение $\xi_{1\lambda}$ с увеличением номера рабочего элемента λ или уменьшается.

Величины мгновенных случайных погрешностей зависят от множества случайных факторов: колебания величины твердости заготовок, колебание значения припуска на механическую обработку, вибраций технологической системы и др.

Все эти погрешности возникают независимо друг от друга. Следовательно, случайные величины S , e и ξ , составляющие случайные функции (2) или (3), тоже являются независимыми случайными величинами.

Подставим выражение (1) и (2) в равенство (3). Получим

$$l = 0,5\lambda^2 e + \lambda(S - 1,5e) - (S - e) + \xi. \quad (4)$$

Рассеивание случайных значений размеров однотипных элементов подчиняется закону нормального распределения. Плотность вероятностей случайных значений погрешности шага детали 1 описывается выражением

$$f(\xi_1) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{\xi_1^2}{2\sigma_{\xi_1}^2}\right], \quad (5)$$

где σ_{ξ_1} – среднее квадратическое отклонение случайных значений погрешностей шага детали 1.

Найдем распределение случайной величины ξ для зубчатого колеса внутреннего зацепления. Величины S и e являются постоянными, а величина λ – случайная, так как она совместно с другими размерами детали определяет размер l .

Так как мы рассматриваем расстояние l от первого рабочего элемента до любого рабочего элемента с порядковым номером, величина λ распределена равномерно в пределах от 1 до k , где k – общее число рабочих элементов детали. Плотность вероятностей величины k равна

$$f(k) = \frac{1}{k-1}, \quad 1 \leq \lambda \leq k. \quad (6)$$

При всех других значениях λ значение плотности вероятностей $f(k)$ равны нулю.

Величина ξ является случайной функцией от λ , причем это – дифференцируемая, монотонная на всем участке возможных значений аргумента λ функция. Поэтому плотность вероятностей случайной величины ξ найдем из выражения [1]:

$$f(\xi) = f_\lambda[\psi(\xi)] \psi'(\xi), \quad (7)$$

где $\psi(\xi)$ – функция, обратная по отношению к функции (7).

Из [1] (2.10)-(2.13), следует что функция $\psi(\xi)$ имеет только одно значение, поэтому

$$f(\xi) = \frac{1}{(k-1)\sqrt{2e\xi + (S-0,5e)^2}}. \quad (8)$$

Математическое ожидание и дисперсию случайной величины ξ найдем из выражений:

$$\xi_0 = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \xi f(\xi) d\xi, \quad (9)$$

$$\sigma_\xi^2 = \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \xi^2 f(\xi) d\xi - \xi_0^2. \quad (10)$$

Раскрывая в выражении значение $f(\xi)$ и учитывая дискретность случайной величины ξ , с использованием равенства (7), после преобразования получим

$$\xi_0 = \frac{1}{(k-1)} \sum_1^k \frac{(\lambda-1)S + 0,5(\lambda-1)(\lambda-2)e}{S - 1,5e + \lambda e}. \quad (11)$$

Случайная величина l (2) является суммой двух случайных величин. Плотность вероятностей распределения суммы независимых случайных величин:

$$f(l) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}(k-1)} \times \int_{\xi_{\min}}^{\xi_{\max}} \frac{1}{\sqrt{2e(l-\xi) + (S-0,5e)^2}} \exp\left(-\frac{\xi^2}{2\sigma_\xi^2}\right) d\xi. \quad (12)$$

Так как эти выражения интересуют нас с точки зрения точности изготовления детали, более удобно для ее оценки использовать относительные величины, которые позволяли бы сравнивать полученную точность с заданной.

При малых значениях числа рабочих элементов k кривая плотности вероятностей распределения значений относительной погрешности расстояний между рабочими элементами $f(\Delta l/\sigma_\xi)$ имеет плавный вид, напоминающий кривую Гаусса. На характер рассеивания случайной величины $\Delta l/\sigma_\xi$ особенно сильное влияние оказывает число рабочих элементов детали k : с возрастанием значения k не просто возрастает поле рассеивания значений $\Delta l/\sigma_\xi$, но и меняется форма кривой распределения. При $k \geq 7$ вершина кривой распределения становится плоской, и лишь по краям кривой значение плотности вероятностей $f(\Delta l/\sigma_\xi)$ зависит от значений $\Delta l/\sigma_\xi$. Это объясняется тем, что распределение величины $\Delta l/\sigma_\xi$ является комбинированным, состоящим из двух распределений. При больших значениях k и малых значениях среднего квадратического отклонения σ_ξ преимущественно проявляется равновероятный закон распределения величины k , и поэтому кривая распределения имеет плоскую вершину.

На математическое ожидание оказывают влияние погрешность шага и систематическая погрешность шага. С возрастанием значения k относительная величина математического ожидания возрастает, так как при этом увеличивается систематическая составляющая погрешности.

На основе выполненного анализа можно сделать вывод, что при изготовлении зубчатых колес для внутреннего зацепления влияние случайной погрешности проявляется слабо, а преимущественное влияние на суммарную погрешность оказывает ее систематическая составляющая. Среди постоянных погрешностей детали на среднее значение погрешности большее влияние оказывает погрешность шага первой пары элементов ΔS_1 по сравнению с систематической погрешностью шага e .

К числу наиболее важных параметров контакта зубчатых колес принадлежат их относительная упругая деформация ϕ под действием внешней окружной силы Q , число контактных групп m , пло-

щадь контакта S и максимальная величина контактных напряжений σ_{\max} . В начальный момент времени вступления в контакт первой контактной группы величина осевой упругой деформации φ равна суммарной упругой деформации φ_1 поверхностей зубьев в первой группе. Если в контакт под действием внешней нагрузки Q вступает m -я контактная группа, то величина суммарной упругой контактной деформации в передаче в этот момент составит

$$\varphi = \varphi_m - \varphi_1, \quad (13)$$

где φ_m – начальный окружной зазор в m -й группе, φ_1 – начальный окружной зазор в первой группе.

$$Q = Q_1 \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{h_i - h_1}{h_m - h_1} \right)^{\frac{n+1}{n}}. \quad (14)$$

Обозначим

$$I_Q = \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{h_i - h_1}{h_m - h_1} \right)^{\frac{n+1}{n}}. \quad (15)$$

Тогда выражение примет вид

$$Q = Q_1 \times I_Q. \quad (16)$$

Расчеты по этим зависимостям показывают, что с увеличением числа контактных групп значение коэффициента I_Q увеличивается, а это означает, что на первую контактную группу приходится все меньшая и меньшая часть внешней нагрузки.

Известно, что суммарная площадь контакта зубьев в произвольной контактной группе определяется зависимостью

$$S_i = \pi B_i Q_i = \pi \sqrt{1 - e^2} B_i^2, \quad (17)$$

где

$$B_i = \lambda \left[\frac{Q_i (V_1 + V_2)}{B} \right]^{\frac{1}{n+1}}; \quad (18)$$

$$Q_i = B_i \sqrt{1 - e^2}, \quad (19)$$

e – эксцентриситет площадки контакта.

Используя выражение

$$S = \sum_{i=1}^m S_i = S_1 (1 + K_S) \sum_{i=1}^m \frac{\sigma_i^2}{\sigma_1^2}, \quad (20)$$

где S_1 и σ_1 – площадь и полуось площадки контакта в первой контактной группе.

После преобразования получим

$$S = S_1 \times I_S, \quad (21)$$

где

$$I_S = (1 + K_S) \sum_{i=1}^m \left(1 - \frac{h_i - h_1}{h_m - h_1} \right)^{\frac{2}{n}}. \quad (3.2)$$

Из анализа полученных выражений ясно, что наибольшие контактные напряжения возникают в первой контактной группе, воспринимающей наибольшую внешнюю нагрузку. Именно в этой группе наиболее вероятно возникновение остаточных пластических деформаций, приводящих к разрушению передачи. Поэтому определение максимальных контактных напряжений в передаче представляет значительный практический интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Захаров О.В. Формообразование сложных поверхностей с применением адаптивных систем контроля. Саратов: СГТУ, 2014. 256 с.

Васин Алексей Николаевич –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey N. Vasin –
Dr. Sc., Professor
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Изнаиров Борис Михайлович –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Boris M. Iznairov –
PhD, Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

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

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

Мирошкин Артем Григорьевич –
ассистент кафедры
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Artem G. Miroshkin –
Assistant Lecturer
Department of Mechanical Engineering Technology,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мукатова Гульнара Хамидуллоевна –
аспирант Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Gulnara H. Mukatova –
Postgraduate
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 681.5

С.А. Игнатьев, Н.А. Казинский, М.Ю. Захарченко

**МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ
НА ТОКАРНЫХ СТАНКАХ ПАБ-350
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭКСПЕРТНЫХ ДАННЫХ**

Рассматривается вопрос контроля качества обработки на токарных станках ПАБ-350 по геометрическим параметрам точности деталей и динамическим характеристикам в рамках системы мониторинга.

Токарная обработка, контроль точности деталей, динамические характеристики станка, экспертные данные

S.A. Ignatyev, N.A. Kazinsky, M.Yu. Zakharchenko

**MONITORING THE PAB-350 LATHE MACHINING QUALITY OF WORK PIECES
USING EXPERT DATA**

The paper considers the issues relating quality control of machining processes performed by the PAB-350 lathes in accordance with geometrical parameters for the work piece accuracy and dynamic characteristics established within the framework of the monitoring system.

Turning, control of the work piece accuracy, dynamic characteristics of the machine, expert data

Весьма важным для предприятий является обеспечение соответствующего качества производимых изделий, их технического уровня при сохранении конкурентоспособной цены. Для реализации данной цели необходимо повышение качества и производительности механической обработки деталей в условиях многономенклатурного производства на основе автоматизированной оценки качества технологического процесса (ТП) и станков по динамическим характеристикам для оперативной корректировки ТП непрерывно в условиях реального времени. Указанное достигается применением систем мониторинга ТП [1-4].

В рамках поставленной цели решается ряд задач, связанных с анализом методов создания ТП применительно к условиям многономенклатурного производства, разработкой методов автоматизированной оценки геометрической точности деталей и динамических характеристик станков, выбор оптимальных параметров управления ТП на основе полученных экспертных оценок связи точности обработки с изменением уровня вибрации станка при различных значениях параметров режима резания, сформированных по результатам обработки экспериментальных данных при исследовании вибраций в зависимости от изменения основных режимов резания, разработкой программного обеспечения для внедрения системы SCADA, разработка управления базами данных для работы со SCADA, алгоритма оперативной корректировки режима резания на основании этих данных.

Для реализации управления процессом резания, близким к оптимальному с точки зрения качества обработанных деталей и производительности, необходимо иметь информацию о каком-либо определяющем параметре V , связанном с процессом резания. В этом случае появляется возможность выявления закономерности его изменения во взаимосвязи с изменением режима резания и качества обработки. Далее, установив критическое значение контролируемого параметра $V_{кр}$, при котором качество обработки становится недопустимым, формируем критерий разладки ТП в виде правила

$$V \leq V_{кр},$$

т.е. значение контролируемого параметра не должно превышать его критического значения, установленного в результате обучающего эксперимента.

Подобные оценки $V_{кр}$ могут быть получены в результате серии экспериментов для различных материалов обрабатываемого инструмента и обрабатываемой детали. Следовательно, может быть сформирована база данных (БД) экспертной системы поддержки принятия решения (ЭСППР) для обслуживающего персонала станков (наладчиков и операторов), обращаясь к которой, они могут оперативно изменять режим резания путем ввода коррекции в управляющую программу.

Из результатов исследований, выполненных в СГТУ, известно, что измерение вибраций в динамической системе (ДС) станка позволяет получить достаточно достоверную информацию о процессе резания, например если после специальной математической обработки результатов измерений вибраций на токарном станке ПАБ-350 вычислить запас устойчивости ДС [7].

Следовательно, встраивая датчики вибрации в систему ЧПУ любых металлорежущих станков, можно говорить об управлении процессом резания в режиме реального времени, а также предотвращать поломки оборудования и инструмента за счет своевременной реакции при резком изменении сигналов из зоны резания. Кроме того, появляется возможность ускоренным методом назначать оптимальные режимы резания по критерию максимума запаса устойчивости ДС. Экспериментальный образец микропроцессорного прибора контроля (МПК) (рис. 1) реализует управление циклом обработки детали по уровню вибрации в ДС станка ПАБ-350, а также обеспечивает сбор информации для системы мониторинга ТП и коррекцию цикла обработки детали по информации из системы мониторинга. Информация, передаваемая в СМТП, включает информацию об изменении запаса устойчивости ДС (вычисляется в МПК). Для измерения вибрации мы используется датчик ДН-3М1, сигнал с которого через виброизмеритель ВШВ-003М3 передается для обработки в МПК. Вибродатчик устанавливается на шпинделе или резцовом блоке станка на магнитном основании (рис. 2 б). Все остальные датчики являются штатными для данного станка, и поэтому дополнительного описания по ним не требуется.

Для построения БД по процессу резания выполняются измерения вибраций и вычисляется запас устойчивости ДС на различных подачах инструмента и резцами из различных материалов [7]. По результатам измерений точности обработки колец подшипников, в частности значения волнистости дорожки качения, и сопоставления её с запасом устойчивости ДС экспертами устанавливается критическое значение запаса устойчивости ДС ($V_{кр}$), при котором значение волнистости становится недопустимым. Это позволяет сформировать производственное правило по форме «если..., то», которое в данном случае выглядит следующим образом: «если запас устойчивости ДС близок к $V_{кр}$, то следует снизить подачу инструмента».

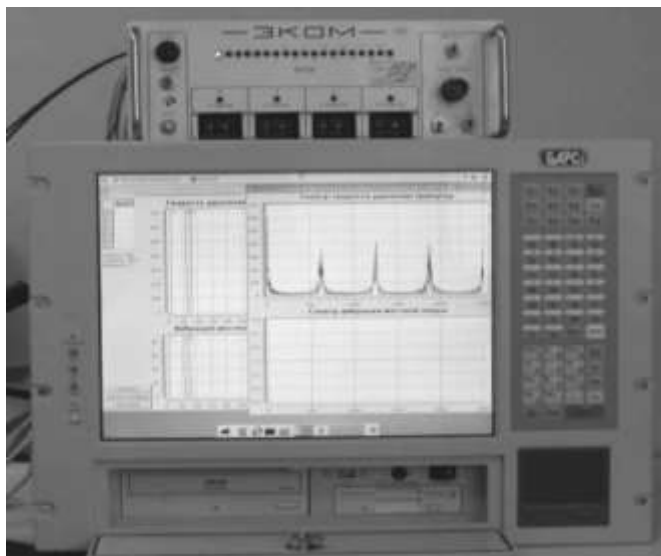


Рис. 1. Передняя панель МПК

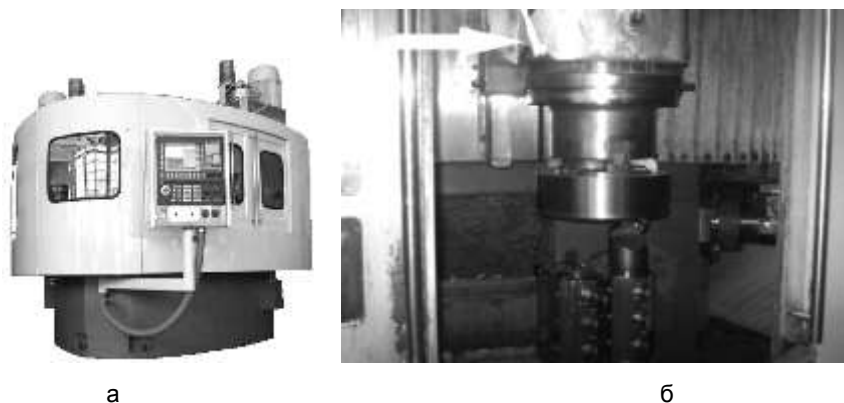


Рис. 2. Общий вид станка ПАБ-350 (а) и размещение датчика вибраций на шпинделе (б)

Выполняя аналогичные измерения при точении различных материалов и различными резцами с помощью экспертов, можно сформировать базу знаний (БЗ) в виде набора производственных правил с рекомендациями, т.е. получить основы для построения ЭСППР.

На практике наладчик станка с ЧПУ или оператор периодически получают информацию о точности обработки деталей из измерительной лаборатории и о запасе устойчивости ДС от МПК. При снижении запаса устойчивости наладчик изменяет режим обработки, вводя коррекцию в систему ЧПУ.

Таким образом, использование ЭСППР позволяет оперативно давать обслуживающему персоналу рекомендации по устранению разладки ТП, что позволяет не допускать появления бракованных деталей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проников А.С. Параметрическая надёжность машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 560 с.
2. Проников А.С. Программный метод испытаний металлорежущих станков. М.: Машиностроение, 1985. 288 с.
3. Пуш А.В. Моделирование и мониторинг станков станочных систем // СТИН. 2000. № 9. С. 12-20.
4. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.

5. Мониторинг станков и процессов шлифования в подшипниковом производстве / А.А. Игнатъев, М.В. Виноградов, В.В. Горбунов и др. Саратов: СГТУ, 2004. 124 с.

6. Васин М.П., Игнатъев А.А. Программное обеспечение микропроцессорного прибора многопараметрового активного контроля // Перспективные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 72-76.

7. Игнатъев А.А., Коновалов В.В., Игнатъев С.А. Идентификация в динамике станков с использованием стохастических моделей. Саратов: СГТУ, 2014. 92 с.

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Казинский Никита Алексеевич – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita A. Kazinsky – Postgraduate
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захарченко Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail Yu. Zakharchenko – Ph.D., Associate Professor
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 681.5

А.А. Игнатъев, А.В. Каракозова, С.А. Игнатъев, М.Ю. Захарченко

АНАЛИТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА АВТОКОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ В ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ СТАНКА. ЧАСТЬ 2

Рассматривается вывод аналитического выражения для автокорреляционной функции виброакустических колебаний динамической системы станка, включающей параллельное соединение двух колебательных звеньев, при условии, что сила резания в стационарном режиме имеет составляющую типа «белый шум».

Виброакустические колебания, металлорежущий станок, динамическая система, колебательные звенья, передаточная функция, автокорреляционная функция

A.A. Ignatyev, A.V. Karakozova, S.A. Ignatyev, M.Yu. Zakharchenko

ANALYSIS OF AUTOCORRELATION FUNCTION FOR VIBROACOUSTIC OSCILLATIONS IN DYNAMIC MACHINE TOOL SYSTEMS. PART 2

The research focuses on analytical expression for the autocorrelation function of vibro-acoustic oscillations in dynamic machine-tool systems, including the parallel connection of two oscillation links provided that the cutting force under static conditions possesses the “white noise” component.

Vibro-acoustic oscillations, metal-cutting machine, dynamical oscillations, oscillatory links, transfer function, autocorrelation function

При высокоточной обработке деталей в машино- и приборостроении важную роль играют виброакустические (ВА) колебания в динамической системе (ДС) станка, оказывающие существенное влияние на формирование геометрических параметров точности обрабатываемой поверхности (отклонение от круглости, волнистость, шероховатость) и физико-механических характеристик поверхностного слоя (однородность структуры, твёрдость) [1-3].

При анализе ВА колебаний в ДС станков при резании следует принять во внимание как детерминированные, так и стохастические колебания [4, 5]. Исследования, проведённые в СГТУ, показали [5, 6], что анализ стохастических колебаний позволяет на основе вычисления автокорреляционной функции (АКФ) $K(\tau)$ ВА колебаний на элементах формообразующей подсистемы идентифицировать передаточную функцию ДС при условии, что она возбуждается силой резания со стохастической составляющей типа «белый шум». Для этого используется формула, полученная в [7]:

$$W(p)W(-p) = K(p) + K(-p), \quad (1)$$

где $W(p)$ – передаточная функция ДС (при резании); $K(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K(\tau)$.

Далее передаточная функция, идентифицированная по экспериментальным данным измерения ВА колебаний, используется для вычисления такой важной характеристики ДС как запас устойчивости, на основе которой можно определить рациональный режим обработки [5].

Ранее в части 1 данной статьи [8] было достаточно подробно изложено построение теоретической модели АКФ на выходе ДС шлифовального станка, что представляет определённый научный и практический интерес. При этом предполагалось, что ДС станка моделируется колебательным звеном второго порядка с передаточной функцией вида

$$W(p) = \frac{k}{T^2 p^2 + 2\rho T p + 1}, \quad (2)$$

где k – коэффициент передачи; T – постоянная времени; ρ – коэффициент затухания, $0 < \rho < 1$.

На основе формул (1) и (2) показано, что модель АКФ представляется выражением

$$K(\tau) = \frac{k}{4\alpha} e^{-\alpha\tau} (\cos \omega_1 \tau + \frac{\alpha}{\omega_1} \sin \omega_1 \tau), \quad (3)$$

где $\alpha = \frac{\rho}{T}$, $\omega = \frac{1}{T}$, $\omega_1 = \sqrt{\omega^2 - \alpha^2}$.

Следует отметить, что формула (1) справедлива для незначительных сил резания. При существенных силах резания, например при больших подачах шлифовального круга, ДС станка может быть представлена параллельными соединениями двух колебательных звеньев (шпиндельные узлы круга $W_1(p)$ и детали $W_2(p)$) [5].

Получим аналитическое выражение для АКФ для этого случая по аналогии с вычислениями из части 1 статьи. Вычислим произведение передаточных функции левой части формулы (1) с учётом параллельного соединения узлов:

$$W(p)W(-p) = [W_1(p) + W_2(p)] [W_1(-p) + W_2(-p)]. \quad (4)$$

По аналогии с формулой (2) имеем

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 p^2 + 2\rho_1 T_1 p + 1}, \quad (5)$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + 2\rho_2 T_2 p + 1}. \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) можно представить в следующем виде:

$$W_1(p) = \frac{k_1}{T_1^2 (p - p_{11})(p - p_{12})}, \quad (7)$$

$$W_2(p) = \frac{k_2}{T_2^2 (p - p_{21})(p - p_{22})}, \quad (8)$$

где $p_{11} = \alpha_1 + j\beta_1$ и $p_{12} = \alpha_1 - j\beta_1$, $p_{21} = \alpha_2 + j\beta_2$ и $p_{22} = \alpha_2 - j\beta_2$ – пары комплексно-сопряжённых корней характеристических уравнений функций $W_1(p)$ и $W_2(p)$.

Подставим выражения (7) и (8) в формулу (4):

$$\begin{aligned}
 [W_1(p) + W_2(p)][W_1(-p) + W_2(-p)] &= \left[\frac{k_1}{T_1^2(p - p_{11})(p - p_{12})} + \frac{k_2}{T_2^2(p - p_{21})(p - p_{22})} \right] \times \\
 &\times \left[\frac{k_1}{T_1^2(p + p_{11})(p + p_{12})} + \frac{k_2}{T_2^2(p + p_{21})(p + p_{22})} \right] = \\
 &= \frac{k_1 T_2^2 (p - p_{21})(p - p_{22}) + k_2 T_1^2 (p - p_{11})(p - p_{12})}{T_1^2 T_2^2 (p - p_{11})(p - p_{12})(p - p_{21})(p - p_{22})} \times \\
 &\times \frac{k_1 T_2^2 (p + p_{21})(p + p_{22}) + k_2 T_1^2 (p + p_{11})(p + p_{12})}{T_1^2 T_2^2 (p + p_{11})(p + p_{12})(p + p_{21})(p + p_{22})}.
 \end{aligned} \tag{9}$$

В формуле (9) общий знаменатель (ОЗ) равен произведению знаменателей сомножителей:

$$\text{ОЗ} = T_1^4 T_2^4 (p - p_{11})(p - p_{12})(p - p_{21})(p - p_{22})(p + p_{11})(p + p_{12})(p + p_{21})(p + p_{22}) \tag{10}$$

После соответствующих алгебраических преобразований получим из формулы (9) общий числитель (ОЧ):

$$\begin{aligned}
 \text{ОЧ} &= (k_1^2 T_2^4 + 2k_1 k_2 T_1^2 T_2^2 + k_2^2 T_1^4) p^4 + [-k_1^2 T_2^4 (p_{21}^2 + p_{22}^2) + 2k_1 k_2 T_1^2 T_2^2 p_{21} p_{22} - \\
 &2k_1 k_2 T_1^2 T_2^2 (p_{11} + p_{12})(p_{21} + p_{22}) + 2k_1 k_2 T_1^2 T_2^2 p_{11} p_{12} - k_2^2 T_1^4 (p_{11}^2 + p_{12}^2)] p^2 + \\
 &+ (k_1^2 T_2^4 p_{21}^2 p_{22}^2 + 2k_1 k_2 T_1^2 T_2^2 p_{11} p_{12} p_{21} p_{22} + k_2^2 T_1^4 p_{11}^2 p_{12}^2)
 \end{aligned} \tag{11}$$

или более коротко

$$\text{ОЧ} = H_4 p^4 + H_2 p^2 + H_0, \tag{12}$$

где H_0, H_2, H_4 – многочлены при соответствующих степенях p в формуле (11).

Далее по аналогии с результатами [8] представим выражение (9) с учётом (10) и (12) в виде четырёх слагаемых по методу неопределённых коэффициентов:

$$\begin{aligned}
 &\frac{H_4 p^4 + H_2 p^2 + H_0}{T_1^4 T_2^4 (p - p_{11})(p - p_{12})(p - p_{21})(p - p_{22})(p + p_{11})(p + p_{12})(p + p_{21})(p + p_{22})} \\
 &= \frac{1}{T_1^4 T_2^4} \left[\frac{Ap + B}{(p - p_{11})(p - p_{12})} + \frac{Cp + D}{(p - p_{21})(p - p_{22})} + \right. \\
 &\quad \left. \frac{-Ap + B}{(p + p_{11})(p + p_{12})} + \frac{-Cp + D}{(p + p_{21})(p + p_{22})} \right],
 \end{aligned} \tag{13}$$

где A, B, C, D – неопределённые коэффициенты.

Приведём правую часть выражения (13) к общему знаменателю, который совпадает с формулой (10), и рассмотрим числитель:

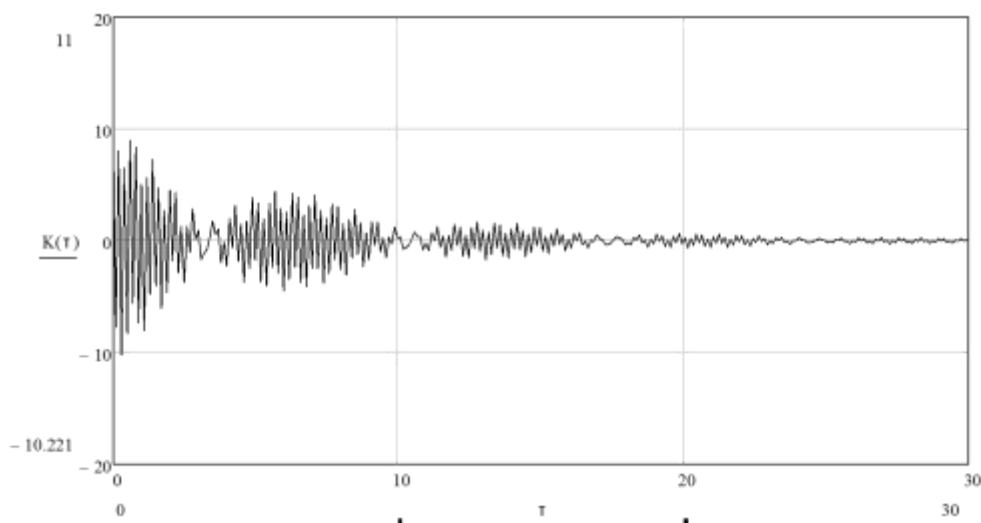
$$\begin{aligned}
 &(Ap + B)(p + p_{11})(p + p_{12})(p^2 - p_{21}^2)(p^2 - p_{22}^2) + \\
 &(Cp + D)(p^2 - p_{11}^2)(p^2 - p_{12}^2)(p + p_{21})(p + p_{22}) + \\
 &(-Ap + B)(p - p_{11})(p - p_{12})(p^2 - p_{21}^2)(p^2 - p_{22}^2) + \\
 &(-Cp + D)(p^2 - p_{11}^2)(p^2 - p_{12}^2)(p - p_{21})(p - p_{22}) = \\
 &(Ap + B)[p^6 - p^4(p_{21}^2 + p_{22}^2) + p^2 p_{21}^2 p_{22}^2 + p^5(p_{11} + p_{12}) - \\
 &p^3(p_{11} + p_{12})(p_{21}^2 + p_{22}^2) + p(p_{11} + p_{12})p_{21}^2 p_{22}^2 + p^4 p_{11} p_{12} - \\
 &p^2 p_{11} p_{12}(p_{21}^2 + p_{22}^2) + p_{11} p_{12} p_{21}^2 p_{22}^2] +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (Cp+D)[p^6-p^4(p_{11}^2+p_{12}^2)+p^2p_{11}^2p_{12}^2+p^5(p_{21}+p_{22})- \\
 & p^3(p_{11}^2+p_{12}^2)(p_{21}+p_{22})+p(p_{21}+p_{22})p_{11}^2p_{12}^2+p^4p_{21}p_{22}- \\
 & p^2p_{21}p_{22}(p_{11}^2+p_{12}^2)+p_{11}^2p_{12}^2p_{21}p_{22}] + \\
 & (-Ap+B)[p^6-p^4(p_{21}^2+p_{22}^2)+p^2p_{21}^2p_{22}^2-p^5(p_{11}+p_{12})+ \\
 & p^3(p_{11}+p_{12})(p_{21}^2+p_{22}^2)-p(p_{11}+p_{12})p_{21}^2p_{22}^2+p^4p_{11}p_{12}- \\
 & p^2p_{11}p_{12}(p_{21}^2+p_{22}^2)+p_{11}p_{12}p_{21}^2p_{22}^2] + \\
 & (-Cp+D)[p^6-p^4(p_{11}^2+p_{12}^2)+p^2p_{11}^2p_{12}^2-p^5(p_{21}+p_{22})- \\
 & p^3(p_{11}^2+p_{12}^2)(p_{21}+p_{22})-p(p_{21}+p_{22})p_{11}^2p_{12}^2+p^4p_{21}p_{22}- \\
 & p^2p_{21}p_{22}(p_{11}^2+p_{12}^2)+p_{11}p_{12}]. \tag{14}
 \end{aligned}$$

Далее по методу неопределённых коэффициентов сравниваются коэффициенты при соответствующих степенях p числителя правой части формулы (13) и числителя левой части той же формулы, выражаемого формулой (14):

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \text{при } p^6: \quad 2A(p_{11}+p_{12})+2C(p_{21}+p_{22})+2B+2D=0, \\
 \text{при } p^4: \quad 2[Bp_{11}p_{12}+Dp_{21}p_{22}-B(p_{21}^2+p_{22}^2)-D(p_{11}^2+p_{12}^2)- \\
 \quad A(p_{11}+p_{12})(p_{21}^2+p_{22}^2)-C(p_{11}^2+p_{12}^2)(p_{21}+p_{22})]=H_4, \\
 \text{при } p^2: \quad 2[Bp_{21}^2p_{22}^2-Vp_{11}p_{12}(p_{21}^2+p_{22}^2)+A(p_{11}+p_{12})p_{21}^2p_{22}^2+ \\
 \quad C(p_{21}+p_{22})p_{11}^2p_{12}^2+Dp_{11}^2p_{12}^2-Dp_{21}p_{22}(p_{11}^2+p_{12}^2)]=H_2, \\
 \text{при } p^0: \quad 2p_{11}p_{12}p_{21}p_{22}(Bp_{21}p_{22}+Dp_{11}p_{12})=H_0.
 \end{array} \right. \tag{15}$$

Имеем четыре уравнения для четырёх неизвестных коэффициентов A, B, C, D . Все известные коэффициенты уравнений, выраженные через корни $p_{11}, p_{12}, p_{21}, p_{22}$ и полиномы H_0, H_2, H_4 являются действительными величинами, следовательно, система имеет единственное решение. Коэффициенты A, B, C, D последовательно путём алгебраических преобразований находятся из системы (15), причём все они выражаются через полиномы H_0, H_2, H_4 и коэффициенты $\alpha_1, \beta_1, \alpha_2, \beta_2$, которые относятся к действительным и мнимым частям пар комплексно-сопряжённых корней общего знаменателя выражения (13). Следует отметить, что выражения для коэффициентов A, B, C, D достаточно громоздки и здесь не приводятся.



Вид аналитической АКФ

С учётом того, что коэффициенты A, B, C, D вычислены, можно два первых слагаемых правой части формулы (13) отнести к изображению АКФ $K(p)$, а два оставшихся – к изображению АКФ $K(-p)$, так что формула (1) удовлетворяется. Тогда, используя обратное преобразование Лапласа [9], по аналогии с результатами работы [8] можно получить общий вид АКФ:

$$K(\tau) = k_1 e^{-\beta_1 \tau} (A_1 \cos \omega_1 \tau + B_1 \sin \omega_1 \tau) + k_2 e^{-\beta_2 \tau} (A_2 \cos \omega_2 \tau + B_2 \sin \omega_2 \tau). \quad (16)$$

Таким образом, АКФ для случая параллельного соединения двух колебательных звеньев содержит две частотные составляющие, определяемые параметрами звеньев T_1, ρ_1, T_2, ρ_2 , при этом временная зависимость АКФ, полученная по модели (16), представляет собой затухающую косинусоиду с модуляцией, представленную на рисунке, что соответствует ранее полученным в [5] экспериментальным данным и свидетельствует о её адекватности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аршанский М.М., Щербаков В.П. Вибродиагностика и управление точностью обработки на металлорежущих станках. М.: Машиностроение, 1988. 136 с.
2. Lin Z.H., Hodson D.C. In-process measurement and assessment of dynamic characteristics of machine tool structures // Int. J.Mach. Tool Manufact. 1988. Vol. 28. № 2. P. 93-101.
3. Игнатъев С.А., Горбунов В.В., Игнатъев А.А. Мониторинг технологического процесса как элемент системы управления качеством продукции. Саратов: СГТУ, 2009. 160 с.
4. Попов В.И., Локтев В.И. Динамика станков. Киев: Техніка, 1975. 136 с.
5. Игнатъев А.А., Каракозова В.А., Игнатъев С.А. Стохастические методы идентификации в динамике станков. Саратов: СГТУ, 2013. 124 с.
6. Игнатъев А.А. Стохастические модели в динамике станков // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2014. С. 53-55.
7. Складаревич В.А. Операторные методы в статистической динамике автоматических систем. М.: Наука, 1965. 475 с.
8. Каракозова А.В., Игнатъев А.А. Аналитическая оценка автокорреляционной функции виброакустических колебаний в динамической системе станка. Ч. 1 // Вестник СГТУ. 2015. № 1 (78). С. 85-88.
9. Никулин Е.А. Основы теории автоматического управления. СПб: БХВ-Петербург, 2004. 640 с.

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Каракозова Анна Владимировна – аспирант кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anna V. Karakozova – Postgraduate
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Игнатъев Станислав Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Stanislav A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Захарченко Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail Yu. Zakharchenko – Ph.D., Associate Professor
Department of Automation, Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 12.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

В.В. Коновалов, А.А. Игнатьев, М.Ю. Захарченко

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ТОКАРНОГО СТАНКА ПАБ-350 ПРИ РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ РЕЗАНИЯ

Рассмотрены результаты экспериментальных исследований виброакустических колебаний узлов токарного станка модели ПАБ-350 при обработке колец подшипников различными резами с определением целесообразного режима резания по запасу устойчивости динамической системы.

Токарный станок, динамическая система виброакустических колебаний, передаточная функция, автокорреляционная функция, запас устойчивости режима резания

V.V. Konovalov, A.A. Ignatyev, M.Yu. Zakharchenko

EXPERIMENTAL RESEARCH INTO VIBRO-ACOUSTIC OSCILLATIONS IN THE DYNAMIC PAB-350 LATHE SYSTEMS UNDER VARIOUS CUTTING CONDITIONS

The paper analyses the results of experimental research into vibro-acoustic oscillation nodes in the PAB-350 lathe machines under treatment of bearing rings with various cutters. Feasibility of cutting conditions is determined in terms of stability factors referring the dynamic system.

Lathe, dynamic system of vibro-acoustic oscillations, transfer function, autocorrelation function, stability margin of cutting modes

Производительность и качество точения зависят от технического состояния станка и назначенных параметров режима обработки. Значения параметров качества обработки деталей на автоматизированных станках в значительной степени определяются их динамическими характеристиками, оптимальные значения которых должны рассчитываться на этапе проектирования и обеспечиваться на этапе изготовления конструкцией станка. Исследования точности станков показывают, что виброакустические колебания (ВА) элементов их конструкции существенно влияют как на погрешность формы деталей, которая в общем балансе погрешностей для прецизионных станков составляет 30...70 %, так и на волнистость и шероховатость обработанной поверхности [1, 2]. Значительное влияние на улучшение динамических характеристик станков, в том числе и на этапе эксплуатации, оказывает использование результатов исследований, направленных на повышение параметров качества обработки и анализ их связи с жесткостью и колебаниями основных узлов формообразующей подсистемы станка. Уровень и характер ВА колебаний являются важными, а иногда и единственными критериями нормального функционирования узлов станка, так как служат обобщающими показателями его динамических свойств. Для оценки динамических характеристик станков при их изготовлении и в процессе эксплуатации возникает необходимость в разработке методов и средств контроля, обеспечивающих оперативное получение информации и ее обработку. Исследования, выполненные в Саратовском государственном техническом университете, показывают, что динамические характеристики токарных станков можно оценивать как по переходным процессам при врезании инструмента в заготовку, так и при стационарном резании [4], основываясь, в частности, на ВА колебаниях резцового блока, имеющих как детерминированную, так и стохастическую составляющие. В обоих случаях используются специальные методы обработки стохастических сигналов с применением ЭВМ. В ходе исследования на автоматизированном токарном станке модели ПАБ-350 проводилась регистрация ВА колебаний основных формообразующих узлов станка. Эксперименты проводились по специальной методике. В производственных условиях оценивалась предварительная токарная обработка поверхности качения наружных колец железнодорожных подшипников 42726 из материала ШХ-15. Скорость вращения заготовки 180 об/мин, подача резца

0,2, 0,4, 0,5, 0,6 мм/об, В ходе испытаний произведены измерения наружных колец в количестве по 9 штук, измерение ВА колебания резцового блока станка с целью выявления возможных дефектов и их влияния на параметры точности поверхностей качения колец подшипников и производительность [3]. В первом эксперименте – резец T5K10, применяемый по технологическому процессу в цехе № 20, во втором эксперименте – резец PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230 фирмы «PRAMET». Сигналы с вибродатчика подавались на виброизмеритель ВШВ-003М3 и регистрировались в режиме линейного усиления в диапазоне частот 1...4000 Гц. Выход виброизмерителя подключался к компьютеру для визуального наблюдения формы и амплитуды вибросигналов в различных режимах работы станка, а также для записи и дальнейшей обработки результатов.

Результаты обработки записей ВА колебаний при резании позволяют определить автокоррекционную функцию (АКФ) $K_{yy}(\tau)$ и на ее основе при условии, что ДС станка возбуждается сигналом типа «белый шум», вычислить передаточную функцию замкнутой ДС $W_3(p)$ по формуле [4]

$$K_{yy}(p) + K_{yy}(-p) = W_3(p)W_3(-p), \quad (1)$$

где $K_{yy}(p)$ – изображение по Лапласу АКФ $K_{yy}(\tau)$.

Передаточная функция ДС может быть вычислена, если получено аналитическое выражение АКФ выходного сигнала, например путем идентификации по экспериментально зарегистрированным ВА колебаниям резцового блока токарного станка при обработке.

Эксперимент 1 – Обработка резцом T5K10 по цеховому техпроцессу. Соответствующие подачам АКФ получены с помощью программы MATLAB.

Для аппроксимации АКФ используется формула

$$K(\tau) = A \cdot e^{-\alpha\tau} (1 + m \cos \Omega\tau) \cos \omega_0\tau, \quad (2)$$

где A – постоянный коэффициент; α – коэффициент затухания; Ω – частота огибающей АКФ; ω_0 – основная частота АКФ; m – коэффициент модуляции.

Проверка моделей на адекватность проводилась по критерию Фишера.

Далее, используя формулы (1), (2) и выполняя алгебраические преобразования, получаем выражение для передаточной функции в виде

$$W_3(p) = \frac{A(1+m)\sqrt{2}[(p+\alpha)^2 + \omega_0^2]}{[(p+\alpha)^2 + (\omega_0 + \Omega)^2][(p+\alpha)^2 + (\omega_0 - \Omega)^2]}. \quad (3)$$

Следует отметить, что передаточная функция практически не изменяется за время обработки одного кольца (~ 1 мин) при неизменном режиме резания, то есть ДС рассматривается как линейная. При изменении режима точения (например, подачи резца) передаточная функция изменяется, то есть, в целом ДС станка является нелинейной [1]. Далее по полученным передаточным функциям для четырёх подач инструмента вычисляется запас устойчивости ДС по показателю колебательности M [5]. Минимальное значение M соответствует максимальному запасу устойчивости, вычисляемому по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) ДС при резании, при котором обеспечиваются высокая производительность точения, заданное качество обработки дорожек качения колец и более низкая скорость износа инструмента. Таким образом, экспериментально-аналитическое определение передаточной функции замкнутой ДС станка позволяет определить рациональный режим точения колец подшипников.

Для используемых подач резца получены различные АКФ, что свидетельствует о нелинейности ДС при резании. Однако для каждой подачи АКФ близки по виду, т.е. ДС можно рассматривать как линеаризованную и вычислить по АКФ с использованием соотношений (1) передаточную функцию замкнутой ДС $W_3(p)$, типичный вид АЧХ которых приведен на рис. 1.

Затем вычисляется показатель колебательности M_{\max} , характеризующей запас устойчивости ДС при резании. Результаты измерений приведены на рис. 2, которые показывают, что подача резца 0,6 мм/об является недопустимой из-за снижения запаса устойчивости ДС (повышение показателя колебательности) и повышение волнистости поверхности колец.

Рекомендуемой подачей является 0,5 мм/об, которая превышает используемую 0,4 мм/об на данном станке в производственных условиях на 25%, т.е. производительность обработки повышается на 25 %.

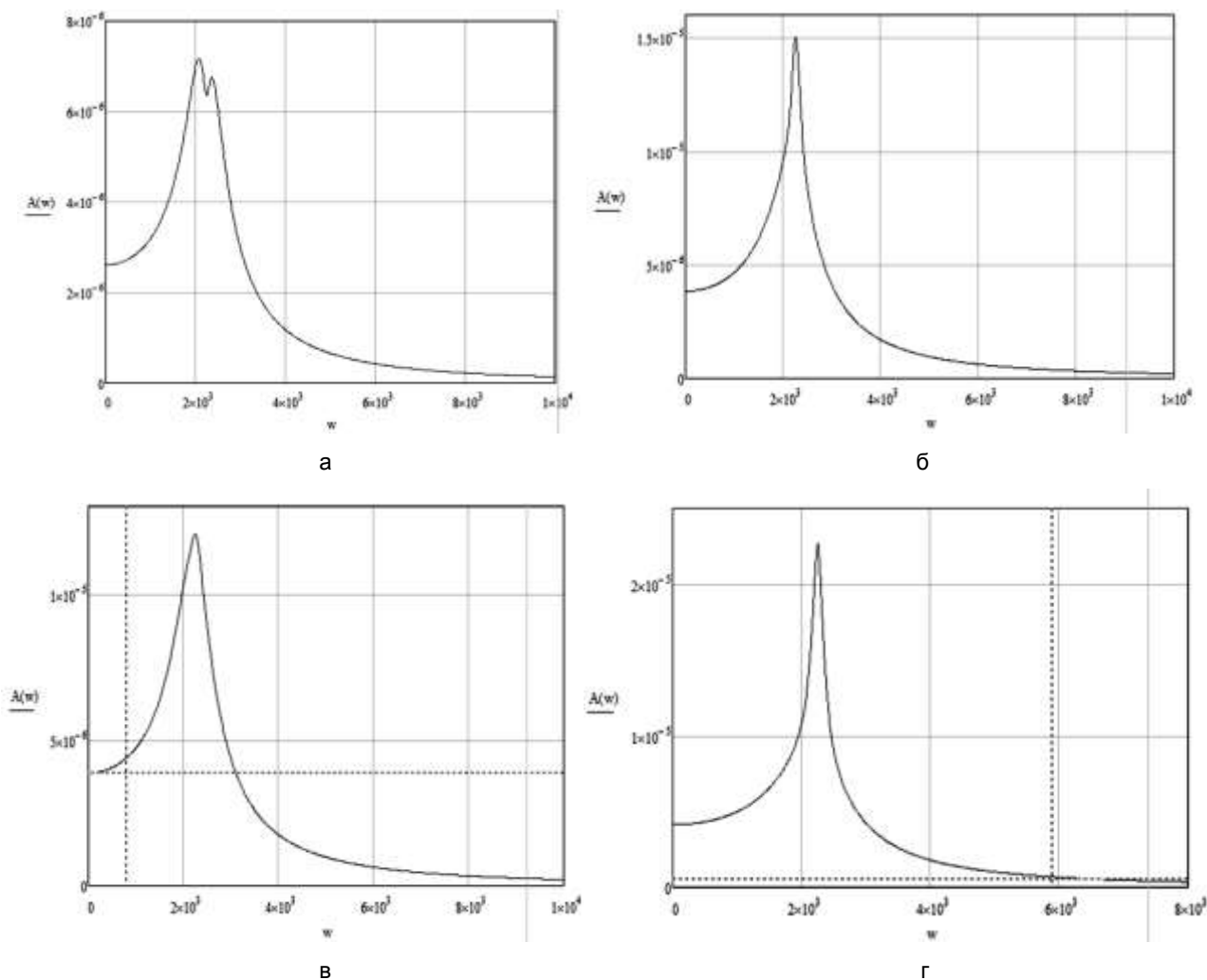


Рис. 1. Амплитудно-частотные характеристики динамической системы на подачах:
 а = 0,2 мм/об, б = 0,4 мм/об, в = 0,5 мм/об, г = 0,6 мм/об

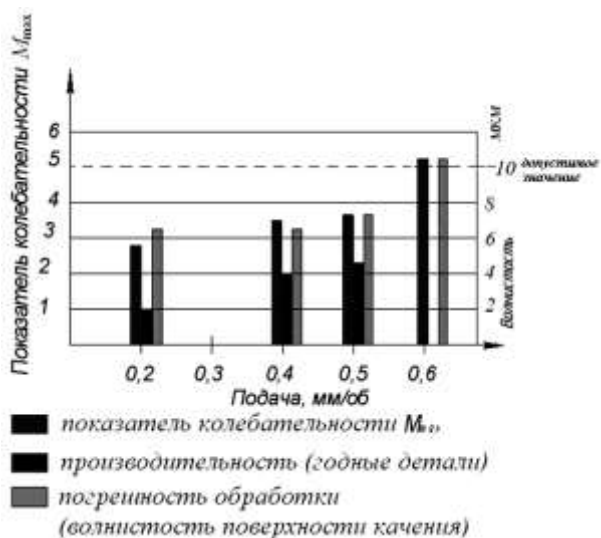


Рис. 2. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом Т5К10.
 Количество измерений при каждой подаче – 9.
 Среднее квадратическое отклонение измерений волнистости – не более 0,5 мкм.
 СКО M_{max} – не более 0,4

Эксперимент 2 – обработка резцом PS0N 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, фирмы «PRAMET». Порядок проведения эксперимента аналогичен предыдущему [3].

Визуально наблюдается отличие АКФ при обработке различными резцами, соответственно различаются АЧХ (рис. 3) и показатель колебательности (рис. 4).

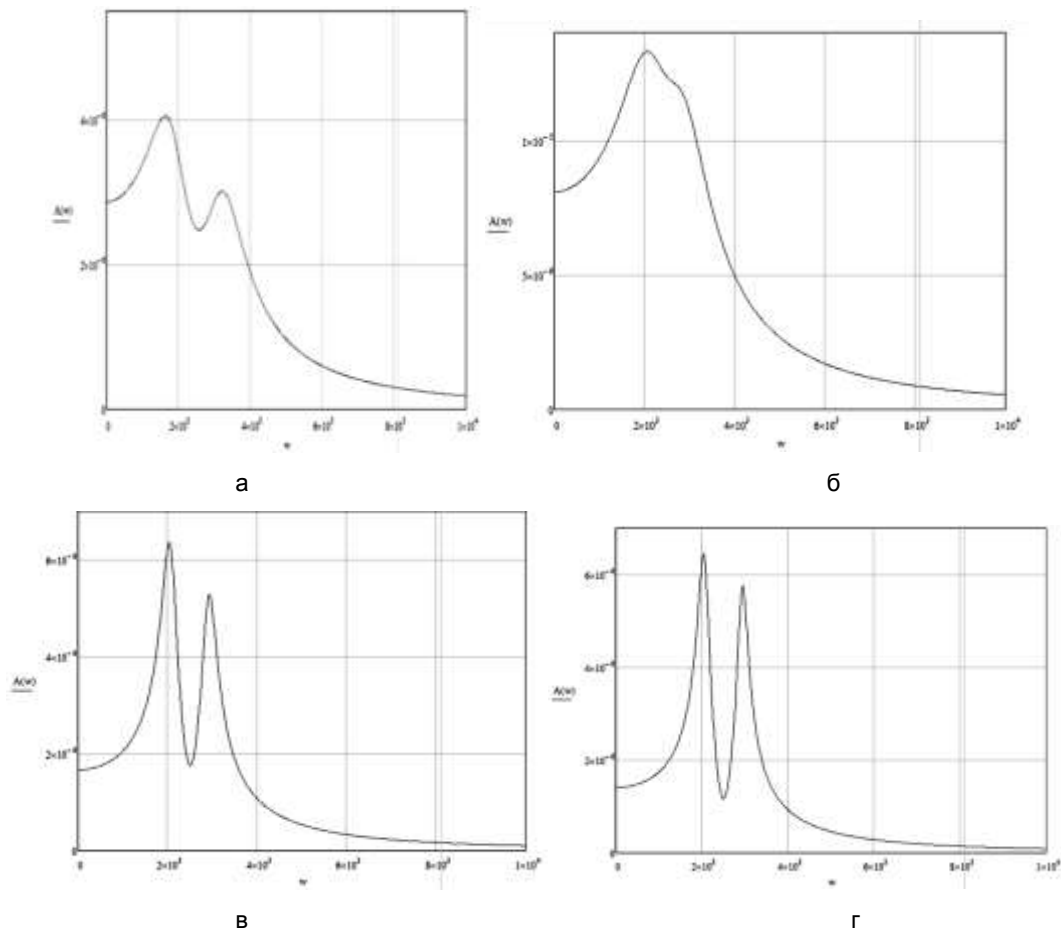


Рис. 3. Амплитудно-частотные характеристики ДС на подачах:
а = 0,2 мм/об, б = 0,4 мм/об, в = 0,5 мм/об, г = 0,6 мм/об

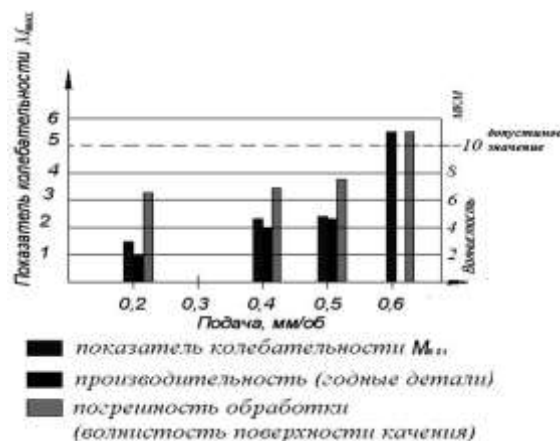


Рис. 4. Соотношение исследуемых показателей при точении колец резцом PS0N 2020 пластина SNMM 120412 E-OR; 9230.
Количество измерений при каждой подаче – 9.
Среднее квадратическое отклонение измерений волнистости – не более 0,5 мкм.
СКО M_{max} – не более 0,4

Вид АЧХ с двумя максимумами объясняется тем, что при изменении режима резания возбуждаются колебания в ДС как в двухмассовой (масса, связанная с инструментом, и масса, связанная с заготовкой).

Во втором эксперименте показатель M_{\max} почти в 2 раза ниже аналогичного для эксперимента 1, что свидетельствует о более высоком запасе устойчивости ДС при обработке резцом PSON 2020 K12, пластина SNMM 120412 E-OR; 9230, рекомендуемая подача $n = 0,5$ мм/об. Следовательно, данный резец можно использовать на более производительных режимах точения. Таким образом, экспериментально-аналитическое определение передаточной функции замкнутой ДС станка позволяет по запасу устойчивости определить рациональный режим точения колец подшипников, сравнить возможность резцов из различных материалов, а также обеспечивает повышение производительности с сохранением заданных параметров точности обрабатываемых поверхностей качения колец подшипников.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кудинов В.А. Динамика станков. М.: Машиностроение, 1967. 359 с.
2. Точность и надёжность автоматизированных и прецизионных металлорежущих станков: в 3 ч. / Б.М. Бржозовский, А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, В.В. Мартынов. Саратов: СГТУ, 1992. Ч. 1. 160 с.
3. Коновалов В.В. Экспериментальное исследование точности обработки на токарных станках ТП-3503 и ПАБ-350 // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2011. С. 139-141.
4. Скляревич А.Н. Операторные методы в статической динамике автоматических систем. М.: Наука, 1956. 460 с.
5. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. М.: Наука, 1975. 768 с.

Коновалов Валерий Викторович – кандидат технических наук, доцент кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Valeri V. Konovalov – Ph.D., Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Automation,
Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Захарченко Михаил Юрьевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail Yu. Zakharchenko – Ph.D., Associate Professor
Department of Automation,
Control, Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 11.11.15

УДК 621.923.5

**А.В. Королев, А.Д. Сидоренко, А.А. Мазина, А.С. Яковishин, Е.В. Мухина,
К.С. Нейгебауэр, А.Ф. Балаев, О.П. Решетникова, С.А. Савран**

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ И ОЧИЩАЮЩАЯ ОБРАБОТКА КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Рассматривается ультразвуковая упрочняющая и очищающая обработка колец подшипников, а именно с помощью ультразвуковой частоты сферический инструмент индентора воздействует на обрабатываемую поверхность колец и наносит на их рабочие поверхности графитовую смазку. Из расчетов видно, что можно произвести анализ процесса создания на поверхности антифрикционного покрытия, толщина слоя которого, будет выравниваться по всей рабочей зоне, находясь в пределах доверительных границ экспериментальных значений, что подтверждает адекватность математической модели.

Остаточное напряжение, релаксация, индентор, антифрикционное покрытие, диффузия, ультразвук

**A.V. Korolev, A.D. Sidorenko, A.A. Mazina, A.S. Yakovishin, E.V. Muchina,
K.S. Neugebauer, A.F. Balaev, O.P. Reshetnikova, S.A. Savran**

AN ULTRASONIC CLEANING BATH AND STRENGTHENING OF THE BEARING RINGS

The article describes an ultrasonic cleaning treatment and hardening of bearing rings, via ultrasonic frequency when a spherical indenter affects the processed surface of the rings and applies on working surfaces a graphite grease. The calculations show that it is possible to analyze the process of creating anti-friction coating on the surface, the thickness of which will be aligned over the entire working area being within the confidence limits of the experimental values, which confirms the adequacy of the mathematical model.

Residual stress, relaxation, indenter, anti-friction coating, diffusion, ultrasound

Большинство исследований распространено по части ультразвуковой упрочняющей и очищающей обработки [1-5] и др. Многие авторы в виде положительного влияния ультразвуковой упрочняющей обработки фиксируют повышение твердости и износостойкости поверхности [6-10]. Увы, в наше время фактически оказались не принятыми во внимание такие значительные качества ультразвуковой обработки, как удаление остаточных напряжений первого рода из материала детали и способ нанесения на поверхность твердого антифрикционного покрытия.

Устройство подшипников качения, у которых рабочие поверхности колец изготовлены из малоразмерного проката [11], делает возможным совместно с нанесением антифрикционных покрытий, использовать при изготовлении высокоэффективные методы упрочняющей обработки. Этому способствует то, что проникающий между витками проката под действием ультразвукового инструмента порошок графита при работе подшипника будет играть роль твердой смазки. По сравнению с обычной консистентной смазкой твердая не вытекает из подшипника в процессе его работы, не выдавливается из зоны контакта дорожек и тел качения, не оказывает сопротивление вращению подшипника, предохраняет рабочие поверхности подшипника от коррозии. Рабочие поверхности колец упрочняются, снимаются остаточные напряжения с дорожек качения, снижается шероховатость поверхности. Такая технология проста в реализации, повышает качество подшипников, способствует снижению затрат на их изготовление.

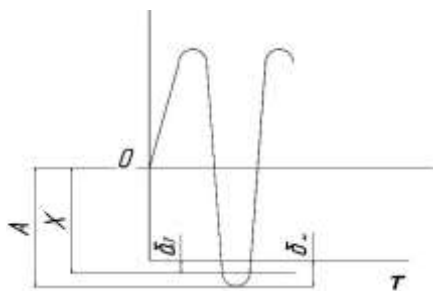


Рис. 1. Схема перемещения рабочей части индентора

На примере виброобработки колец упорных подшипников установлено, что с помощью ультразвуковой частоты сферический инструмент индентора воздействует на обрабатываемую поверхность колец и наносит на их рабочие поверхности графитовую смазку. На рис. 1 схематически изображено перемещение рабочей части инструмента относительно обрабатываемой поверхности.

Введем декартову систему координат. Ось OX разместим вдоль направления колебаний индентора, ось Oτ – вдоль направления вращения обрабатываемой поверхности. Центр декартовой системы координат разместим в центре симметрии колебательных движений индентора.

Колебания индентора можно представить в качестве гармонических незатухающих колебаний во времени τ с амплитудой A .

Согласно закону гармонических колебаний

$$x = A \cdot \sin 2 \cdot \pi \cdot \frac{\tau}{T}, \quad (1)$$

где x – расстояние от оси OX, м; T – период колебаний индентора, с; τ – время перемещения индентора, с; A – амплитуда колебаний индентора, м.

Периодически индентор взаимодействует с обрабатываемой поверхностью и внедряется в нее на глубину

$$\delta_{\tau} = A \cdot \sin \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{\tau}{T} \right) - A + \delta_m \quad \text{при} \quad \frac{T}{2 \cdot \pi} \cdot \arcsin \left(1 - \frac{\delta_m}{A} \right) + T \cdot i \leq \tau \leq \frac{T}{4} + T \cdot i, \quad (2)$$

где δ_{τ} – глубина введения индентора в обрабатываемую поверхность в момент времени τ , м; δ_m – максимальная глубина введения индентора в обрабатываемую поверхность заготовки, м; i – порядковый номер цикла колебания инструмента ($i = 0, 1, 2, \dots$).

При введении индентора в обрабатываемую поверхность расходуются три вида энергии [13]:

$$U = U_{\text{деф}} + U_{\text{дин}} + U_a, \quad (3)$$

где $U_{\text{деф}}$ – деформационная составляющая, Дж; $U_{\text{дин}}$ – динамическая составляющая, Дж; U_a – адгезионная составляющая, Дж.

Адгезионную составляющую игнорируем, учитывая наличие разделяющего слоя антифрикционного материала. Принимаем форму рабочей части индентора в качестве шара. Форма дорожки качения упорного подшипника сочетается с тором.

Тогда деформационная составляющая затраченной энергии за время τ :

$$U_{\text{деф}} = 0,988 \cdot F^{\frac{5}{3}} \cdot \eta^{\frac{2}{3}} \cdot (\sum \rho)^{\frac{1}{3}} \cdot f \cdot \tau, \quad (4)$$

где τ – время обработки, с; f – частота колебаний индентора, Гц; F – сила воздействия индентора на обрабатываемую поверхность, Н;

$$\eta = \frac{1 - m_1^2}{E_1} + \frac{1 - m_2^2}{E_2},$$

где m_1 и m_2 – коэффициенты Пуассона материала индентора и обрабатываемой детали; E_1 и E_2 – модули упругости материалов тел, Па; $\sum \rho$ – сумма главных кривизн поверхностей тел в месте их первоначального контакта, 1/м.

Нетрудно показать, что за время τ от начала обработки суммарная динамическая составляющая энергии удара будет равна

$$U_{\text{дин}} = \frac{1}{T^2} m \cdot A^2 \cdot \pi^2 \cdot \cos^2 \left(2 \cdot \pi \cdot \frac{\tau_u}{T} \right) \cdot f \cdot \tau. \quad (5)$$

Из полученных равенств (4), (5) видно, что можно выполнить анализ процесса создания на поверхности заготовки антифрикционного покрытия. Отметим, что слой покрытия состоит из двух частей: верхний слой покрытия, образованный индентором посредством вдавливания материала покрытия в микронеровности обрабатываемой поверхности, и нижний слой покрытия, созданный за счет диффузии материала покрытия в материал обрабатываемой поверхности.

Толщину верхнего слоя покрытия найдем из равенства:

$$h = \delta_m = 0,655 \cdot \left(F \cdot \eta \cdot \sqrt{\sum \rho} \right)^{2/3}, \quad (6)$$

где h – толщина покрытия, м; F – сила прижима индентора к заготовке, Н.

В основном случае диффузия распространяется по всем возможным направлениям. Но нам необходим процесс диффузии, осуществляемый в направлении, перпендикулярном обрабатываемой поверхности. Поэтому ввиду основного закона, отобразившего процесс диффузии углерода в обрабатываемую поверхность, было взято уравнение Фика:

$$J(\tau, x) = -D \frac{dC(\tau, z)}{dz}, \quad (7)$$

где J_c – удельный поток вещества, проходящий через единицу площади в единицу времени, $\frac{\text{кг}}{\text{с} \cdot \text{м}^2}$; D – коэффициент диффузии, т.е. плотность диффузионного потока материала при единичном градиенте концентрации, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; $\frac{dC(\tau, z)}{dz}$ – градиент концентрации диффундирующей примеси в направлении процесса диффузии на расстоянии z от поверхности заготовки в момент времени τ от начала процесса диффузии, $\frac{\text{кг}}{\text{м}^4}$.

Температурная зависимость коэффициента диффузии будет равна

$$D = D_0 \exp \left(- \frac{U}{R \cdot T^o} \right), \quad (8)$$

где D_0 – частотный множитель, характеризующий частоту перескоков атомов в решетке при бесконечно большой температуре, $\frac{\text{м}^2}{\text{с}}$; U – энергия активации, Дж; R – постоянная Больцмана, $\frac{\text{Дж}}{\text{К}}$; T^o – абсолютная температура, К.

По данному источнику так называемого уравнения непрерывности с учетом граничных условий определяем скорость процесса диффузии, а путем интегрирования найденного значения скорости по времени определим величину дозы материала покрытия, диффундирующего через единицу площади обрабатываемой поверхности за время диффузии τ :

$$w(\tau) = 2C_o \cdot \sqrt{\frac{D_o \tau}{\pi}} \cdot \exp \left(- \frac{U}{R \cdot T^o} \right). \quad (9)$$

Источником тепла при ультразвуковой обработке представляется деформация обрабатываемой поверхности индентором. Так как длина контакта индентора с обрабатываемой поверхностью в поперечном сечении дорожки качения более чем на порядок превышает размер пятна контакта в направлении вращения заготовки, в качестве источника тепла возьмем мгновенный плоский источник тепла, вследствие чего выделяющаяся при каждом воздействии индентора на обрабатываемую поверхность температура будет равна

$$\theta = \frac{u}{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot c \cdot \rho \cdot (\tau - t)} \exp \left(- \frac{(x - x_1)^2 + (z - z_1)^2}{4 \cdot a \cdot (\tau - t)} \right), \quad (10)$$

где t – начальный момент времени, с; τ – время от начального момента действия источника, с; u – удельное количество тепла, выделенное мгновенным источником в начальный момент времени $\tau = t$, Дж/м³; ρ – плотность материала изделия, кг/м³; α – коэффициент температуропроводности, м²/с; c – удельная теплоемкость, Дж/(кгК).

Тепло от каждого импульса моментально распространяется в глубь металла, ввиду этого температура на обрабатываемой поверхности моментально понижается. Но в зоне обработки в связи с высокой частотой колебаний индентора создается множество мгновенных источников тепла, тепловые потоки которых накладываются друг на друга. При поочередной работе мгновенных тепловых источников тепловой поток за счет мгновенного отвода тепла не увеличивается в рассматриваемой точке, а выравнивается по всей рабочей зоне.

Из равенства (10) определим среднее значение температуры за время одного цикла колебаний индентора:

$$\theta_0 = \frac{u}{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot c \cdot \rho \cdot T} \int_0^T \frac{1}{\tau} \exp\left(-\frac{(x-x_1)^2 + (z-z_1)^2}{4 \cdot \alpha \cdot \tau}\right) \cdot d\tau \quad (11)$$

Время действия этой температуры равно

$$\tau_u = \frac{2 \cdot a}{\pi \cdot d \cdot n}, \quad (12)$$

где d – диаметр обрабатываемой дорожки качения, мм; n – частота вращения изделия, Гц.

Подставляя найденные значения температуры (11) и времени ее действия (12) в равенство (9), определим искомое количество диффундирующего вещества за один оборот заготовки. Зная частоту вращения заготовки, несложно определить эту величину за все время обработки детали.

Результаты расчетов хорошо согласуются с экспериментом [14].

В виде примера на рис. 2 представлены теоретические и экспериментальные значения толщины покрытия от силы воздействия индентора на обрабатываемую поверхность.

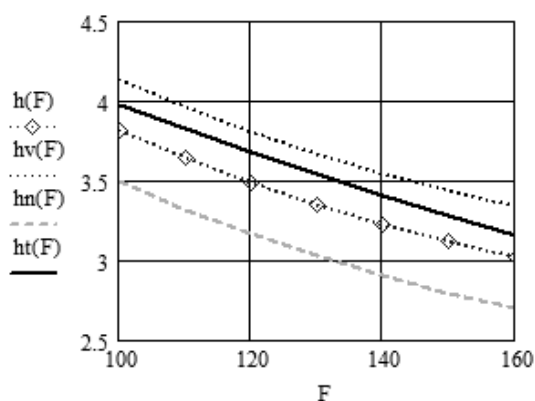


Рис. 2. Расчетные $ht(F)$ и экспериментальные $h(F)$ зависимости толщины покрытия (мкм) от силы $F(H)$ воздействия индентора

Сплошной линией показаны теоретические значения, точками – экспериментальные и пунктирными линиями показаны доверительные границы экспериментальных значений.

Следовательно, теоретические значения толщины покрытия находятся в пределах доверительных границ экспериментальных значений, что подтверждает адекватность математической модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России, Задание № 9.896.2014/Кна выполнение НИИР в рамках проектной части государственного задания в сфере научной деятельности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бржозовский Б.М. Физические основы, технологические процессы и оборудование ультразвуковой обработки материалов // Вестник СГТУ. 2006. № 4. С. 124-129.
2. Применение ультразвука и взрыва при обработке и сборке / М.Ф. Вологин, В.В. Калашников, М.С. Нерубай, Б.Л. Штриков. М.: Машиностроение, 2002.

3. Гаркунов Д.Н. Триботехника, конструирование, изготовление, эксплуатация машин. 5-е изд. М.: Изд-во МСХА, 2002.

4. Захаров О.В., Бржозовский Б.М. Ультразвуковая обработка нежестко закрепленными инструментами: учеб. пособие по курсу «Процессы формообразования и инструменты». Саратов: СГТУ, 2002. 101 с.

5. Круцило В.Г. Исследование влияния остаточных напряжений и деформационного упрочнения в поверхностном слое детали на усталостную прочность // Вестник Самарского государственного технического университета. 2006. № 41. С. 218-221.

6. Житников Ю.З., Волобуев В.А. Величина наклепа при ультразвуковом деформационном упрочнении // Автоматизация и современные технологии. 2001. № 6. С. 3-4.

7. Лесюк Е.А., Алехин В.П., Ким Чанг Сик. Влияние режима ультразвуковой упрочняющей обработки на качество обрабатываемой поверхности // Вестник машиностроения. 2008. № 9. С. 52-55.

8. Носков А.С., Королев А.В. Effectiveness of UT in mechanical engineering // Молодые ученые за инновации: создавая будущее: материалы Междунар. интернет-конф. Саратов, 27-29 апреля 2011 г. Саратов: СГТУ, 2011. С. 136-139.

9. Осипенкова Г.А. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью ультразвуковых крутильных колебаний // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 74-76.

10. Осипенкова Г.А. Повышение износостойкости деталей поверхностным пластическим деформированием с помощью крутильных колебаний // Вестник машиностроения. 2009. № 2. С. 152-156.

11. Королев А.В., Аничкин А.Н. Остаточные напряжения в многослойных кольцевых деталях // Вестник СГТУ. 2010. № 1 (44). С. 53-59.

12. Виноградов А.Н. Комплексная модель термомеханического переноса углерода в процессе финишной обработки шаров на шароодводочном оборудовании // Вестник СГТУ. 2007. № 3. С. 57-61.

13. Королев А.В. Конструкция экспериментальной установки ультразвукового алмазного выглаживания // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2007. С. 107-109.

14. Экспериментальное исследование нанесения на поверхность дорожки качения подшипников твердой графитовой смазки ультразвуковым методом / А.С. Носков, А.В. Королев, О.П. Решетникова, Б.Н. Салимов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 9. С. 3-6.

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Albert V. Korolev – Dr. Sc., Professor Professor: Department of Mechanical Engineering, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сидоренко Александр Дмитриевич – директор ОАО научно-производственного предприятия «Реф-Оптоэлектроника», Саратов

Aleksandr D. Sidorenko – Director Open Joint Scientific manufacturing enterprise «Ref-Optoelectronics», Saratov

Мазина Анжела Александровна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anzhela A. Mazina – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Яковишин Александр Сергеевич – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr S. Yakovishin – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мухина Елена Вячеславовна – аспирант кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena V. Muchina – Postgraduate Department of Mechanical Engineering Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Нейгебауэр Кристина Сергеевна –
аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Kristina S. Neugebauer –
Postgraduate
Department of Mechanical Engineering Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Балаев Андрей Федорович –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey F. Balaev –
Ph.D., Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Решетникова Ольга Павловна –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Olga P. Reshetnikova –
Ph.D., Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Савран Сергей Александрович –
аспирант кафедры «Технология машиностроения»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Savran –
Postgraduate
Department of Mechanical Engineering Technology
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 11.11.15

УДК 621.923.5

А.В. Королёв, А.А. Королёв, А.Д. Сидоренко, А.А. Игнатъев

ВИБРОМЕХАНИЧЕСКАЯ ОЧИСТКА И СТАБИЛИЗАЦИЯ КОЛЕЦ ПОДШИПНИКОВ

Приводятся результаты вибромеханической очистки колец подшипников с применением ультразвуковых колебаний на экспериментальной установке, позволяющей не только качественно очистить детали, но и снизить остаточные напряжения/

Детали подшипников, вибромеханическая очистка, ультразвуковые колебания, остаточные напряжения

A.V. Korolev, A.A. Korolev, A.D. Sidorenko, A.A. Ignatyev

VIBROMECHANICAL PURIFICATION AND STABILIZATION OF BEARING RINGS

The paper presents the results of vibromechanical cleaning of the bearing rings with the aid of ultrasonic vibrations in the experimental installation, which provides high-quality cleaning of the work pieces, and also relieves the residual stresses.

Components of bearings, vibromechanical cleaning, ultrasonic oscillations, residual stresses

Исследованию вибромеханической очистки деталей, особенно с применением колебаний ультразвуковой частоты, посвящено множество работ: [1-8] и другие. В результате исследований выявлен механизм вибромеханической очистки, предложены эффективные способы и устройства для ее осуществления. Зарубежная и отечественная промышленность предлагает эффективные моечные машины.

Широкое применение вибромеханическая очистка деталей от технологических загрязнений получила в условиях подшипникового производства. Однако операции очистки, как правило, трудоёмки и не всегда обеспечивают достижение требуемого качества. Например, на роликах роликовых подшипников в процессе эксплуатации иногда возникают риски, причиной которых являются загрязнения, остающиеся в галтелях колец после сборки подшипников. Эти частицы, попав на роликовую дорожку, могут привести к преждевременному разрушению подшипника.

Для проверки эффективности ультразвуковой очистки колец роликовых подшипников проведены экспериментальные исследования по удалению загрязнений в галтелях колец деталей типа 6-92705АЕУ.01 на моечной машине УЗМ-7. Были приготовлены два раствора – олеино-натровый раствор для «замачивания» деталей и моющий раствор для ультразвукового макета. Растворы по составу и в процентном отношении приготавливались в соответствии с инструкцией 700631.25208.00010 «Ультразвуковая очистка деталей подшипников в водно-щелочных растворах на моечной машине УЗМ-7».

Состав олеино-натрового раствора: едкий натр – 0,3%; олеиновая кислота – 3%. Состав раствора для ультразвукового макета: тринатрийфосфат – 3-5 г/л; эмульгатор ОП-7 1,5-2 г/л; триэтаноламиин – 5-8г/л. Остальное в обоих растворах – водопроводная питьевая вода.

Перед ультразвуковой очисткой детали помещались в ванну с раствором олеино-натрового мыла при температуре 75-85°C и выдерживались с периодическим встряхиванием в течение 5-10 минут. Для ультразвуковой очистки в ванночку помещались 2-4 детали. Время ультразвуковой очистки составляло 3-5 минут. После ультразвуковой очистки детали сушились на воздухе без применения обдува или какого-нибудь обтирочного материала.

Очищенные детали 6-92705АЕУ.01 в количестве 5 шт. и 6-42305АЕУ.01 в количестве 5 шт. проверяли на наличие загрязнений путем протирки их поверхностей белой бязевой салфеткой. В результате проверки были выявлены не удаленные загрязнения.

Причиной низкой эффективности промывки колец в ультразвуковой моечной машине УЗМ-7 является неизбежное экранирование кавитационного процесса в направлении распространения волны как стенками кассет, так и самими деталями колец при вращении ротора.

Для исключения явления экранирования была выбрана схема струйно-ультразвуковой очистки, приведенная на рис. 1.

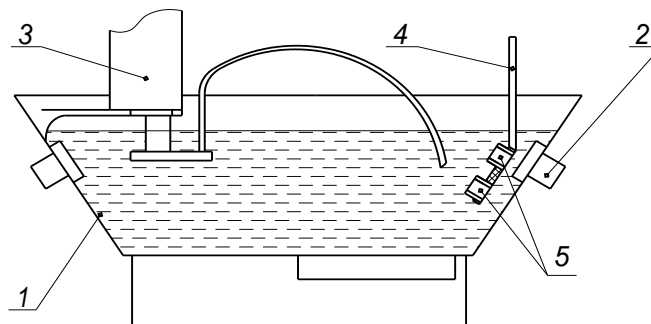


Рис. 1. Экспериментальная установка для проведения экспериментальных работ по УЗ очистке колец подшипников серии 42000: 1 – УЗ ванна; 2 – преобразователь магнитострикционного типа ПМС; 3 – помпа ПА-90, шланг; 4 – ванночка-сетка для установки колец для промывки; 5 – кольца подшипников для промывки

На экспериментальной установке было промыто 450 колец подшипников 92705 с введением ультразвуковых колебаний в моющую среду: 300 наружных колец и 150 внутренних. Все галтели 450 промытых колец просмотрены под микроскопом при 17-кратном увеличении. Отмечено полное отсутствие в галтелях абразивных, металлических частиц, консистентной грязи на масляной или водоземлюльсионной основе. При протирке колец на белой батистовой салфетке иногда оставались темные следы, в которых также отсутствовали металлические и абразивные частицы.

В результате исследований была выявлена еще одна важная особенность ультразвуковой очистки. Ультразвуковая обработка не только эффективно удаляет технологические загрязнения, но и стабилизирует детали подшипников, удаляет остаточные напряжения.

Особенно отчетливо это явление было выявлено при исследовании колец подшипников с полиамидными ребордами, так как в процессе отливки реборд возникают интенсивные остаточные

напряжения, которые проявляются в виде отклонения от круглости. Термический отпуск этих колец недопустим, так как при этом меняются свойства полиамида.

В качестве примера на рис. 2 приведена гистограмма средних значений отклонения от круглости дорожки качения колец 2108-1006120-01 до заливки реборды, после заливки реборды и после релаксации ультразвуковым методом.

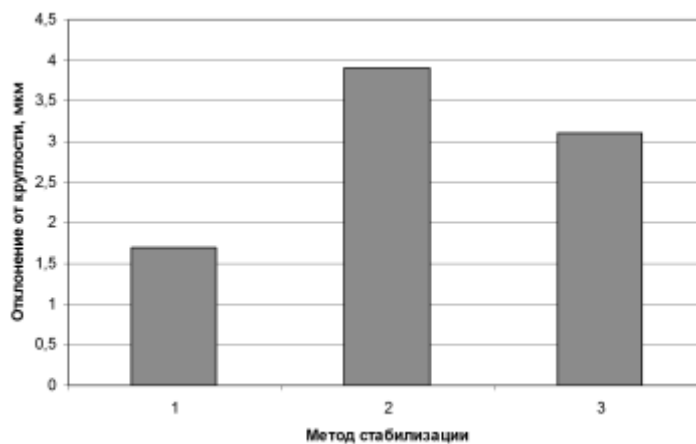


Рис. 2. Средние значения отклонения от круглости колец 2108-1006120-01: 1 – до отливки реборды; 2 – после отливки реборды; 3 – после ультразвуковой обработки

Как видно из рис. 2, отклонения диаметра желоба у деталей, обработанных ультразвуком, примерно на 20 % меньше, чем у необработанных колец. Объясняется это тем, что под действием ультразвуковых колебаний уменьшились остаточные напряжения и в результате этого стабилизировалась геометрическая форма деталей.

Таким образом, применение технологии струйно-ультразвуковой очистки деталей в ультразвуковых моечных машинах позволяет удалять все загрязнения в галтелях колец роликовых подшипников и дополнительно стабилизировать геометрические параметры колец.

ЛИТЕРАТУРА

1. Илюхин А.В., Колбасин А.М., Цепкин П.А. Методы ультразвуковой очистки деталей в условиях основного и ремонтного производства // Науковедение: Интернет-журнал. 2013. № 3(16). С. 1-5.
2. Кудряшов М.Б. Автоматизация технологического процесса ультразвуковой очистки деталей на промышленном предприятии: дис. ... канд. техн. наук. М., 2005. 180 с.
3. Колбасин А.М., Цепкин П.А. Автоматизация технологического процесса ультразвуковой очистки деталей с использованием информационной системы // Автоматизация и управление в технических системах. 2013. № 2(4).
4. Калачев Ю.Н., Нигметзянов Р.И., Приходько В.М. Применение ультразвука в условиях эксплуатации автотракторных средств // Ультразвуковые технологические процессы-98: тез. докл. науч.-техн. конф. М.: МАДИ (ТУ), 1998. С. 45-48.
5. Баранов Л.Ф. Техническое обслуживание и ремонт машин. Минск: Ураджай, 2000.
6. БТИ ГОСНИТИ. Тр. ГОСНИТИ. Тракторы и сельскохозяйственные машины (1984-2003).
7. Остроух А.В. Информационные технологии в научной и производственной деятельности. М.: ООО «Техполиграфцентр», 2011. 240 с.
8. Остроух А.В., Суркова Н.Е. Методы проектирования информационных систем: учеб. пособие. М.: РосНОУ, 2004. 144 с.
9. Ультразвуковая стабилизация размеров колец подшипников с пластмассовыми ребордами / В.В. Болкунов, С.В. Слесарев, А.В. Королев, А.А. Королев // СТИН. 2006. № 9. С. 38-40.
10. Королев А.В., Болкунов В.В., Слесарев С.В. Анализ уровня вибрации подшипниковых узлов 2108-1006120-01 после ультразвуковой стабилизирующей обработки // Прогрессивные направления развития технологии машиностроения: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2005. С. 38-40.

Королев Альберт Викторович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Albert V. Korolev – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Mechanical Engineering Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Королев Андрей Альбертович – доктор технических наук, профессор кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Andrey A. Korolev – Dr. Sc., Professor, Department of Mechanical Engineering Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сидоренко Александр Дмитриевич – соискатель кафедры «Технология машиностроения» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr D. Sidorenko – applicant Department of Mechanical Engineering Technology Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Игнатъев Александр Анатольевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Автоматизация, управление, мехатроника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Ignatyev – Dr. Sc., Professor, Head: Department of Automation, control, mechatronics Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.9.048.4

С.А. Мезенцов, В.Н. Лясников, И.Ю. Гоц

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДА ЭЛЕКТРОИСКРОВОГО ЛЕГИРОВАНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ

Рассматриваются особенности получения износостойких покрытий методом электроискрового легирования. Используя титановые и графитовые электроды, на титановой подложке производится формирование карбидных и карбо-нитридных пленок и тонких покрытий. Производится оценка морфологии, толщины и микротвердости полученных покрытий.

Модификация; морфология титана; титан; электроискровое легирование; микротвердость

S.A. Mezentsov, V.N. Lyasnikov, I.Yu. Gots

AN INSIGHT INTO THE METHOD OF ELECTRO-SPARK DEPOSITION FOR WEAR RESISTANT COATINGS

The paper discusses the issues connected with wear-resistant coatings using the method of electro-spark deposition. The titanium and graphite electrodes are utilized to form carbide and carbo-nitride films and thin coatings on titanium substrate. The provided estimation refers the morphology, thickness and microhardness of the provided coatings.

Modification; titan; morphology of titanium; electric spark deposition, microhardness

Современная промышленность при производстве изделий, работающих в агрессивной среде при высоких механических нагрузках, использует различные металлы и сплавы, особенно хорошо

зарекомендовал себя титан и сплавы на его основе. Титан характеризуется как надежный, коррозионностойкий материал, однако имеет существенные недостатки, связанные со склонностью к контактному схватыванию при трении и низкой износостойкостью, а также с высокой стоимостью. Эти факторы в значительной степени ограничивают область его применения. Целесообразным способом повышения износостойкости и антифрикционных свойств титановых сплавов, а также получения заметного экономического эффекта, является нанесение на поверхность детали покрытия с определенными фазово-структурным составом и физико-механическими свойствами.

Для формирования подобных покрытий существует множество методов. Наиболее широко распространенным в машино- и приборостроении является метод электроплазменного напыления (ЭПН) [1]. Несмотря на ряд преимуществ по сравнению с другими методами, электроплазменное напыление имеет такие недостатки, как вероятность образования трещин, непредсказуемый химический и фазовый состав, низкая адгезия [2, 3].

Применение электроискрового легирования (ЭИЛ) позволяет сформировать покрытие, по морфологии сходное с ЭПН, но обладающее высокими физико-механическими свойствами и лучшей адгезией. Сущность ЭИЛ заключается в использовании плазменных импульсных искровых разрядов в воздушной среде при периодическом контактировании электрода с изделием, вследствие чего осуществляются перенос и осаждение расходуемого материала электрода на поверхность изделия. Основными преимуществами ЭИЛ являются: высокая адгезия с основным материалом, отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки, возможность использования в качестве электродов различных токопроводящих материалов, сравнительная простота технологии, которая не требует специальной предварительной обработки поверхности, низкая энергоемкость ручных и механизированных процессов, высокий коэффициент переноса материала [4].

По результатам проведенных теоретических исследований и ряда экспериментальных работ [5] удалось установить, что для повышения эффективности и улучшения функциональных характеристик покрытия целесообразно осуществить комплексную обработку. В проводимом эксперименте формирование покрытий производилось на воздухе, торцевые поверхности образцов последовательно подвергаются электроискровому легированию титановым и графитовым электродами. В качестве электродов применяются стержни диаметром 2 мм и длиной 25 мм из титанового сплава ВТ1-00 (ГОСТ 19807-74) и графита МПГ-6 (ТУ 48-4807-297-00). Применение последовательной обработки данными электродами необходимо для обеспечения требуемой толщины, морфологии и микротвердости. Воздействие титановым электродом формирует достаточно толстый пористый подслоя с развитой морфологией, а графитовый электрод модифицирует полученную поверхность карбидами, повышая при этом твердость покрытия. После нанесения покрытия образцы снова промывались в ультразвуковой ванне УЗВ2-0,16/37 для удаления загрязнений.

Для обеспечения равномерного перемещения легирующего электрода по поверхности образец закрепляется в трехлапчатый патрон токарно-винторезного станка КП-69 с помощью цанги, изготовленной из титанового сплава ВТ-14 (ГОСТ 19807-91). На суппорте станка через разработанную переходную оснастку по нормали к обрабатываемой поверхности жестко закрепляется модифицирующий электрод (рис. 1).

К управляемым факторам технологического процесса электроискрового легирования покрытия с учетом требований эффективности, независимости и однозначности могут быть отнесены плотность тока j и удельное время обработки t_y . Данные факторы оказывают прямое влияние на морфологию и микротвердость поверхности.

Обработка производится при фиксированных значениях плотности тока, соответствующих режимам установки ЭФИ-46А: мягкий – 11×10^6 А/м², средний – 14×10^6 А/м² и жесткий – 18×10^6 А/м². Удельное время обработки t_y выбирается на трех уровнях:

- 1) для режима мягкий – 4 мин/см², 10 мин/см², 16 мин/см²;
- 2) для режима средний – 2 мин/см², 5 мин/см², 8 мин/см²;
- 3) для режима жесткий – 1 мин/см², 3.5 мин/см², 6 мин/см².

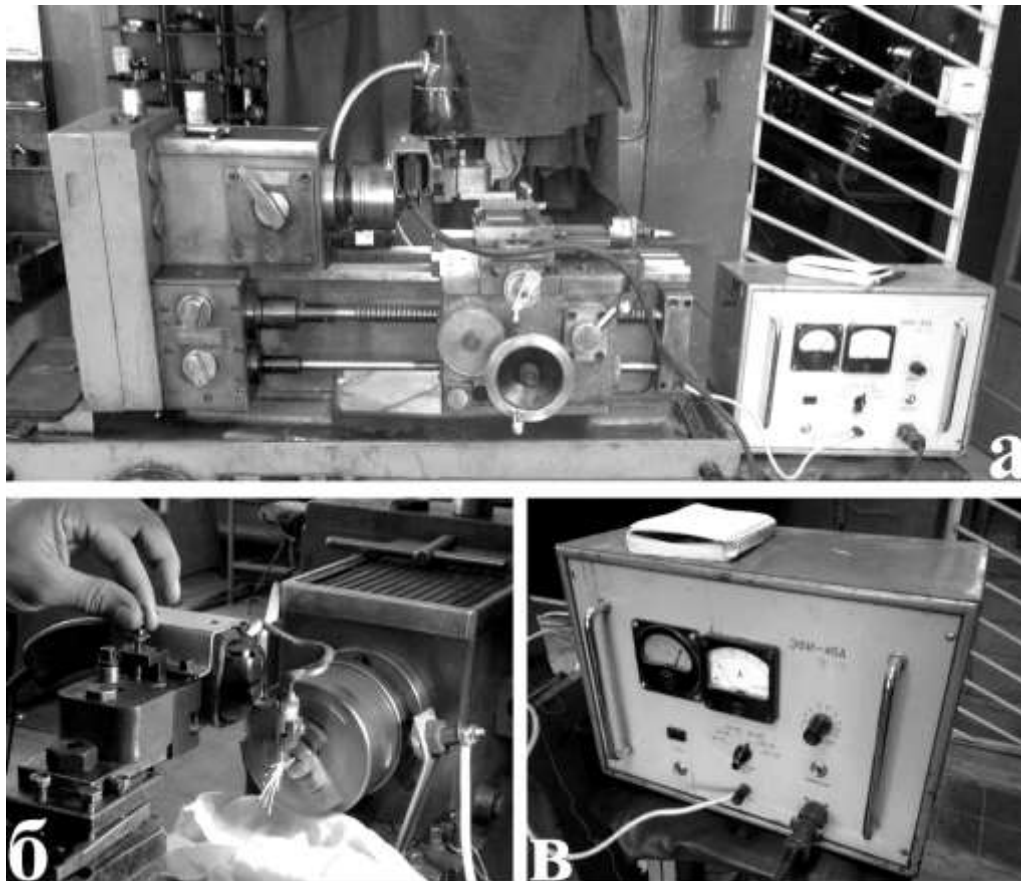


Рис.1. Компонировочная схема электроискрового легирования:
а – общий вид установки; б – процесс ЭИЛ; в – ЭФИ-46А

Данные уровни удельного времени обработки представляют предельные значения. При времени меньше указанных наблюдается формирование несплошного покрытия, а при более длительном времени обработки происходит изменение геометрических размеров образца, коробление вследствие избыточного теплофизического воздействия.

Морфология покрытия, сформированного электроискровым легированием, является гетерогенной и представляет собой множество перекрывающихся друг друга лунок – следов от искровых разрядов, равномерно распределенных по поверхности (рис. 2).

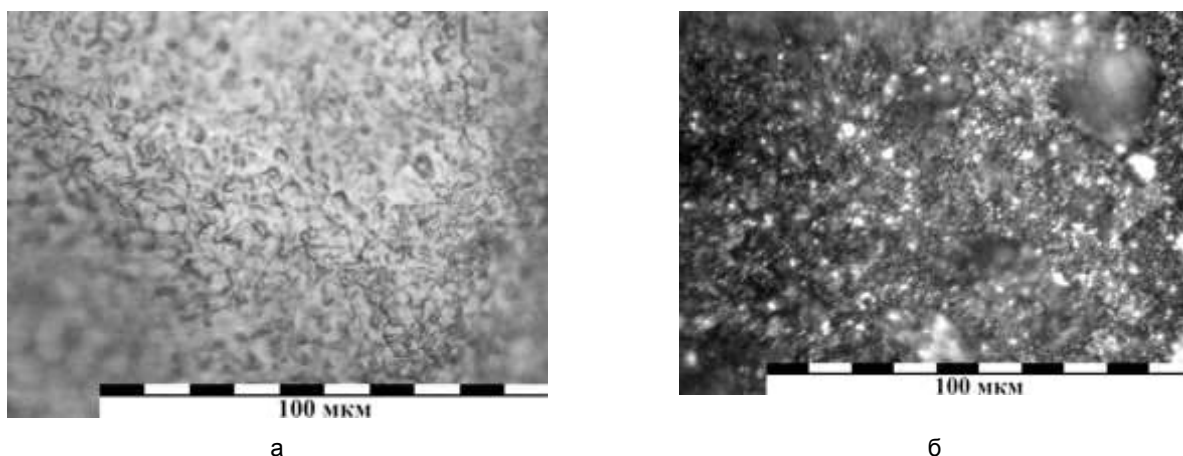


Рис. 2 Морфология поверхности после обработки ЭИЛ: а – титановым электродом;
б – титановым электродом с последующей модификацией графитовым электродом

По результатам оптической микроскопии покрытий установлено:

- электроискровое легирование при удельном времени обработки менее 2 мин/см² и плотности тока ниже 14×10^6 А/м² нецелесообразно в связи с формированием несплошного покрытия;
- электроискровое легирование при удельном времени обработки более 10 мин/см² и плотности тока выше 18×10^6 А/м² нецелесообразно в связи с образованием трещин в покрытии.

Образцы, на которых оптическая микроскопия не выявила явных дефектов, дополнительно исследовались с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) с увеличением 1, 5, 50 тыс. крат. На рис. 3 представлены РЭМ-изображения поверхности покрытий, сформированных только титановым и титановым с последующей обработкой графитовым электродами соответственно.

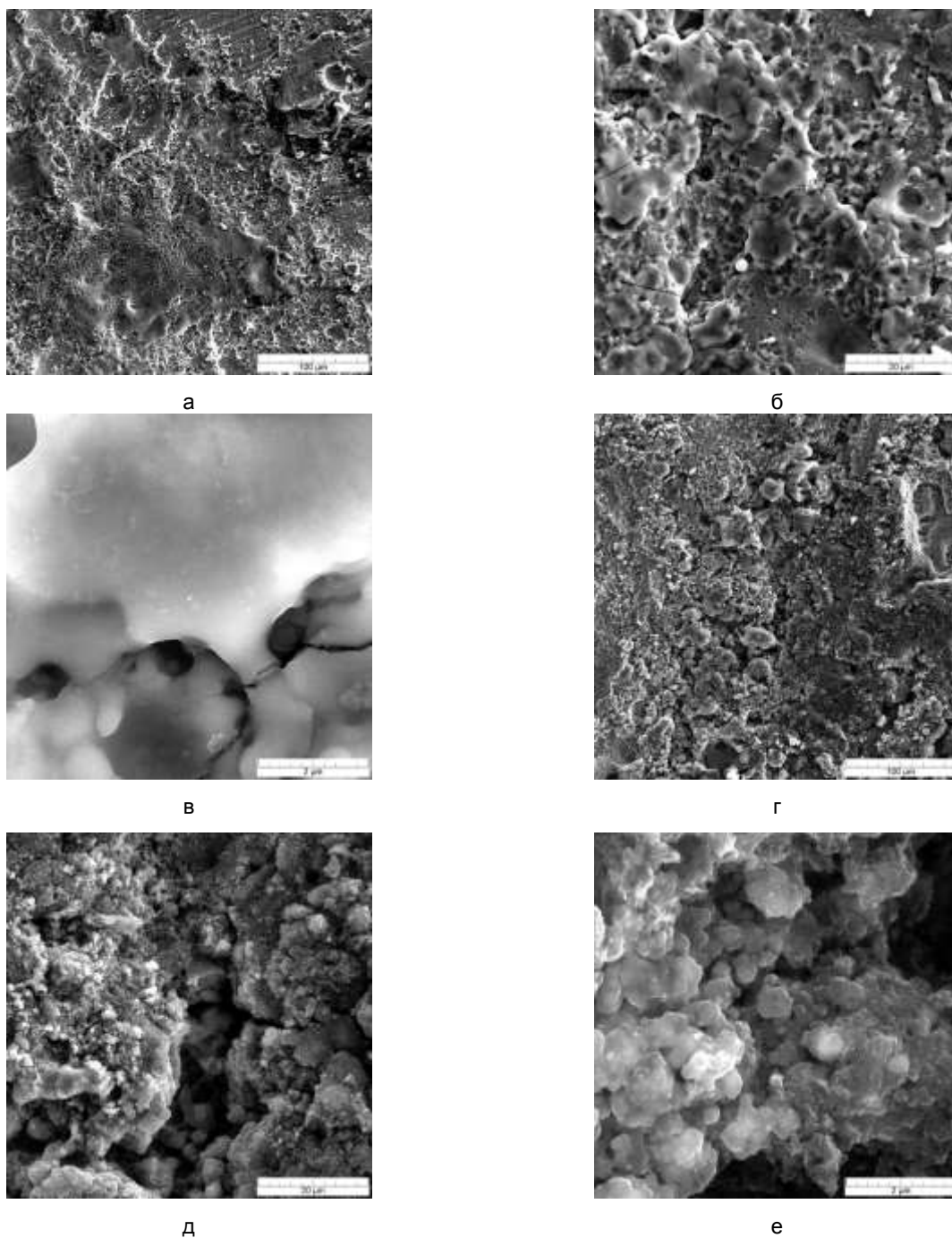


Рис. 3. РЭМ-изображение поверхности покрытия, обработанного электроискровым легированием: титановым электродом (а – 1 тыс. крат; б – 5 тыс. крат; в – 50 тыс. крат); последовательным электроискровым легированием титановым и графитовым электродами (г – 1 тыс. крат; д – 5 тыс. крат; е – 50 тыс. крат)

Пористость покрытий характеризуется количеством микропор. Анализ фотографий поверхности покрытий позволяет сравнить их параметры суммарной пористости. Результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Пористость покрытий, полученных методом ЭИЛ

Номер серии	Электроискровое легирование				Пористость, %			
	Титановый электрод		Графитовый электрод		средняя участка № 1	средняя участка № 2	средняя участка № 3	средняя по образцу
	Плотность тока, А/м ²	Удельное время обработки, мин/см ²	Плотность тока, А/м ²	Удельное время обработки, мин/см ²				
1	11×10 ⁶	10	11×10 ⁶	10	51	53.5	50.1	51.5
2	11×10 ⁶	10	14×10 ⁶	5	54.9	51.4	52	49.8
3	11×10 ⁶	10	18×10 ⁶	3.5	46.9	43.1	50.1	46.7
4	14×10 ⁶	5	11×10 ⁶	10	55.8	61.4	62.7	60.0
5	14×10 ⁶	5	14×10 ⁶	5	59.8	61.8	57.5	59.7
6	14×10 ⁶	5	18×10 ⁶	3.5	53.4	61.5	55.3	56.7
7	18×10 ⁶	3.5	11×10 ⁶	10	70.7	65.9	67.3	68.0
8	18×10 ⁶	3.5	14×10 ⁶	5	69.4	65.8	64.9	66.7
9	18×10 ⁶	3.5	18×10 ⁶	3.5	62.7	66.8	63.2	64.2

Пористость ЭИЛ покрытий в большей степени зависит от плотности тока j : просматривается тенденция к увеличению пористости с повышением j при обработке титановым электродом и уменьшение при увеличении величины j при обработке графитовым электродом. Это связано с тем, что при электроискровом легировании титановым электродом формируется основной рельеф покрытия, а последующая обработка графитом лишь модифицирует поверхностный слой (рис. 2). Минимальную пористость 46.7% имеют покрытия, полученные при $j_1 = 11 \times 10^6$ А/м², $t_{y1} = 10$ мин/см², $j_2 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y2} = 3,5$ мин/см²; максимальную 68% при $j_1 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y1} = 3,5$ мин/см², $j_2 = 11 \times 10^6$ А/м², $t_{y2} = 10$ мин/см².

Проведенный *гранулометрический анализ* показал, что у большинства исследованных образцов на долю элементов поверхности меньше 10 мкм приходится от 72 до 95 %, доля элементов размером от 10 до 20 мкм – от 2 до 17 %, более 20 мкм – от 2 до 9 %.

Композиционную *структуру покрытия*, сформированного электроискровым легированием, можно представить следующим образом (рис. 4).

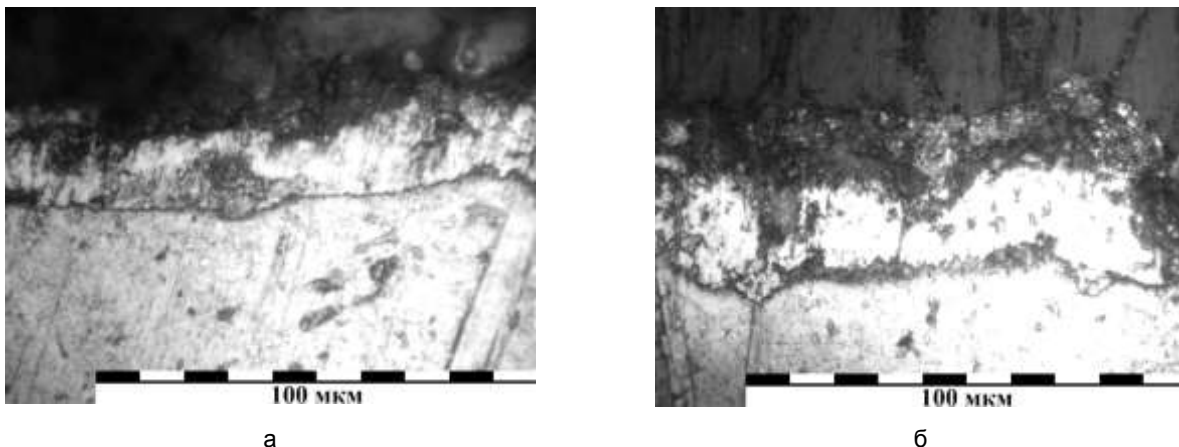


Рис. 4. Поперечный шлиф покрытий, сформированных: а – титановым электродом; б – титановым электродом с последующей модификацией графитовым электродом

Верхний слой покрытия является пленкой из материала анода, модифицированного элементами материала катода и межэлектродной среды, лежащего на поверхности в виде отдельных агломератов, сплошность которых зависит от режимов обработки, материала анода и времени воздействия. Под ним располагается зона, состоящая из смеси материалов анода и катода. Далее следует слой, сформированный за счет диффузии химических элементов материала анода в материале катода. И, наконец, под ним располагается самый нижний и наибольший по толщине слой, образованный в результате импульсного теплового воздействия. Он представляет структуру, трансформированную из материала

детали, отличаясь от нее кристаллографическим строением и зернистостью. С перемещением вглубь данная структура плавно переходит в структуру основного материала. В зависимости от режимов электроискрового легирования значимость первых трех слоев может быть существенной или незначительной, а роль структуры, сформированной под действием импульсного теплового воздействия, является всегда основополагающей.

Толщина нанесенного композиционного покрытия зависит от технологических режимов электроискрового легирования (табл. 2). Наибольшее влияние оказывает величина плотности тока при обработке титановым электродом, последующее воздействие графитовым электродом не вызывает существенного прироста покрытия, происходит модификация нанесенного слоя путем проникновения углерода в нанесенное титановое покрытие.

Таблица 2

Толщина покрытий, полученных электроискровым легированием

Номер серии	Электроискровое легирование				Толщина покрытия		
	Титановый электрод		Графитовый электрод		мин. по образцу, $\times 10^{-6}$ м	макс. по образцу, $\times 10^{-6}$ м	средняя по образцу, $\times 10^{-6}$ м
	Плотность тока, А/м ²	Удельное время обработки, мин/см ²	Плотность тока, А/м ²	Удельное время обработки, мин/см ²			
1	11×10^6	10	11×10^6	10	8.5	13.2	10
2	11×10^6	10	14×10^6	5	9.8	13.4	12
3	11×10^6	10	18×10^6	3.5	13.7	15.6	15
4	14×10^6	5	11×10^6	10	25.3	29.7	28
5	14×10^6	5	14×10^6	5	26.1	32.6	30
6	14×10^6	5	18×10^6	3.5	29.4	32.5	31
7	18×10^6	3.5	11×10^6	10	61.1	67.4	65
8	18×10^6	3.5	14×10^6	5	68.2	70.1	69
9	18×10^6	3.5	18×10^6	3.5	65.9	73.5	70

В зависимости от режима обработки возможно получение покрытий толщиной от 8 до 70 мкм: минимальная толщина формируется при $j_1 = 11 \times 10^6$ А/м², $t_{y1} = 10$ мин/см², $j_2 = 11 \times 10^6$ А/м², $t_{y2} = 10$ мин/см², максимальная – при $j_1 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y1} = 3,5$ мин/см², $j_2 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y2} = 3,5$ мин/см².

Микротвердость титанового подслоя колеблется в диапазоне от 12,4 до 18 ГПа, с максимальными значениями при среднем t_y . Микротвердость покрытия после модификации графитовым электродом имеет тенденцию монотонно возрастать с увеличением плотности тока и не зависит от удельного времени обработки (рис. 5).

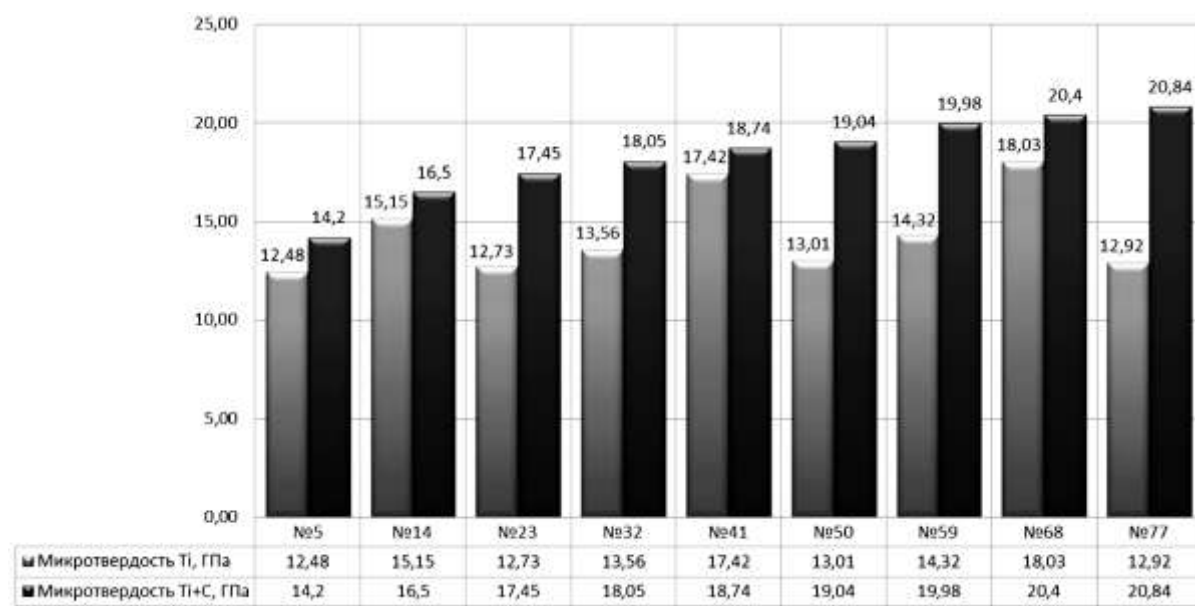


Рис. 5. Анализ микротвердости покрытий после ЭИО титаном и графитом

Подведем итоги проведенных исследований:

1. Установлена возможность формирования твердых износостойких покрытий методом электроискрового легирования.

2. Определены оптимальные режимы электроискрового легирования ($j_1 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y1} = 3,5$ мин/см², $j_2 = 18 \times 10^6$ А/м², $t_{y2} = 3,5$ мин/см²), обеспечивающие рациональное сочетание физико-механических свойств:

- открытая пористость – 64 %;
- толщина покрытия – 70 мкм, из них около 30 мкм модифицированы графитовым электродом;
- микротвердость – титановый подслои 12.9 ГПа, верхний слой покрытия, обработанный графитом – 20.8 ГПа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лясников В.Н., Бутовский К.Г. Напыленные покрытия, технология и оборудование: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2000. 118 с.

2. Смирнов И.В., Черный А.В., Белоусова Н.А. Структура и коррозионная стойкость плазменных покрытий при напылении керамических плакированных порошков // Вестник НТУУ «КПИ». 2010. № 60.

3. Corrosion properties of plasma-sprayed Al₂O₃-TiO₂ coatings on Ti metal / Y. Song, I. Lee, S.N. Hong et al. // J. MATER SCI 41. 2006. P. 2059.

4. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования // Перспективные материалы. 2011. № 2. С. 38-102.

5. Мезенцов С.А., Лясников В.Н. Формирование наноструктурированных биокомпозиционных покрытий на изделиях медицинской техники искродуговым методом // Физическое материаловедение: материалы VI Междунар. школы с элементами научной школы для молодежи, 30 сентября – 5 октября 2013 г. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. С. 65-67.

Мезенцов Сергей Александрович – аспирант кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Mezentsov – postgraduate
Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir N. Lyasnikov – Dr. Sc., Professor,
Head: Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Гоц Ирина Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Irina Yu. Gots – Ph. D., Associate professor
Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

С.А. Мезенцов, В.Н. Лясников, И.Ю. Гоц

ИЗНОСО- И КОРРОЗИОННОСТОЙКИЕ ПОКРЫТИЯ НА ОСНОВЕ ТИТАНА, СФОРМИРОВАННЫЕ ЭЛЕКТРОИСКРОВЫМ ЛЕГИРОВАНИЕМ

Показаны особенности получения износ- и коррозионностойких покрытий методом электроискрового легирования. При последовательном электроискровом легировании титановым и графитовым электродами на титановой подложке формируется защитный слой. Производятся энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный и рентгеноструктурный фазовый анализ полученных покрытий, а также оценка коррозионной стойкости нанесенного слоя.

Модификация; морфология титана; титан; электроискровое легирование; коррозионная стойкость

S.A. Mezentsov, V.N. Lyasnikov, I.Yu. Gots

WEAR AND CORROSION RESISTANT TITANIUM-BASED COATING FORMED BY ELECTRO-SPARK DEPOSITION

The paper presents the basic features of producing wear and corrosion resistant coatings by electro-spark deposition. A titanium substrate layer is formed using electro-spark deposition by titanium and graphite electrodes. The XRF and X-ray phase analysis is made for the given coatings, as well as evaluation of corrosion resistance of the applied layer.

Modification; titan; morphology of titanium; electro-spark deposition, corrosion resistance

Современные тенденции развития науки и техники показали, что актуальной проблемой промышленного производства является проблема сохранения ресурсов. Одним из путей решения данной проблемы является увеличение сроков эксплуатации изделий техники, деталей машин и механизмов. Основными подходами к решению поставленной проблемы являются разработка и использование новых материалов, а также обработка уже существующих материалов, направленная на максимальное повышение их свойств. Последний подход является наиболее целесообразным с экономической точки зрения.

Для формирования подобных покрытий существует множество методов, наиболее широко распространенным в машино- и приборостроении является метод электроплазменного напыления (ЭПН) [1]. Несмотря на ряд преимуществ по сравнению с другими методами электроплазменное напыление имеет такие недостатки, как вероятность образования трещин, непредсказуемый химический и фазовый состав, низкая адгезия [2, 3].

Применение электроискрового легирования (ЭИЛ) позволяет наносить покрытие, обладающее высокими физико-механическими свойствами и коррозионной стойкостью. Основными преимуществами ЭИЛ являются: высокая адгезия с основным материалом, отсутствие нагрева и деформаций изделия в процессе обработки, возможность использования в качестве электродов различных токопроводящих материалов, сравнительная простота технологии, которая не требует специальной предварительной обработки поверхности, низкая энергоемкость ручных и механизированных процессов, высокий коэффициент переноса материала [4].

По результатам проведенных теоретических исследований и ряда экспериментальных работ [5, 6] удалось установить, что для повышения эффективности и улучшения функциональных характеристик покрытия целесообразно осуществить комплексную обработку. В проводимом эксперименте формирование покрытий производилось на воздухе, торцевые поверхности образцов последовательно подвергаются электроискровому легированию титановым и графитовым электродами. Применение последовательной обработки данными электродами необходимо для обеспечения требуемой толщины, морфологии и микротвердости. Воздействие титановым электродом формирует достаточно

толстый пористый подслоем с развитой морфологией, а графитовый электрод модифицирует полученную поверхность карбидами, повышая при этом твердость покрытия. В качестве электродов применяются стержни диаметром 2 мм и длиной 25 мм из титанового сплава ВТ1-00 (ГОСТ 19807-74) и графита МПГ-6 (ТУ 48-4807-297-00). К управляемым факторам технологического процесса электроискрового легирования покрытия с учетом требований эффективности, независимости и однозначности могут быть отнесены плотность тока j и удельное время обработки t_y . Данные факторы оказывают прямое влияние на морфологию и микротвердость поверхности.

Проведенный энергодисперсионный рентгенофлуоресцентный анализ, как поточечный, так и по площадям, показал, что после проведения процесса электроискрового легирования в составе покрытия присутствуют следующие элементы: Si, Ti, N, O и C в различном процентном соотношении (рис. 1).

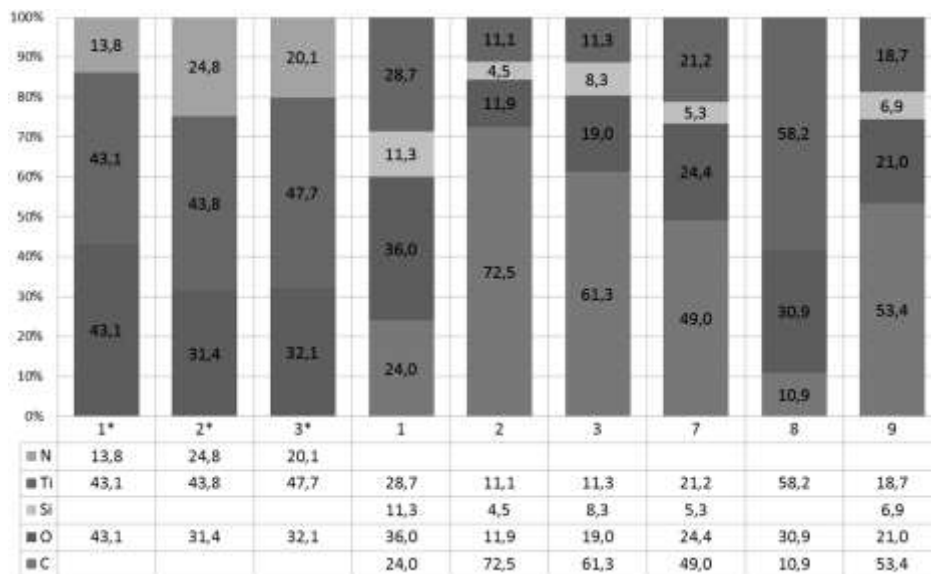


Рис. 1. Диаграмма распределения химических элементов на поверхности ЭИЛ покрытий

После обработки титановым электродом на поверхности покрытия преобладают следующие элементы: титан (от 43 до 48 %), кислород (от 31 до 43 %) и азот (от 13 до 25 %). При последующей модификации графитовым электродом картина распределения химических элементов на поверхности несколько меняется: начинает преобладать углерод (до 72 %), присутствие азота практически не фиксируется, в небольших количествах (от 4 до 11 %) обнаруживается кремний. Наличие кремния в составе сформированного покрытия объясняется тем, что он в количестве до 4% присутствует в материале легирующего графитового электрода. Анализ химического состава электродного материала приведен на рис. 2 и в табл. 1.

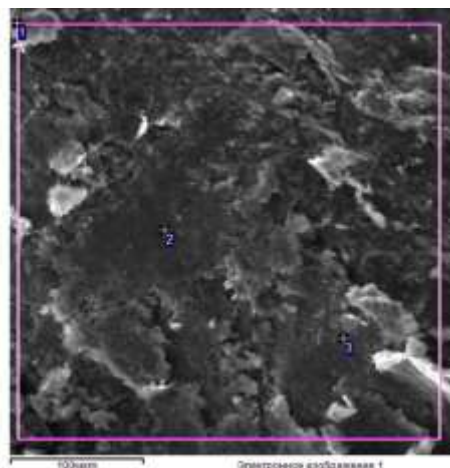


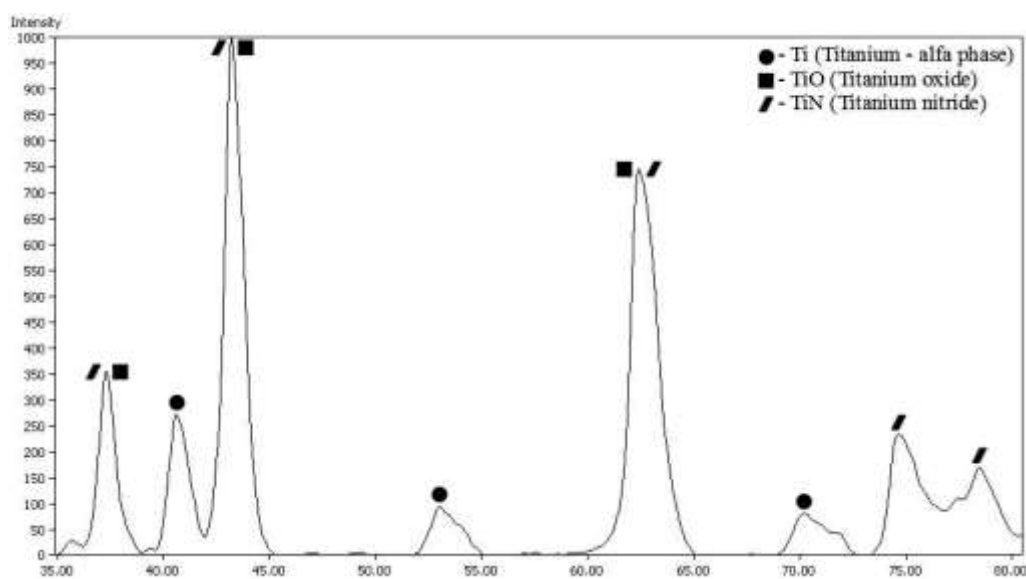
Рис. 2. РЭМ-изображение поверхности графитового электрода с цифровыми метками (спектрами), по которым проводился ЭДРФА (табл. 1)

Таблица 1

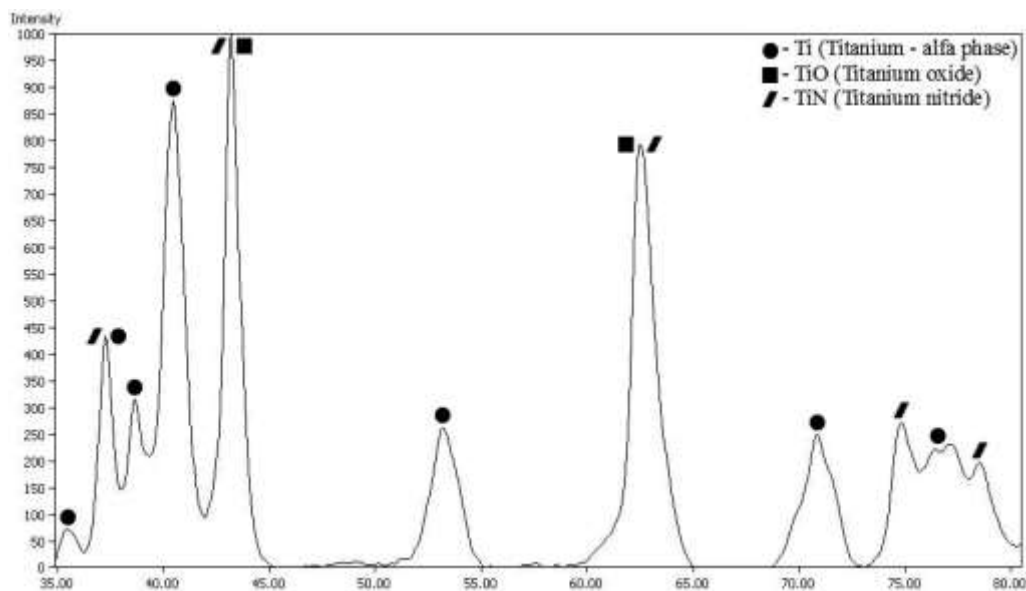
Распределение химических элементов по поверхности (%)

Спектр	C	O	Si
1	84,25	11,6	4,15
2	96,56	2,08	1,36
3	94,46	2,72	2,82

Рентгеноструктурный фазовый анализ, проведенный с учетом результатов ЭРДФА образцов с покрытиями, полученными последовательным электроискровым легированием титановым и графитовым электродами, позволил получить их дифрактограммы с пиками определенных фазовых составляющих. В результате электроискрового легирования титановым электродом на поверхности изделия и, как следствие ее нагрева, а также взаимодействия с окружающей атмосферой, образуются оксидные и нитридные соединения титана (рис. 3).



а



б

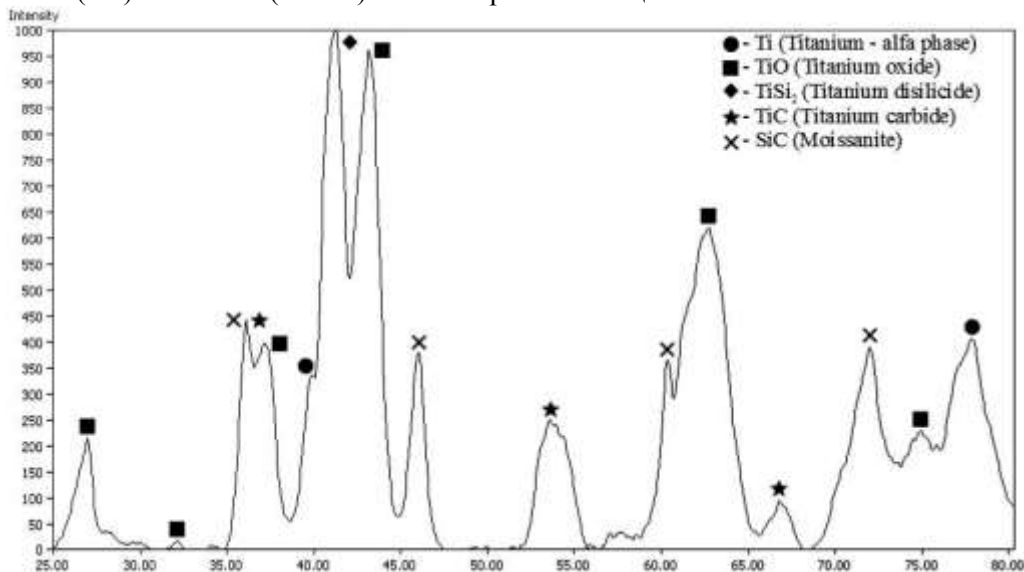
Рис. 3. Дифрактограммы образцов с покрытиями, сформированными электроискровым легированием титановым электродом при различных режимах обработки:
 а – $j_1 = 11 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y1} = 10 \text{ мин/см}^2$; б – $j_1 = 14 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y1} = 5 \text{ мин/см}^2$

В результате последующего воздействия графитовым электродом на поверхности зафиксировано присутствие следующих химических соединений: оксид титана (TiO), дисилицид титана (TiSi₂), карбид титана (TiC) и карбид кремния (SiC) (рис. 4).

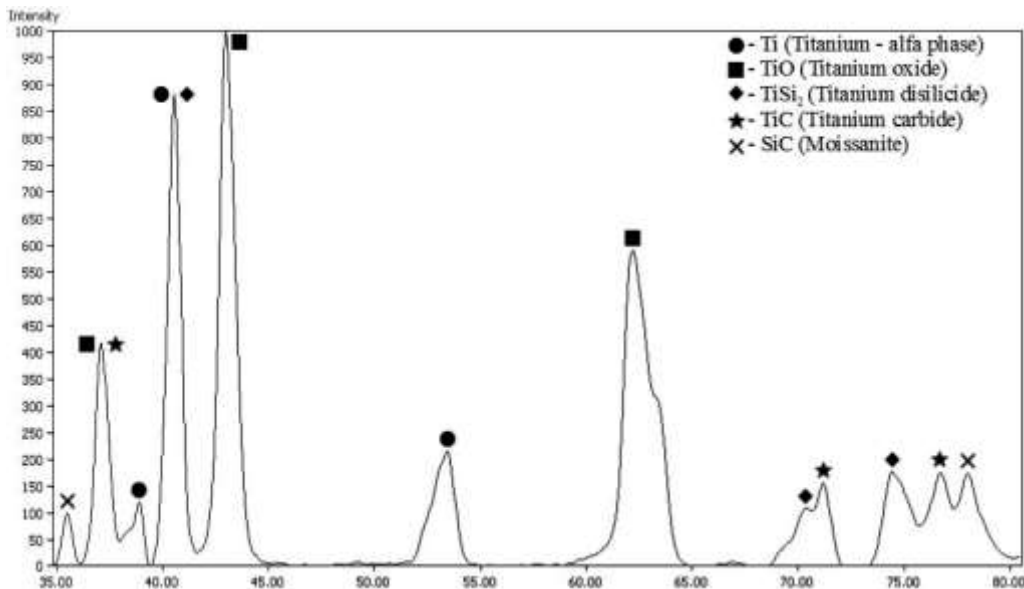
Образование в покрытии соединений TiSi₂, TiC и SiC объясняется наличием кремния и углерода в составе легирующего электрода (табл. 1).

Дисилицид титана является химически стойким по отношению к азотной, серной, соляной, щавелевой кислотам, не растворяется в воде и в разбавленных растворах щелочей, также слабо взаимодействует с «царской водкой». Имеет микротвердость порядка 8,5 ГПа.

Карбид титана – огнеупорный керамический материал, аналогичный карбиду вольфрама, обладает исключительно высокой твёрдостью (9-9,5 по шкале Мооса), жаропрочностью и стойкостью к действию некоторых кислот (серной и соляной), однако растворим в «царской водке», а также в смесях плавиковой (HF) и азотной (HNO₃) кислот и расплавах щелочей.



а



б

Рис. 4. Дифрактограммы образцов с покрытиями, сформированными электроискровым легированием титановым с последующей обработкой графитовым электродами:

а – $j_1 = 11 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y1} = 10 \text{ мин/см}^2$, $j_2 = 18 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y2} = 3,5 \text{ мин/см}^2$;
 б – $j_1 = 18 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$, $j_2 = 18 \times 10^6 \text{ A/m}^2$, $t_{y2} = 3,5 \text{ мин/см}^2$

Карбид кремния является твердым, тугоплавким веществом, кристаллическая решетка аналогична решетке алмаза. По типу химической связи карбид кремния относится к ковалентным кристаллам. Энергия ковалентной связи между атомами кремния и углерода в кристаллах SiC почти в три раза превышает энергию связи между атомами в кристаллах кремния. Благодаря сильным химическим связям карбид кремния обладает высокой химической и радиационной стойкостью, температурной стабильностью физических свойств, большой механической прочностью и высокой твердостью. В инертной атмосфере карбид кремния разлагается только при температуре свыше 2830 °С.

Из-за высокой коррозионной стойкости титана и его сплавов к ним практически не применимы или чрезвычайно затруднительны такие классические методы определения скорости коррозии, как весовой и объемный. В то же время являются доступными и получили повсеместное распространение электрохимические методы. К ним относится, прежде всего, оценка коррозионной стойкости по стационарному потенциалу (потенциал коррозии E_k) образца и по скорости его установления после помещения в исследуемую среду. Быстрое установление электроположительного значения потенциала коррозии свидетельствует о хорошей пассивации металла (самопассивации), что предполагает высокую коррозионную стойкость. Потенциал коррозии отражает состояние поверхности и связан с током обмена (коррозионным током) на границе металл – раствор. Но этот метод не позволяет численно оценить скорость коррозии, хотя дает возможность вести сравнения разных металлов друг с другом и в разных условиях, в том числе оценивать пригодность полученных покрытий для изделий, работающих в агрессивных средах.

Основным электрохимическим методом изучения коррозионной стойкости металлов является метод поляризационных кривых, снятых потенциостатическим или потенциодинамическим (при медленно и линейно меняющемся потенциале) способами. При последнем способе очень широко применяется скорость изменения потенциала от 0,1 до 10,0 мВ/с.

Кривые зависимости плотности тока от потенциала (i , E) при заданной линейной скорости развертки потенциала $V_p = 8$ мВ/с снимали от бестокового потенциала в анодную и катодную сторону до резкого подъема тока в 3% растворе NaCl (ГОСТ 9.302-88). Измерения зависимости потенциала от тока снимались относительно стандартного водного хлорсеребряного электрода сравнения ($E = 0,223$ В). Для снятия и регистрации данных использовался импульсный компакт-потенциостат П-8 в комплекте с компьютерным программным обеспечением. Так как в данных условиях процесс коррозии контролируется катодной реакцией, построение коррозионных диаграмм позволило определить потенциал и ток коррозии, протекающей с кислородной и водородной деполаризацией. О силе коррозионного разрушения судили по ширине области потенциалов пассивного состояния.

На рис. 5 и в табл. 2 приведены данные коррозионных испытаний, полученных методом снятия потенциодинамических кривых.

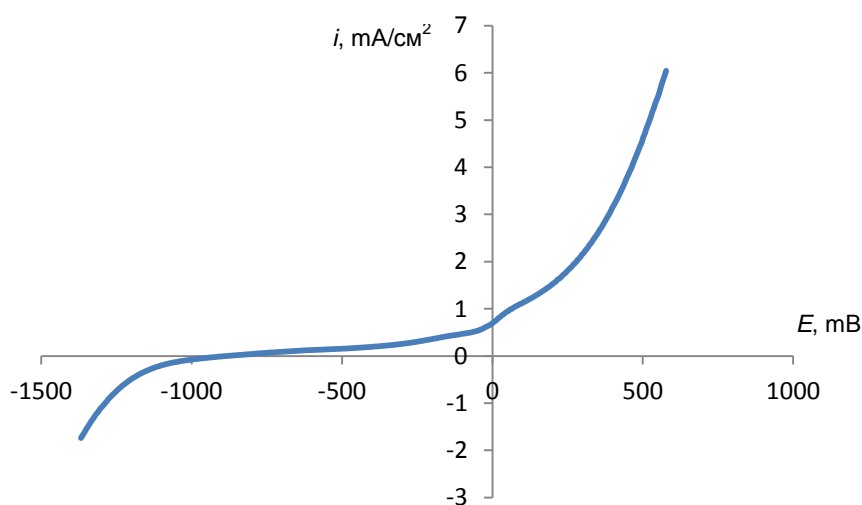


Рис. 5. Потенциодинамические кривые на чистом титановом образце без покрытия, снятые в 3%-м растворе NaCl при скорости линейной развертки потенциала $v = 8$ мВ/с при температуре 25 °С

Влияние режимов на электрохимическое поведение титанового электрода

Название образца	$E_a(B)$	$E_k(B)$	$\Delta E, (B)$	$i_{k,1}^a, \text{мА/см}^2$	$i_{k,2}^k, \text{мА/см}^2$	$E_{cm}, (B)$
Чистый титановый образец (без покрытия)	0,25	-1,32	1,57	0,563	-0,179	-0,403
После ЭИЛ титановым электродом ($j_1 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$)	1,672	-1,322	2,91	0,334	-0,185	-0,315
После последовательного ЭИЛ титановым ($j_1 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$) и графитовым ($j_1 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$; $j_2 = 14 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y2} = 5 \text{ мин/см}^2$) электродами	1,483	-1,453	2,991	0,304	-0,248	-0,075

Из результатов изменений следует, что наиболее положительный потенциал соответствует образцу с нанесенным карбо-нитридным покрытием ($j_1 = 18 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y1} = 3,5 \text{ мин/см}^2$; $j_2 = 14 \times 10^6 \text{ А/м}^2$, $t_{y2} = 5 \text{ мин/см}^2$) и составляет $E_{cm} = -0,075 \text{ В}$ (отн.в.х.с.э.). Он же обладает и наиболее широкой областью термодинамической стабильности (крайние точки начала кислородной и водородной коррозии) $\Delta E = 2,994 \text{ В}$, в то время как на чистом титане $\Delta E = 1,57 \text{ В}$. Плотности тока имеют достаточно высокие значения, близкие к значениям тока обмена, что указывает на высокое электросопротивление полученных покрытий.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лясников В.Н., Бутовский К.Г. Напыленные покрытия, технология и оборудование: учеб. пособие. Саратов: СГТУ, 2000. 118 с.
2. Catledge S.A., Fries M., Vohra Y.K. Nanostructured surface modifications for biomedical implants // Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology, edited by H.S. Nalwa. Vol. 10. P. 1-22.
3. Corrosion properties of plasma-sprayed Al₂O₃-TiO₂ coatings on Ti metal / Y. Song, I. Lee, S.N. Hong et al. // J. MATER SCI 41. 2006. P. 2059.
4. Effect of heat treatment on high pressure plasma sprayed hydroxyapatite coatings / M. Espanol, V. Guipont, K.A. Khor et al. // Surface Engineering. 2002. Vol. 18. № 3. P. 213-218.
5. Коротаев Д.Н., Иванова Е.В. Субструктурное поверхностное упрочнение деталей трибосистем методом электроискрового легирования // Перспективные материалы. 2011. № 2. С. 38-102.
6. Мезенцов С.А., Лясников В.Н. Формирование наноструктурированных биокomпозиционных покрытий на изделиях медицинской техники искро-дуговым методом // Физическое материаловедение: материалы VI Междунар. школы с элементами научной школы для молодежи, 30 сентября – 5 октября 2013 г. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2013. С. 65-67.
7. Мезенцов С.А., Лясников В.Н. Искро-дуговое модифицирование и наноструктурирование биокomпозиционных покрытий дентальных имплантатов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ-26: материалы XXVI Междунар. науч. конф. Саратов: СГТУ, 2013.

Мезенцов Сергей Александрович – аспирант кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Лясников Владимир Николаевич – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Гоц Ирина Юрьевна – кандидат химических наук, доцент кафедры «Физическое материаловедение и биомедицинская инженерия» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Sergey A. Mezentsov – Postgraduate
Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Vladimir N. Lysanikov – Dr. Sc., Professor,
Head Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina Yu. Gots – Ph.D., Associate professor
Department of Physical material science and biomedical engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

УДК 004.946

А.А. Большаков, А.А. Сгибнев

ВЫБОР И РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ ВЫВОДА МАССИВА ИЗОБРАЖЕНИЙ В СТЕНДЕ ОБЪЕМНОЙ ВИЗУАЛИЗАЦИИ

Рассмотрены существующие способы подключения устройств вывода изображений. Предлагается способ подключения массива проекторов для формирования объемного изображения. Описывается несколько режимов работы разрабатываемого программного обеспечения в зависимости от используемого контента: статические изображения, видеофайлы или компьютерная трехмерная модель объекта.

Трехмерная визуализация, мультитекранная система, массив проекторов, объемный дисплей

A.A. Bolshakov, A.A. Sgibnev

SELECTION AND REALISATION OF A HARDWARE AND SOFTWARE SYSTEM FOR VISUALIZATION OF VOLUMETRIC DATA

The paper presents the existing methods of connecting devices to display an array of images. The provided method is used to connect an array of projectors to form a three-dimensional image. It describes several modes of operation, depending on the data representation format, such as static images, video files or computer three-dimensional models of objects.

Three-dimensional visualization, array of projectors, multi-screen system volumetric display

Введение

В настоящее время актуальной является задача вывода изображений на несколько устройств, например мониторов или проекторов. Подобная схема может использоваться в игровой индустрии для расширения виртуального пространства, создания видеостен из нескольких мониторов и др. Также в последнее время увеличивается количество разработок так называемых объемных дисплеев, способных формировать трехмерное изображение, воспринимаемое человеком в качестве объемного [1]. При этом в отличие, например, от очков виртуальной реальности объекты, формируемые объемным дисплеем, занимают реальное физическое пространство.

Нами продолжаются работы по созданию стенда объемной визуализации, принцип работы которого заключается в следующем: вокруг оси 1 (рис. 1) со скоростью 1200-1500 об/мин вращается непрозрачный барабан 2 со сквозными отверстиями 3, закрытыми прозрачным материалом. Внутри барабана установлен просветный лентичулярный экран 4 на который выводится изображение. На лицевой стороне стенда расположена прозрачная мультитекранная панель 5, выполненная в виде части прямого многогранника и покрытая пленкой обратной проекции, на которую выводится первичное изображение 6. Изображение формируется на всех гранях мультитекранной панели при помощи ряда проекторов 7, световые пучки 8 которых сфокусированы на слое пленки обратной проекции.

С использованием двух модулей оптической системы 9 и 10 сформированный световой пучок пересекает ось стенда и достигает поверхности зеркального многогранника 11, составленного из

плоских поверхностных зеркал. Отразившись от зеркального многогранника, световой пучок достигает экрана 4, где и формирует итоговое изображение. Барабан на подшипниках 13 приводится во вращение при помощи привода 14.

Вышеописанный стенд является прототипом кругового объемного дисплея для визуализации трехмерных объектов и сцен.

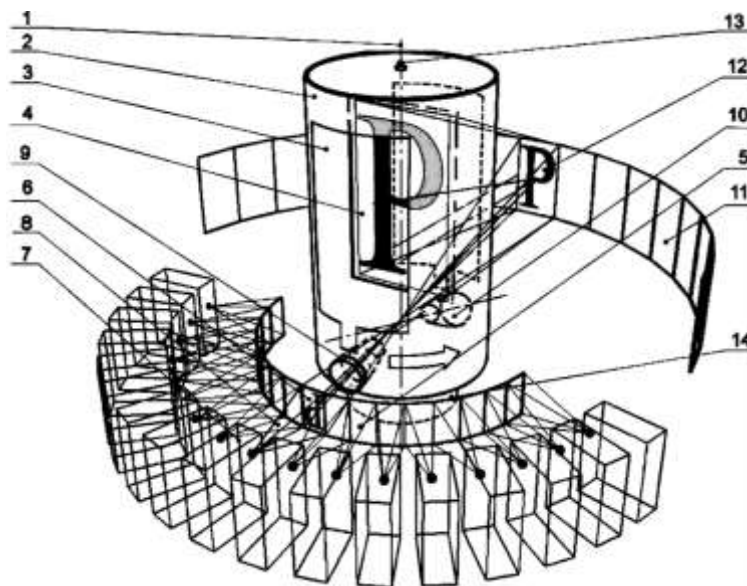


Рис. 1. Схема стенда

Постановка задачи. В работе поставлена задача выбора способа подключения массива проекторов в количестве 16 штук (в дальнейшем планируется увеличить это число до 36 и больше) на основе существующих решений в аналогичных проектах, а также сформировать объемное изображение, видимое в диапазоне 160 градусов по горизонтали.

При этом на проекторы необходимо синхронно выводить изображения объекта разрешением 800×600 , которые представляют собой изображение модели в различных ракурсах. Основными критериями выбора являются масштабируемость решения (возможность дальнейшего увеличения количества устройств вывода), дешевизна, относительно других вариантов, простота установки и сборки.

Кроме этого, актуальными являются передача и распределение данных на устройство вывода, а также взаимодействие с пользователем.

Использование одной рабочей станции [2]. Сотрудники Университета Южной Калифорнии создали систему для телеконференций, способную отображать полноразмерную человеческую голову с углом обзора в 110 градусов. Для этого они использовали 72 DLP пико-проектора компании Texas Instruments, которые подключили к одному компьютеру с 24 видеовыходами с разрешением 1920×480 . Это стало возможным из-за использования четырех видеокарт AMD FirePro W600 Eyefinity, а также разветвителей Matrox TripleHeadToGo, позволяющих разделить исходное изображение на три меньших разрешением 640×480 . Недостатком такой системы является весьма высокая стоимость, которая будет повышаться при масштабируемости проекта, т.е., при увеличении количества проекторов для расширения угла обзора.

Кластерная проекционная система [3]. К недостаткам схемы с одной рабочей станцией (рис. 2) также можно отнести необходимость увеличения числа компьютеров при использовании большего числа проекторов, т.к. количество портов для подключения видеокарт в материнских платах ограничено. Следующим шагом авторов описанной выше схемы является ее расширение до 216 проекторов. Для этого портативные LED-проекторы Qumi v3 с разрешением 1280×800 подключались к шести компьютерам для отрисовки изображений. Каждый компьютер содержал две видеокарты ATI Eyefinity 7870.

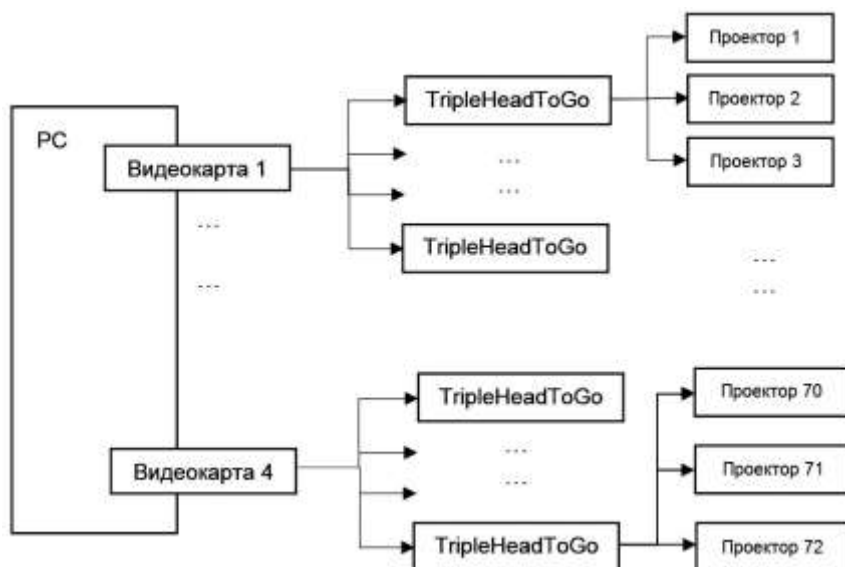


Рис. 2. Схема подключения проекторов с одной рабочей станцией

Это позволило использовать 12 видеовыходов с одного компьютера. Каждый видеосигнал затем разделялся с использованием идентичного разветвителя Matrox TripleHeadToGo. При подобной схеме (рис. 3) подключения увеличивается сложность синхронизации проекторов, возрастают габариты и стоимость установки в целом.

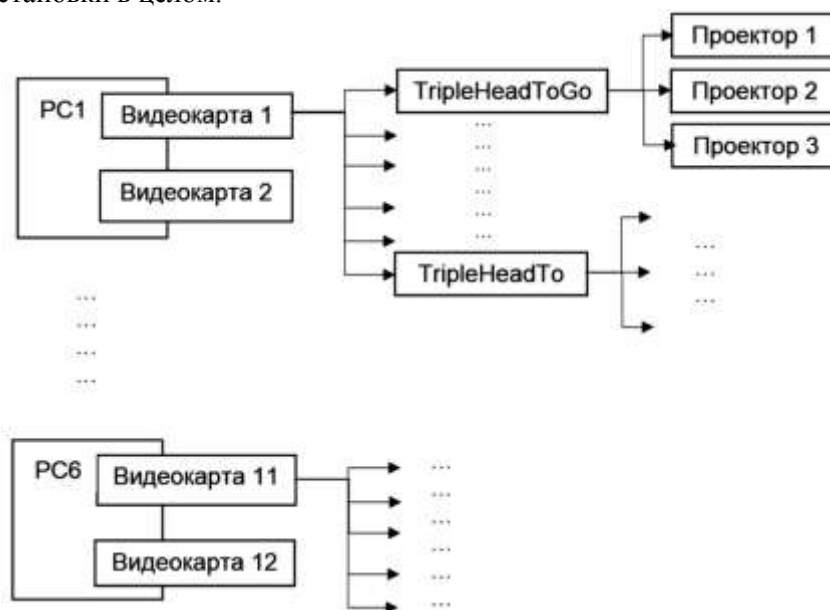


Рис. 3. Схема подключения проекторов с использованием нескольких компьютеров

Использование адаптеров USB-VGA. Технология DisplayLink, разработанная одноимённой компанией, обеспечивает передачу видеоизображения по интерфейсу USB2.0 и USB3.0. Технология направлена, в первую очередь, на малогабаритные вспомогательные информационные дисплеи.

При использовании этой технологии в системе появляется дополнительный виртуальный видеоадаптер, который может передавать изображение. Несмотря на то, что изготовителями заявляется, что по технологии DisplayLink к компьютеру можно подсоединить до шести дополнительных мониторов, теоретически систему можно расширить и на большее количество устройств вывода изображений. Однако следует учитывать, что производительность виртуальных видеоадаптеров недостаточна для игр и видео, поэтому технология ориентирована, в первую очередь, на отображение текста и двумерной графики.

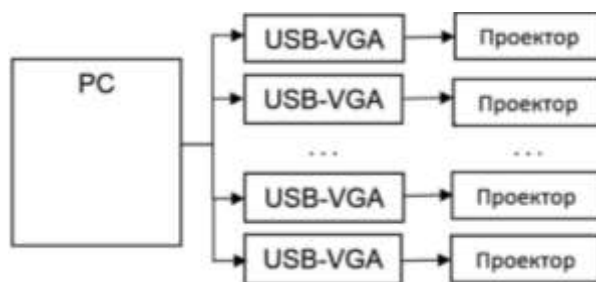


Рис. 4. Схема вывода изображений с использованием технологии DisplayLink

Клиент-серверная схема подключения проекторов [4]

Довольно распространенный вариант соединения и управления несколькими устройствами вывода с одной платформы. В ее основе содержится использование локальной сети для рендеринга и отображения изображений. Компьютер клиента и N -е количество серверов с мощными видеокартами соединяются в гигабитную сеть Ethernet. Каждый сервер соединяется с проектором, отображающим необходимое изображение (рис. 5). Все вычисления выполняются на сервере, поэтому требования к компьютерам, на которых установлен клиент, снижаются. Недостатком подобной схемы является дороговизна используемого оборудования.

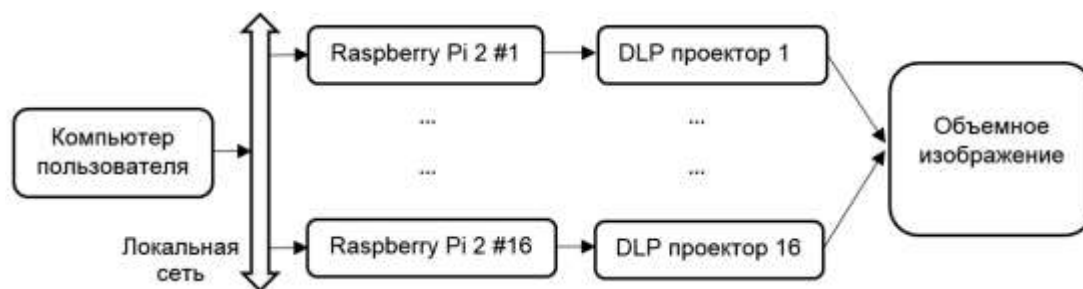


Рис. 5. Клиент-серверная схема подключения проекторов с использованием одноплатных компьютеров Raspberry Pi

Применение одноплатных компьютеров

После оценки достоинств и недостатков вышеперечисленных способов принято решение использовать клиент-серверный способ подключения, т.к. он обладает достаточной гибкостью при масштабировании и обладает приемлемой для поставленной задачи скоростью передачи данных. Проблему высокой стоимости подобного решения предлагается решить использованием одноплатных компьютеров. Для экспериментов и оценки работоспособности предложенной схемы выбран Raspberry Pi 2 Model B – одноплатный мини-компьютер нового поколения с увеличенной в шесть раз, по сравнению с предыдущими моделями производительностью. Он разработан и изготовлен на основе обновленного процессора Broadcom BCM2836 900MHz ARM Cortex-A7 с двухъядерным графическим процессором VideoCore IV и 1 GB SDRAM. На плате установлены разъемы Ethernet, HDMI и композитный RCA (NTSC/PAL), 3.5mm аудио, 40-контактный GPIO, видекамеры (CSI-2), дисплея (DSI), microSDIO.

В процессе экспериментов выявлено, что наиболее подходящим для работы с VideoCore IV GPU процессора Broadcom BCM2836, поддерживающим максимальное вертикальное разрешение в 1080 пикселей (Full HD) является OMXPLAYER, специально разработанный для Raspberry проигрыватель с открытым исходным кодом. Лучшего результата удалось достигнуть при использовании кодека $\times 264$.

Планируется создать программно-аппаратный комплекс с несколькими режимами работы: вывод статического изображения, воспроизведение видеофайлов, отображение трехмерной модели с возможностью управления ей с компьютера пользователя в режиме реального времени.

Вывод статического изображения. В качестве первоочередной задачи планируется реализовать вывод статических изображений на проекторы. Они представляют снимки объекта или специально подготовленной трехмерной модели в различных ракурсах. Изображения загружаются по сети

с компьютера пользователя и после получения сигнала об окончании загрузки выводятся на проекторы. Задача предназначена для тестирования работы системы.

Воспроизведение видеофайлов. При использовании среднескоростной вычислительной сети 100 Мб/с или 12,5 МБ/с с учетом служебных команд получаем ориентировочно 10 МБ/с. Частота потребления устройством отображения от 25 кадров/с (для улучшения качества конечного изображения планируется в дальнейшем увеличить до 50 кадров/с). В проекте используем 16 (или более) приемников информации – проекторов. По сети данные передаются последовательно, поэтому реальный трафик для одного потребителя составляет $10/16 = 0,625$ МБ/с. При 25 кадрах/с количество данных равно $0.625/25 = 0,025$ МБ (26214,4 байта). Это максимально возможный размер кадра. При обеспечении этого условия (размер кадра 26 214 байт) реализация потокового видео возможна. Ситуацию можно улучшить, используя буферизацию, однако в этих условиях не осуществляется воспроизведение в режиме реального времени, т.к. возникают запаздывания, величина которых зависит от глубины буфера, который, в свою очередь, определяется требуемым размером кадра и скоростью его воспроизведения.

Более простым и вероятным для использования вариантом является предварительная загрузка видеофайлов на серверы и воспроизведение их по сигналу с компьютера пользователя.

Работа с трехмерной моделью. Единственный из режимов, при котором с компьютера пользователя, кроме отправки файлов и запуска или остановки воспроизведения, предполагается интерактивное управление. На компьютере пользователя и на 16 платах Raspberry Pi 2 находятся одинаковые трехмерные модели, сохраненные в одном из доступных форматов. Каждая модель смещена на определенный угол относительно начального положения согласно расположению устройства вывода, к которому подключена соответствующая плата. Данные об угле вводятся в программу пользователя и автоматически изменяют матрицу трансформации виртуальной камеры. Пользователь взаимодействует с моделью на собственном компьютере, а программа вводит информацию об изменениях и отправляет на серверы данные об изменении положения модели в виде матриц перемещения. Получая информацию о перемещении, каждая плата визуализирует их согласно полученным данным. Учитывая небольшой объем передаваемых данных, предложенный режим является наиболее рациональным для работы в режиме реального времени. Аспекты функционирования, связанные с качеством визуализации трехмерных моделей и возможными сложностями с их «отрисовкой», будут описаны после проведения соответствующих экспериментов.

Таким образом, в статье приведен сравнительный анализ вариантов подключения нескольких устройств вывода. Показано, что последняя схема с использованием одноплатных компьютеров является наиболее приемлемой для применения в мультисCREENной системе описанного стенда. В настоящее время выполнено тестирование работы с файлами различного типа на одной плате Raspberry, частично реализована и протестирована клиентская и серверная части приема и передача изображений и видеофайлов по сети, осуществляются работы по отображению и управлению трехмерными моделями. В дальнейшем планируется описать характеристики и результаты работы с предложенной схемой подключения проекторов с использованием одноплатных компьютеров, а также результаты работы программного обеспечения мультисCREENной системы.

Проект реализуется на базе «СЭЗ им. Серго Орджоникидзе» при поддержке гранта Инновационного центра «СКОЛКОВО».

ЛИТЕРАТУРА

1. Blundell B.G., Schwarz A.J. Volumetric Three-Dimensional Display Systems. P. 330.
2. An Autostereoscopic Projector Array Optimized for 3D Facial Display / K. Nagano, A. Jones et al. Debevec // SIGGRAPH 2013 Emerging Technologies, 2013.
3. An Automultiscopic Projector Array for Interactive Digital Humans / A. Jones, J. Unger, K. Nagano et al. // SIGGRAPH 2015. ACM Press, 2015.
4. Distributed rendering for multiview parallax displays / T. Annen, W. Matusik, H. Pfister et al. // SPIE 6055, Stereoscopic Displays and Virtual Reality Systems XIII, 2006.
5. Большаков А.А., Сгибнев А.А. Разработка автостереоскопического псевдоголографического интерактивного дисплея // ММТТ-27: сб. тр. XXVII Междунар. науч. конф. Саратов: СГТУ, 2014. Т. 11. С. 3-5.

Большаков Александр Афанасьевич –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Автоматизация, управление, мехатроника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Bolshakov –
Dr. Sc., Professor,
Department of Automation, Control
and Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Сгибнев Артур Алексеевич –
аспирант кафедры
«Автоматизация, управление, мехатроника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Arthur A. Sgibnev –
Postgraduate
Department of Automation, Control
and Mechatronics
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 681.51

В.А. Коваль, О.Ю. Торгашова, А.В. Чернова, А.А. Самарский

**СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ ОБЪЕКТА УПРАВЛЕНИЯ
С ПЕРЕМЕННЫМ КОЭФФИЦИЕНТОМ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ,
ОПИСЫВАЕМОГО В ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ**

На основе спектрального метода решены задачи анализа и синтеза для системы, описываемой уравнением теплопроводности в цилиндрической системе координат с коэффициентом теплопроводности, зависящим от пространственной координаты. Решение задачи анализа, полученное спектральным методом, сравнивается с решением, полученным методом конечных разностей.

Распределенная система, уравнение теплопроводности, цилиндрическая система координат, спектральная характеристика, синтез, анализ

V.A. Koval', O.Yu. Torgashova, A.V. Chernova, A.A. Samarskij

**SYNTHESIS OF AN OBJECT CONTROL REGULATOR WITH A VARIABLE
COEFFICIENT OF THERMAL CONDUCTIVITY DESCRIBED BY THE
CYLINDRICAL COORDINATE SYSTEM**

We consider the analysis and synthesis problems relating a spatial distributed system described by the thermal conductivity equation in the cylindrical coordinate system with a variable coefficient of thermal conductivity. The solution to the analysis problem obtained by the spectral method is compared with the solution obtained by the finite difference method.

Distributed system, heat equation, cylindrical coordinate system, spectral characteristic, synthesis, analysis

Введение. Задача анализа температурного поля объектов с переменным коэффициентом теплопроводности, описываемая в цилиндрической системе координат, возникает при рассмотрении многослойных цилиндрических печей, многослойных дисков и др. Примеры таких задач рассмотрены в [1, 2] для системы двух неограниченных цилиндрических тел. При этом в [1] для решения задачи применяется метод преобразования Лапласа, а в [2] – метод конечных интегральных преобразований. Недостатком указанных подходов является то, что они не могут применяться для решения задачи синтеза. В связи с этим в данной работе решение задач анализа и синтеза систем управления объектами с переменными коэффициентами теплопроводности предлагается проводить спектральным методом [3].

Постановка задачи. Рассмотрим объект управления, который описывается одномерным уравнением теплопроводности [1]

$$c\gamma \frac{\partial T(r, t)}{\partial t} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda_0(r) \frac{\partial T(r, t)}{\partial r} \right), \quad r \in (0, R), t \in (0, \infty), \quad (1)$$

где T – температура, град; r – пространственная координата по радиусу, м; R – радиус объекта, м; c – теплоемкость, Дж·кг⁻¹·град⁻¹; γ – плотность, кг/м³; λ_0 – теплопроводность, Вт·м⁻¹·град⁻¹, с начальными условиями

$$T(r, 0) = T_0 = \text{const}, \quad r \in [0, R] \quad (2)$$

и граничными условиями

$$\partial T(r, t) / \partial r|_{r=0} = 0, \quad \partial T(r, t) / \partial r|_{r=R} = T_R(t), \quad t \in [0, \infty). \quad (3)$$

Теплопроводность λ_0 скачкообразно изменяется в зависимости от пространственной координаты r :

$$\lambda_0(r) = \begin{cases} \lambda_{01}, & r \in [0, \bar{r}), \\ \lambda_{02}, & r \in [\bar{r}, R], \end{cases} \quad \bar{r} \in (0, R). \quad (4)$$

Требуется решить следующую задачу управления: осуществить нагрев объекта на заданном радиусе $r = r^*$ по заданному закону $T(r^*, t) = T^*(t)$. В качестве управляющего воздействия принять температуру, приложенную к границе объекта $T_R(t) = U(t)$. Ошибка регулирования не должна превышать 5% от установившегося значения. При этом без потери общности будем полагать, что $T(r, 0) = 0$, $r \in [0, R]$.

Получение модели объекта управления в безразмерном виде. Для решения задачи представим исходный объект управления (1)-(4) в безразмерном виде, раскрыв сначала производную по переменной r в правой части (1):

$$\frac{\partial \theta(\rho, \tau)}{\partial \tau} = a \left(\frac{\lambda(\rho)}{\rho} \frac{\partial \theta(\rho, \tau)}{\partial \rho} + \frac{\partial \lambda(\rho)}{\partial \rho} \frac{\partial \theta(\rho, \tau)}{\partial \rho} + \lambda(\rho) \frac{\partial^2 \theta(\rho, \tau)}{\partial \rho^2} \right), \quad \lambda(\rho) = \begin{cases} \lambda_1, & \rho \in [0, \bar{\rho}), \\ \lambda_2, & \rho \in [\bar{\rho}, 1], \end{cases} \quad (5)$$

$\tau \in (0, \infty), \rho \in (0, 1),$

где $\theta = T/T^*$, $\rho = r/R$, $\bar{\rho} = \bar{r}/R$, $\tau = t/t^*$, $\lambda = \lambda_0/\lambda^*$ – безразмерные величины; T^* , t^* , q^* , λ^* – номинальные значения переменных T , t , q , λ_0 соответственно; $a = (\lambda^* t^*) / (R^2 c \gamma)$ – безразмерный коэффициент.

Начальные условия:

$$\theta(\rho, 0) = 0, \quad \rho \in (0, 1). \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\partial \theta(\rho, \tau) / \partial \rho|_{\rho=0} = 0, \quad \partial \theta(\rho, \tau) / \partial \rho|_{\rho=1} = u(\tau), \quad (7)$$

где $u = UR/T^*$ – безразмерная величина – управляющее воздействие, приложенное на границе объекта.

Далее в качестве модели объекта управления будем рассматривать уравнение (5) с начальными условиями (6) и граничными условиями (7).

Представление модели объекта в спектральном виде. Разложим вещественную однозначную непрерывную, всюду дифференцируемую по пространственной переменной функцию $\theta(\rho, \tau)$ в ряд Фурье по системе ортонормированных с весом ρ функций Бесселя $\{B(\alpha_h \rho)\}$, $h = \overline{1, \infty}$:

$$\theta(\rho, \tau) = \sum_{h=1}^{\infty} \Phi(h, \tau) B(\alpha_h \rho), \quad \Phi(h, \tau) = \int_{\bar{R}_1}^{\bar{R}_2} \theta(\rho, \tau) \rho B(\alpha_h \rho) d\rho, \quad \bar{R}_1 = 0 - \varepsilon, \quad \bar{R}_2 = 1 + \varepsilon, \quad (8)$$

где ε – малая величина; α_h – корни функции Бесселя или ее производной [4]. Функция $\Phi(h, \tau)$, определяющая коэффициенты ряда Фурье, в соответствии с [3] называется спектральной характеристикой функции $\theta(\rho, \tau)$.

Отметим, что в общем случае в качестве функций $B(\alpha_h \rho)$ могут быть выбраны линейные комбинации функций Бесселя, удовлетворяющие свойству ортонормированности. В рассматриваемой задаче $\{B(\alpha_h \rho)\} = \{J_0(\alpha_h \rho)\}$, $h = \overline{1, \infty}$.

С использованием свойств спектральных характеристик, доказанных в [3], и учитывая вид граничных условий, получим описание объекта управления бесконечномерной системой дифференциальных уравнений в форме пространства состояний. При этом для представления второго сомножителя из выражения (5) будем использовать новое свойство спектральной характеристики произведения производной по пространственной переменной от функции на другую функцию, которое будет приведено здесь без доказательства.

Спектральная характеристика произведения производной по пространственной переменной от функции на другую функцию. Рассмотрим произведение $\partial \varphi_1(\rho, \tau) / \partial \rho \cdot \varphi_2(\rho, \tau)$, в котором $\varphi_1(\rho, \tau)$ представляет собой функцию, ограниченную на интервале $\rho \in [R_1, R_2]$ и содержащую точки разрыва первого рода. Такую функцию можно представить в виде [5]

$$\varphi_1(\rho, \tau) = \varphi_1^0(\rho, \tau) + \sum_{i=1}^k \varphi_i \cdot 1(\rho - \rho_i), \quad (9)$$

где $\varphi_1^0(\rho, \tau)$ – непрерывная функция, совпадающая с функцией $\varphi_1(\rho, \tau)$ на интервале $\rho \in [R_1, R_2]$; φ_i – амплитуды скачков функции $\varphi_1(\rho, \tau)$ в точках $\rho_i \in [R_1, R_2]$, $i = \overline{1, k}$; $1(\rho - \rho_i)$ – здесь и далее единичные скачкообразные функции $1(\rho - \rho_i) = \begin{cases} 1, & \rho > \rho_i \\ 0, & \rho < \rho_i \end{cases}$.

Спектральная характеристика произведения $\partial \varphi_1(\rho, \tau) / \partial \rho \cdot \varphi_2(\rho, \tau)$ определяется следующим образом:

$$S_\rho[\partial \varphi_1(\rho, \tau) / \partial \rho \cdot \varphi_2(\rho, \tau)] = \left(P_1^0(\bar{h}, h, \tau) + \sum_{i=1}^k P_{1i}(\bar{h}, h) \right) \Phi_2(\tau), \quad \bar{h}, h = \overline{1, \infty}, \quad (10)$$

где $P_1^0(\bar{h}, h, \tau)$, $P_{1i}(\bar{h}, h)$ определяются в соответствии с выражениями

$$P_{1i}(\bar{h}, h) = \rho_i \int_{R_1}^{\bar{R}_2} \rho B(\alpha_{\bar{h}} \rho) B(\alpha_h \rho) \varphi_i \frac{\delta(\rho - \rho_i)}{\rho} d\rho_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad (11)$$

$$P_1^0(\bar{h}, h, \tau) = \int_{\bar{R}_0}^{\bar{R}_1} \rho B(\alpha_{\bar{h}} \rho) B(\alpha_h \rho) \frac{\partial \varphi_1^0(\rho, \tau)}{\partial \rho} d\rho,$$

первое из которых с учетом фильтрующего свойства дельта-функции может быть преобразовано к виду

$$P_{1i}(\bar{h}, h) = \rho_i \left(B(\alpha_{\bar{h}} \rho) B(\alpha_h \rho) \right)_{\rho=\rho_i} \varphi_i, \quad i = \overline{1, k}, \quad (12)$$

а второе может быть представлено выражением

$$\begin{aligned} P_1^0(\bar{h}, h, \tau) &= - \int_{\bar{R}_1}^{\bar{R}_2} \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\tau B(\alpha_{\bar{h}} \tau) B(\alpha_h \tau) \right] \varphi_1^0(\tau, t) d\tau = \\ &= \int_{\bar{R}_1}^{\bar{R}_2} \left\{ B_v(\alpha_{\bar{h}} \tau) B_v(\alpha_h \tau) + \tau \left[\frac{\partial B_v(\alpha_{\bar{h}} \tau)}{\partial \tau} B_v(\alpha_h \tau) + B_v(\alpha_{\bar{h}} \tau) \frac{\partial B_v(\alpha_h \tau)}{\partial \tau} \right] \right\} \varphi_1^0(\tau, t) d\tau. \end{aligned} \quad (13)$$

Отметим, что рассмотренное свойство применяется ко второму слагаемому уравнения (5). С учетом вида функции, описывающей теплопроводность, $\lambda(\rho) = \lambda_1 \cdot 1(\rho) + (\lambda_2 - \lambda_1) \cdot 1(\rho - \bar{\rho}) + \lambda_2 \cdot 1(\rho - 1)$ и

второго выражения из (11) будем иметь $P_1^0(\bar{h}, h, \tau) = 0$. В качестве $\Phi_2(\tau)$ будем рассматривать вектор спектральной характеристики функции $\partial\theta(\rho, \tau)/\partial\rho$.

Приведенное свойство, а также свойства спектральных характеристик из [3] позволяют представить уравнение (5) в виде

$$\dot{\Phi}_\theta(\tau) = a \left(P_{\lambda/\rho} P_1 \Phi_\theta + \sum_{i=1}^3 P_i P_1 \Phi_\theta + P_\lambda (P_2 \Phi_\theta + \Gamma_2^{11} u(\tau)) \right), \quad (14)$$

где $\Phi_\theta \in \mathbb{R}^{\bar{h}}$, $\bar{h} = \overline{1, \infty}$ – вектор спектральной характеристики функции $\theta(\xi, \tau)$; $P_{\lambda/\rho}$, P_λ – операционные матрицы множителей $\lambda(\rho)/\rho$ и $\lambda(\rho)$ соответственно; P_1 , P_2 – операционные матрицы дифференцирования первого и второго порядка соответственно; Γ_2^{11} – матрица, через которую действует функция $u(\tau)$ с внешней границы объекта управления. Выражения для вычисления операционных матриц даны в [3].

Модель (14) можно представить в виде

$$\dot{\Phi}_\theta(\tau) = A \Phi_\theta(\tau) + B u(\tau), \quad (15)$$

где $A = a \left(P_{\lambda/\rho} P_1 \Phi_\theta + \sum_{i=1}^3 P_i P_1 \Phi_\theta + P_\lambda P_2 \right)$ – матрица размерности $\bar{h} \times h$, $\bar{h}, h = \overline{1, \infty}$, $B = a P_\lambda \Gamma_2^{11}$ – матрица размерности $\bar{h} \times 1$, $\bar{h} = \overline{1, \infty}$.

Выражение (15) представляет собой описание объекта в спектральном виде. С использованием представления (15) можно решать задачи синтеза и анализа. Возврат к исходной функции $\theta(\rho, \tau)$ осуществляется на основе первого из соотношений (8).

Решение задачи анализа на основе спектральной теории и сравнение результатов с решением, полученным методом конечных разностей. Для объекта вида (5)-(7) с параметрами $a = 1$, $\lambda_1 = 0,3$, $\lambda_2 = 1$, $\bar{\rho} = 0,8$ и для внешнего воздействия $u(\tau) = 0,2 \exp(-1,5\tau)$ решение задачи анализа температурного поля получено методом конечных разностей в Matlab и представлено на рис. 1 а.

Для решения задачи спектральным методом в качестве системы разложения $\{B(\alpha_h \rho)\}$, $h = \overline{1, \infty}$ выбрана система функций $\{J_0(\alpha_h \rho)\}$, $h = \overline{1, \infty}$, у которой α_h являются корнями производной $\partial J_0(\rho)/\partial\rho$.

Приведем значения матриц A , B :

$$A = \begin{bmatrix} 0 & -0.84 & 0.75 & -3.50 & \dots \\ 0 & -5.25 & -0.51 & -8.52 & \dots \\ 0 & 1.56 & -23.80 & 4.17 & \dots \\ 0 & -4.79 & 9.29 & -60.47 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} 1.37 \\ -1.38 \\ 1.41 \\ -1.44 \\ \dots \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Для выполнения вычислительного эксперимента выполним усечение бесконечной системы дифференциальных уравнений (14). Результаты анализа 20 первых уравнений системы (14) в Matlab приведены на рис. 1 б.

Для сравнения результатов анализа использовалось выражение

$$\delta(n, \tau) = \left(\int_0^1 \left[\theta(\rho, \tau) - \sum_{h=1}^n \Phi_\theta(h, \tau) J_0(\alpha_h \rho) \right]^2 d\rho \bigg/ \int_0^1 \theta^2(\rho, \tau) d\rho \right)^{1/2}, \quad (17)$$

в котором $\theta(\rho, \tau)$ – температура, вычисленная методом конечных разностей, $n = 20$ – порядок усечения системы (15). Ошибка $\delta(20, \tau)$ удовлетворяет выражению $\delta(20, \tau) < 0,05$, что указывает на высокую точность спектрального метода и делает возможным его применение для решения задачи синтеза.

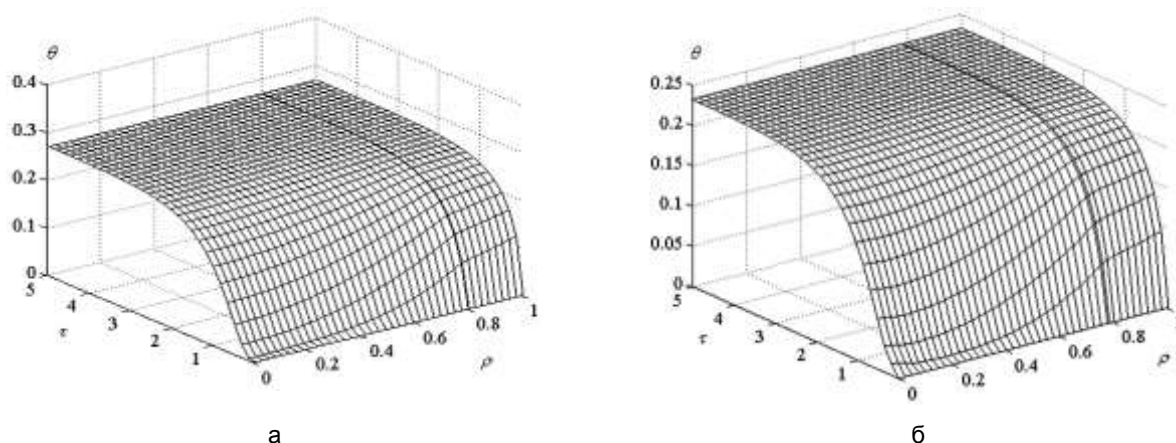


Рис. 1. Решение задачи анализа, полученное:
а – методом конечных разностей; б – спектральным методом

Решение задачи синтеза на основе спектральной теории. Синтезируем регулятор для нагрева пластины до значения $\theta^* = 1$ при заданном значении координаты $\rho^* = 0,7$ по закону

$$\eta(\tau) = 1 - \exp(-0,05\tau) \quad (18)$$

Для решения задачи синтеза дополним модель (15) уравнением измеряемых выходов:

$$y(\tau) = C\Phi_\theta(\tau) \quad (19)$$

где $y \in R^1$ – измеряемый выход, представляющий собой значение температуры в точке $\rho = \rho^*$. Матрица C составлена из элементов ортонормированной системы разложения $\{B(\alpha_h, \rho)\}$, $h = \overline{1, \infty}$, вычисленных для $\rho = \rho^* = 0,7$:

$$C = [1.41 \quad -0.47 \quad -0.97 \quad 1.69 \quad -1.05 \quad \dots] \quad (20)$$

Введем новую переменную

$$\bar{y} = \eta - y \quad (21)$$

где $\eta \in R^1$ – задающее воздействие – относительная температура, вычисленная в соответствии с выражением (18); $\bar{y} \in R^1$ – регулируемая переменная, представляющая рассогласование между величинами задающего воздействия и измеряемого выхода.

Зададимся вектором новых переменных состояния [6]:

$$\bar{x} = -S\Phi_\theta - H\eta, \quad H = \text{colon}\{1, 0_{(n-1) \times 1}\}, \quad S = \text{colon}\{C, V\}, \quad (n = \overline{1, \infty}), \quad (22)$$

где матрица V размеров $(\bar{h} - 1) \times \bar{h}$ выбирается таким образом, чтобы матрица S была неособенной.

Тогда уравнения объекта можно представить в виде

$$\dot{\bar{x}}(\tau) = \bar{A}\bar{x}(\tau) + \bar{B}u(\tau) + \bar{G}\bar{f}(\tau), \quad \bar{y}(\tau) = \bar{C}\bar{x}(\tau), \quad (23)$$

где $\bar{f} = \text{colon}\{\eta, \dot{\eta}\}$ – вектор возмущений, действие которого в системе (21) эквивалентно задающему воздействию в системе (15), (19), (21); $\bar{A} = SAS^{-1}$, $\bar{B} = -SB$, $\bar{C} = CS^{-1} = H^T$, $\bar{G} = [SAS^{-1}H \quad \vdots \quad -H]$ – числовые матрицы.

Представление объекта в виде (23) позволяет связать вектор регулируемых переменных \bar{y} с новым вектором переменных состояния \bar{x} таким образом, чтобы регулятор, построенный на основе стандартной процедуры синтеза, решал поставленную задачу [6].

Для модели (23) выполним синтез регулятора на основе процедуры LQ-оптимизации и теории наблюдающих устройств пониженного порядка. Уравнение регулятора имеет вид

$$\dot{\zeta}(\tau) = \bar{W}\zeta(\tau) + \bar{K} \bar{y}(\tau) + \bar{T} \bar{B}u(\tau), \quad u(\tau) = \bar{F}\hat{x}(\tau) = \bar{F}[\bar{V}\zeta(\tau) + \bar{U} \bar{y}(\tau)], \quad (24)$$

где $\zeta \in \mathbb{R}^{\bar{h}-1}$ ($\bar{h} = \overline{1, \infty}$) – вектор состояний наблюдателя; $\hat{x} \in \mathbb{R}^{\bar{h}}$ ($\bar{h} = \overline{1, \infty}$) – оценка вектора \bar{x} , используемая в регуляторе полного состояния с матрицей передаточных коэффициентов F . Остальные матрицы $\bar{W}, \bar{K}, \bar{T}, \bar{V}, \bar{U}$, входящие в (24), должны удовлетворять соотношениям:

$$\bar{T} \bar{A} - \bar{W} \bar{T} = \bar{K} \bar{C}, \quad \bar{U} \bar{C} + \bar{V} \bar{T} = E. \quad (25)$$

Учитывая структуру матрицы $\bar{C} = [1 \quad 0_{1 \times (\bar{h}-1)}]$, можно показать, что уравнения (25) будут удовлетворяться тождественно, если

$$\begin{aligned} \bar{T} &= [\bar{L} \quad E_{\bar{h}-1}], \quad \bar{U} = \text{colon}\{1, -\bar{L}\}, \quad \bar{V} = \text{colon}\{0, E_{\bar{h}-1}\}, \\ \bar{W} &= \bar{T} \bar{A} \bar{V} = \bar{A}_{22} + \bar{L} \bar{A}_{12}, \quad \bar{K} = \bar{T} \bar{A} \bar{U} = -(\bar{A}_{22} + \bar{L} \bar{A}_{12}) \bar{L} + \bar{A}_{21} + \bar{L} \bar{A}_{12}, \end{aligned} \quad (26)$$

где \bar{L} – некоторая матрица размерности $(\bar{h}-1) \times 1$ ($\bar{h} = \overline{1, \infty}$), выбор которой наряду с матрицей F будет полностью определять регулятор (24); \bar{A}_{ij} ($i, j = 1, 2$) – блоки матрицы \bar{A} объекта, соответствующие разбиению вектора \bar{x} на составляющие $\bar{x}_{(1)} = \bar{y} \in \mathbb{R}^1$ и $\bar{x}_{(2)} \in \mathbb{R}^{\bar{h}-1}$. Таким образом, задача сводится к нахождению матриц \bar{F}, \bar{L} , определяемых из выражений

$$\bar{F} = -M \bar{B}^T X, \quad \bar{L} = -Y \bar{C}^T \Psi, \quad (27)$$

в которых матрицы X, Y являются решениями уравнений Риккати

$$X \bar{A} + \bar{A}^T X - X \bar{B} M^{-1} \bar{B}^T X + Q = 0, \quad \bar{A}_{22} Y + Y \bar{A}_{22}^T - X \bar{A}_{12}^T \Psi^{-1} \bar{A}_{12} X + \Theta = 0. \quad (28)$$

с весовыми матрицами M, Q, Ψ, Θ .

Для выполнения вычислительных процедур использовано укороченное представление системы.

В случае, когда матрица $Q = 10^4 \cdot \bar{C}^T \bar{C}$, а остальные весовые матрицы M, Ψ, Θ выбраны единичными матрицами соответствующих размерностей, получим следующую числовую реализацию матриц \bar{F}, \bar{L} регулятора (23):

$$\begin{aligned} \bar{F} &= [-0.66 \quad -140.49 \quad -47.46 \quad 57.98 \quad \dots], \\ &= [-1.02 \quad 0.16 \quad 0.22 \quad -0.37 \quad \dots]^T, \end{aligned} \quad (29)$$

с использованием которых затем вычисляются матрицы (26) регулятора (24).

Результаты проведенного в системе Matlab анализа замкнутой системы представлены на рис. 2. Анализ результатов показывает, что ошибка регулирования составляет не более 5% от установившегося значения. Таким образом, заданные требования к точности выполняются.

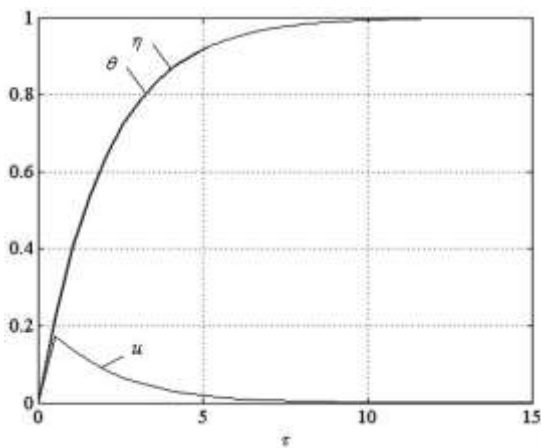


Рис. 2. Результаты анализа замкнутой системы

Заключение. Представление распределенных объектов с переменными коэффициентами в форме Коши на основе спектрального метода открывает возможность применения методов пространства состояний для синтеза законов управления такими объектами. Решение представляется в виде ряда, что согласуется с методами математической физики.

ЛИТЕРАТУРА

1. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высш. шк., 1967.
2. Туголуков Е.Н. Решение задач теплопроводности методом конечных интегральных преобразований. Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2005.
3. Коваль В.А. Спектральный метод анализа и синтеза распределенных систем. Саратов: СГТУ, 2010.
4. Толстов Г.П. Ряды Фурье. М.: Физматлит, 1960.
5. Гельфанд И.М., Шилев Г.Е. Обобщенные функции и действия над ними. М.: Физматлит, 1959.
6. Садомцев Ю.В. Конструирование систем управления с обратной связью по критериям точности и грубости. Саратов: СГТУ, 2003.

Коваль Владимир Александрович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Торгашова Ольга Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Чернова Анастасия Владимировна – аспирант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Самарский Александр Александрович – магистрант кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Vladimir A. Koval' – Dr. Sc., Professor
Department of Radioelectronics and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Olga Yu. Torgashova – PhD, Associate Professor
Department of Radioelectronics and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Anastasia V. Chernova – Postgraduate
Department of Radioelectronics and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Aleksandr A. Samarskiy – Master student
Department of Radioelectronics and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.10.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 004.942

В.А. Кушников, М.В. Хамутова

МОДЕЛЬ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ НАВОДНЕНИЙ, ВЫЗВАННЫХ ПОЛОВОДЬЯМИ И ПАВОДКАМИ

Разработана математическая модель системной динамики для прогнозирования последствий наводнений, вызванных половодьями и паводками. Модель построена на основе графа причинно-следственных связей, существующих между моделируемыми переменными, и представлена в виде системы нелинейных дифференциальных уравнений. Численное решение системы уравнений получено с помощью метода Рунге-Кутты 4-го порядка точности. Проведены вычислительные эксперименты, позволяющие на различных временных интервалах определить величины моделируемых переменных, влияющих на ущерб, причиняемый наводнением.

Математическая модель, системная динамика, прогнозирование последствий наводнений

V.A. Kushnikov, M.V. Khamutova

A MODEL FOR FORECASTING FLOOD EFFECTS CAUSED BY SNOWMELT AND RAIN FLOODS

A mathematical model of system dynamics is developed to forecast effects of floods caused by the snowmelt and rain floods. The model is based on the graph of cause-effect relations that exist between the modeled variables, and represented by a system of nonlinear differential equations. A numerical solution to the system of equations is obtained using the Runge–Kutta fourth-order method. Computational experiments were carried out, which allow for different time intervals to determine the values of modeled variables that affect the damage caused by flooding.

Mathematical model, system dynamics, forecasting the effects of floods

1. Введение

Наводнения, вызванные половодьями и паводками, могут привести к затоплениям обширных территорий, к гибели людей, сельскохозяйственных животных, разрушению или повреждению зданий, сооружений и коммуникаций, к увеличению сил и средств, используемых при ликвидации последствий. Предотвратить наступление наводнения нельзя, но прогноз возможных последствий позволит впоследствии минимизировать ущерб.

Для прогнозирования последствий наводнений в статье используется математический аппарат системной динамики, который позволяет моделировать поведение сложных динамических систем с большим количеством нелинейных обратных связей. Основными элементами модели системной динамики являются системные уровни, накапливающие значение величины моделируемой переменной. В качестве переменных в модели были выбраны параметры наводнений, влияющие на величину причиняемого ущерба [1].

2. Математическая модель

При построении математической модели для прогнозирования наводнений, вызванных половодьями и паводками, используются обыкновенные дифференциальные уравнения 1-го порядка, описывающие моделируемые переменные

$$\frac{dX_i}{dt} = X_i^+ - X_i^-, i = \overline{1, n}. \quad (1)$$

Правая часть уравнения (1) включает разнообразные факторы, влияющие на возрастание или убывание переменной X_i . Делается допущение, что слагаемые правой части могут быть представлены в виде произведения функций, зависящих только от факторов F_j , которые, в свою очередь, сами являются функциями от основных переменных X_i [2]. Отсюда следует

$$X_i^{+/-} = g_i^{+/-}(F_1, F_2, \dots, F_m) = g_{i1}^{+/-}(F_1)g_{i2}^{+/-}(F_2) \dots g_{im}^{+/-}(F_m), \\ F_j = \varphi_i(X_{j1}, X_{j2}, \dots, X_{jk}), i = \overline{1, m}, m < n, k < n. \quad (2)$$

Количество факторов должно быть меньше, чем количество основных переменных, и каждый фактор не может зависеть от всех основных переменных. Для решения этой системы (1) при ограничениях (2) задаются начальные условия $t = t_0, X_i(t_0) = X_{i0}, i = \overline{1, m}$.

Взаимосвязи между моделируемыми переменными определяются с помощью ориентированного графа причинно-следственных связей (рис. 1), матрица смежности данного графа приведена в табл. 1 [3, 4].

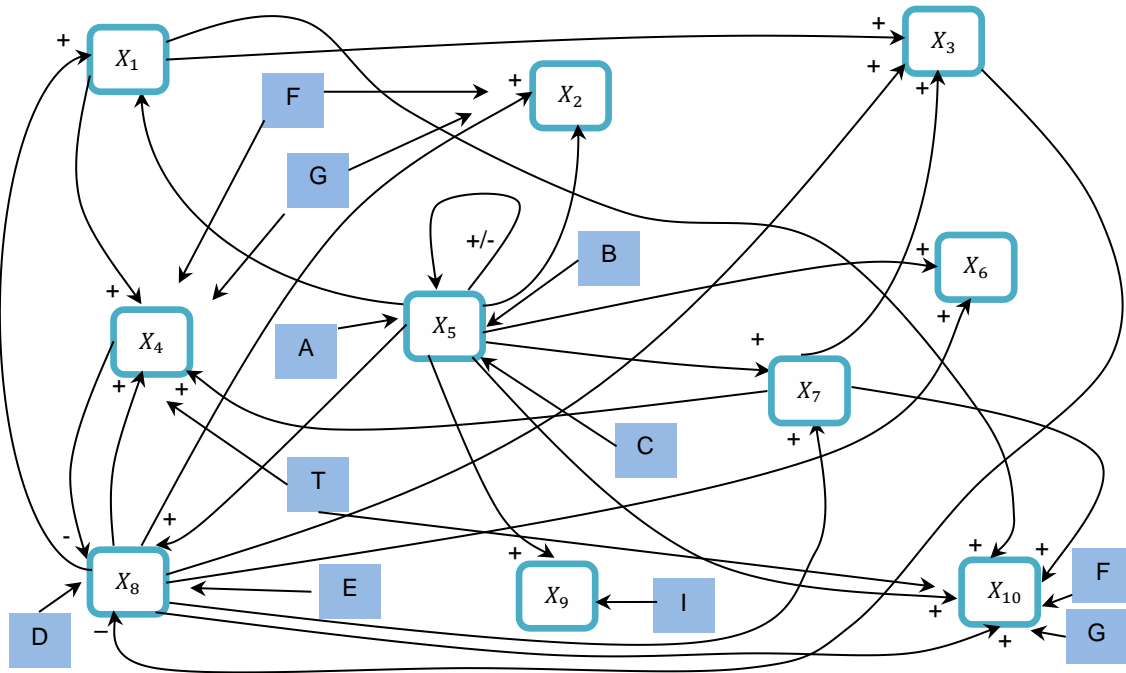


Рис. 1. Ориентированный граф причинно-следственных связей между моделируемыми переменными:
 А – количество осадков; В – величина среднесуточного стока; С – коэффициент инфильтрации;
 Е – количество жителей, самостоятельно покинувших зону затопления; F, G, Т – средняя скорость течения, глубина воды и ее температура, соответственно; D – плотность населения в зоне затопления;
 I – доля площади затопленных сельскохозяйственных угодий

Таблица 1

Матрица смежности ориентированного графа

	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
X_1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0
X_2	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0
X_3	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
X_4	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0
X_5	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
X_6	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0
X_7	1	0	0	0	1	0	1	1	0	0
X_8	0	0	1	1	1	0	0	1	0	0
X_9	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
X_{10}	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1

В качестве моделируемых переменных выбраны: X_1 – численность группировки сил, участвующих в аварийно-спасательных работах; X_2 – количество разрушенных и пострадавших домов; X_3 – количество эвакуированных; X_4 – количество погибших; X_5 – площадь зоны затопления, км²; X_6 – количество объектов отрасли экономики в зоне наводнения; X_7 – количество транспортных средств, участвующих в аварийно-спасательных работах; X_8 – численность населения, находящегося в зоне затопления; X_9 – площадь сельскохозяйственных угодий в зоне подтопления, га; X_{10} – количество погибших сельскохозяйственных животных.

С учетом вышеизложенного общий вид математической модели, используемой для прогнозирования последствий наводнений, вызванных половодьями и паводками, имеет следующий вид:

$$\left\{ \begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= f_{10}(X_5)f_{11}(X_8) \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= F_{x_2}G_{x_2}f_{18}(X_5)f_{19}(X_8)t \\ \frac{dX_3(t)}{dt} &= f_1(X_1)f_2(X_8)f_5(X_7) \\ \frac{dX_4(t)}{dt} &= F_{x_4}G_{x_4}T_{x_4}f_3(X_1)f_4(X_8)f_6(X_7) \\ \frac{dX_5(t)}{dt} &= (A_{x_5}(t) + B_{x_5}(t) - C_{x_5}(t))f_{16}(X_5) \\ \frac{dX_6(t)}{dt} &= f_{17}(X_5)f_{22}(X_8) \\ \frac{dX_7(t)}{dt} &= f_{14}(X_8)f_{15}(X_5) \\ \frac{dX_8(t)}{dt} &= D_{x_8}f_7(X_5) - E_{x_8}(t)f_8(X_3)f_9(X_4) \\ \frac{dX_9(t)}{dt} &= I_{x_9}f_{12}(X_5) \\ \frac{dX_{10}(t)}{dt} &= F_{x_{10}}G_{x_{10}}T_{x_{10}}f_{13}(X_1)f_{20}(X_7)f_{21}(X_5)f_{23}(X_8). \end{aligned} \right. \quad (3)$$

Вспомогательные функциональные зависимости f_1, f_2, \dots, f_{23} определяются в процессе адаптации модели к конкретному процессу развития наводнения и строятся на основе экспертных данных [5]. При решении задачи делается допущение, что вспомогательные функциональные зависимости аналитически могут быть представлены в виде кусочно-постоянных функций, приведенных в табл. 2. Подкоренные выражения функций данной таблицы представляют собой полиномы или произведения степенных и экспоненциальных функций.

Зависимости $A_{x_5}(t), B_{x_5}(t), C_{x_5}(t), E_{x_8}(t)$ системы уравнений (3) представляют собой таблично заданные функции среднесуточных значений количества осадков, величины стока, коэффициента инфильтрации и количества самостоятельно эвакуировавшихся, соответственно. Влияние факторов F, G, T, D, I на моделируемые переменные системы (3) определяется функциональными зависимостями $F_{x_2}, G_{x_2}, T_{x_2}, F_{x_4}, G_{x_4}, D_{x_8}, I_{x_9}, F_{x_{10}}, G_{x_{10}}, T_{x_{10}}$.

Таблица 2

Вспомогательные функции математической модели

Общий вид вспомогательных функций $f_i(X_j)$, $i = \overline{1,23}, j = \overline{1,10}$	Аналитический вид функций $f_i(X_j), i = \overline{1,23}, j = \overline{1,10}$
$f_1(X_1)$	$\sqrt[3]{50X_1^{0,2}X_1^{-0,1}}$
$f_2(X_8)$	$\sqrt[3]{3X_8^{0,6} - 1,5X_8^{0,5}}$
$f_3(X_1)$	$1/X_1$
$f_4(X_8)$	$0,5X_8^{1,5}$
$f_5(X_7)$	$\sqrt[3]{20X_7^{0,6}\exp(\frac{1}{X_7})}$
$f_6(X_7)$	$1/X_7$
$f_7(X_5)$	$0,4X_5$
$f_8(X_3)$	$0,4X_3$
$f_9(X_4)$	$0,4X_4$

Общий вид вспомогательных функций $f_i(X_j)$, $i = \overline{1,23}, j = \overline{1,10}$	Аналитический вид функций $f_i(X_j), i = \overline{1,23}, j = \overline{1,10}$
$f_{10}(X_5)$	$\begin{cases} \sqrt{5X_5^{0,4} - 200X_5^{-1} + 200}, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n > \varepsilon \\ 0, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{11}(X_8)$	$\sqrt{2X_8^{0,3} + 2X_8^{0,2} + 15}$
$f_{12}(X_5)$	$\begin{cases} 2X_5^{0,8} - X_5^{0,7} + 0,5X_5^{0,6} - 0,5, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n > \varepsilon \\ 0, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{13}(X_1)$	$1/X_1$
$f_{14}(X_8)$	$\sqrt{0,01X_8^{0,5} + 4X_8^{0,4}}$
$f_{15}(X_5)$	$\begin{cases} \sqrt{2X_5^{0,5} + 1,5X_5^{0,4}}, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n > \varepsilon \\ 0, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{16}(X_5)$	$\alpha(X_5)^{k/(k+1,667)}$, где α – коэффициент, зависящий от показателя формы долины реки, коэффициента шероховатости русла, длины участка реки, ширины бытового потока и расхода бытового потока, ak – показатель формы долины реки
$f_{17}(X_5)$	$\begin{cases} \exp(1/X_5) X_5^{0,6}, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n > \varepsilon \\ 0, & \text{при } X_5^{n+1} - X_5^n \leq \varepsilon \end{cases}$
$f_{18}(X_5)$	$\sqrt{0,05X_5^{0,7} + 5X_5^{0,2} - 2}$
$f_{19}(X_8)$	$\sqrt{\frac{5\exp(1,6X_8^{0,2})}{X_8} + 20}$
$f_{20}(X_7)$	$1/X_7$
$f_{21}(X_5)$	X_5
$f_{22}(X_8)$	$0,06X_8^{0,1}$
$f_{23}(X_8)$	X_8

3. Вычислительный эксперимент

При решении системы (3) примем, что наводнение, вызванное половодьем (паводком), протекает в течение двух недель. Решим систему (3) методом Рунге – Кутты 4-го порядка точности при начальных условиях $t_0 = 1$, $X_i(t_0) = X_{i0}, i = \overline{1,10}$. Константы математической модели определены как: $F = 1,5$ м/с, $G = 5$ м, $T = 10^\circ\text{C}$, $D = 8,4$, $I = 3\%$. На рис. 2 представлено изменение площади зоны затопления X_5 в период развития половодья (паводка).

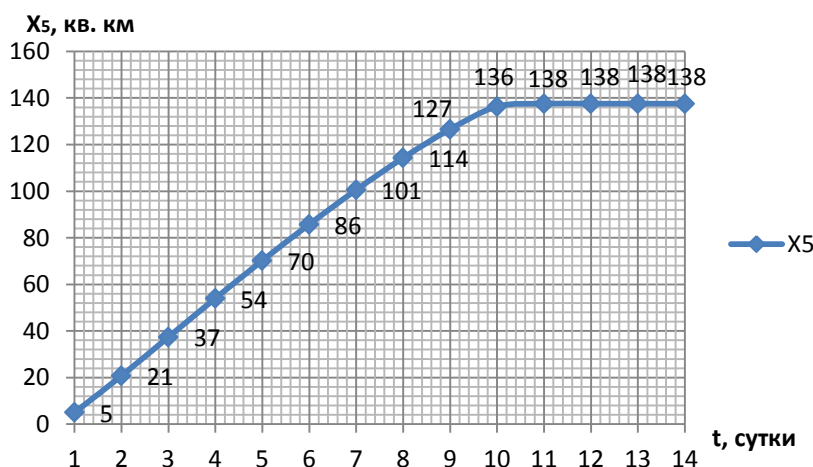


Рис. 2. Изменение площади зоны затопления X_5 в период развития половодья (паводка)

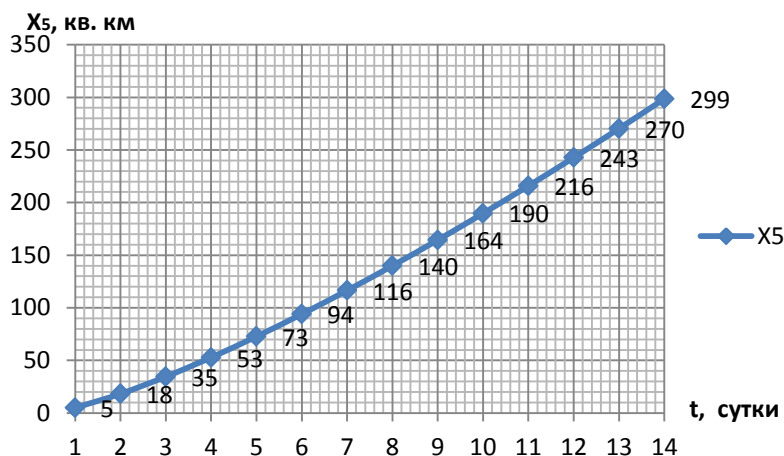


Рис. 3. Изменение площади зоны затопления X_5 в период начала половодья (паводка)

На рис. 3 получено решение системы уравнений относительно той же переменной для периода начала половодья (паводка). На рис. 2 наблюдается уменьшение роста площади зоны затопления, вызванное сокращением объема талых или дождевых вод. Максимальная площадь зоны затопления достигается на 11-й день, затем рост прекращается.

Начало наводнения характеризуется увеличением роста площади зоны затопления X_5 (рис. 3). При этом на рост и уменьшение моделируемой переменной X_5 влияют величина стока, количество осадков и коэффициент инфильтрации. Результаты вычислительного эксперимента достаточно хорошо совпадают с экспериментальными данными, полученными при обработке параметров наводнений, регулярно происходящих в степной зоне Саратовской области.

Заключение

1. Разработана математическая модель для прогнозирования наводнений, вызванных половодьями и паводками.
2. Проведены вычислительные эксперименты, подтверждающие адекватность математического обеспечения.
3. Полученные результаты могут быть использованы при разработке информационно-советующей системы для оперативно-диспетчерского персонала МЧС. Адаптация разработанной модели к требованиям информационных систем МЧС выполняется в соответствии с рекомендациями [6-9].

ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ 22.0.06-97/ГОСТ Р 22.0.06-95. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Источники природных чрезвычайных ситуаций. Поражающие факторы. Номенклатура параметров поражающих воздействий (принят Постановлением Госстандарта РФ от 20.06.1995 № 308).
2. Моделирование и прогнозирование мировой динамики / В.А. Садовничий, А.А. Акаев, А.В. Коротаев, С.Ю. Малков // Научный совет по Программе фонд. исслед. Президиума Российской академии наук «Экономика и социология знания». М.: ИСПИ РАН, 2012. 360 с. (Экономика и социология знания)
3. Яндыбаева Н.В., Кушников В.А. Математическая модель для прогнозирования аккредитационных показателей вуза // Управление большими системами. Вып. 41. М.: ИПУ РАН, 2013. С. 314-343.
4. Кушников В.А., Кушникова Е.В. Архитектура прикладного программного обеспечения для формального анализа свойств целей и синтеза критериев управления сложными социальными и экономическими системами // Вестник СГТУ. 2009. Т. 4. № 2 (43). С. 199-201.
5. Федянин В.И., Проскурников Ю.Е. Организация и ведение аварийно-спасательных и других неотложных работ при ликвидации чрезвычайных ситуаций природного характера: учеб. пособие. Воронеж: Воронеж. гос. техн. ун-т, 2006. Ч. 1. 469 с.
6. Математические модели и алгоритмы оперативного управления процессами ликвидации чрезвычайных ситуаций / Ю.А. Аветисян, В.А. Кушников, А.Ф. Резчиков, В.А. Родичев // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 11. С. 43-47.

7. Соляник Н.А., Кушников В.А. Математическое моделирование процесса загрязнения атмосферного воздуха в зоне влияния промышленных предприятий // Вестник СГТУ. 2009. Т. 1. № 1. С. 104-109.
8. Кушников В.А., Резчиков А.Ф., Цвиркун А.Д. Управление в человеко-машинных системах с автоматизированной процедурой коррекции целей // Автоматика и телемеханика. 1998. № 7. С. 168-172.
9. Анализ выполнимости планов мероприятий в системе автоматизированного управления мостостроительной организацией / И.С. Пшеничников, В.А. Кушников, Е.И. Шлычков, Д.Ф. Резчиков // Мехатроника, автоматизация, управление. 2006. № 11. С. 45-49.

Кушников Вадим Алексеевич –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Прикладные информационные технологии»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А

Vadim A. Kushnikov –
Dr. Sc., Professor
Department of Applied Information Technologies
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Хамутова Мария Васильевна –
аспирант кафедры «Математическая
кибернетика и компьютерные науки»
Саратовского государственного университета
имени Н.Г. Чернышевского

Maria V. Khamutova –
Postgraduate
Department of Mathematical Cybernetics
and Computer Sciences
Saratov State University

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 681.51

Л.С. Михайлова, М.А. Пахомов, А.М. Степанов, М.Ф. Степанов

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПОСТРОЕНИЯ И ИССЛЕДОВАНИЯ УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ НЕЧЁТКОЙ ЛОГИКИ В СИСТЕМЕ ГАММА-3

Рассматриваются вопросы автоматизации решения задач управления динамическими объектами на основе нечёткой логики. Рассмотрен подход к формализации задачи управления с использованием концепции нечёткой логики. Изложена методика автоматизированного решения задачи построения закона управления с использованием нечёткого логического вывода. Представлены средства системы ГАММА-3 для автоматизации построения и исследования систем управления на основе нечёткой логики. Приведен пример их использования для решения задачи управления динамическим объектом.

Автоматизация решения задач, нечёткая логика, автоматизация проектирования систем управления, пакет программ

L.S. Mikhailova, M.A. Pakhomov, A.M. Stepanov, M.F. Stepanov

AUTOMATION OF CONSTRUCTION AND RESEARCH INTO DYNAMIC PLANTS CONTROL ON THE BASIS OF FUZZY LOGIC TECHNOLOGY IN THE GAMMA-3 SYSTEM

The paper considers the issues relating automation of dynamic plants control on the basis of fuzzy logic. The approach to formalization of control tasks using the concept of fuzzy logic is presented. The authors provide a technique of automated solution to the problem connected with making rules of control using fuzzy logic conclusions. Opportunities of the GAMMA-3 system for automation of the construction and research of control systems on the basis of fuzzy logic are presented. A case of their application in deciding control tasks at dynamic plants is considered.

Automation of problem solution tasks, fuzzy logic, computer aided control system design, software package

Введение

В условиях неполной информации как о сложном динамическом объекте управления, так и о среде его функционирования всё более важную роль играют интеллектуальные системы управления. Среди них выделяются системы, использующие нечёткую логику для формирования управляющего воздействия [1]. Построенная на теории размытых множеств [2] нечёткая логика является эффективным инструментом для формализованного описания моделей сложных систем. Наибольший эффект достигается в ситуациях, когда традиционное представление, например, в виде дифференциальных или разностных уравнений оказывается чрезвычайно сложным, громоздким, как следствие, неэффективным. Процесс построения интеллектуальных систем управления отличается наличием специфических особенностей [3]. В отношении систем, использующих нечёткую логику, таковыми [4] являются, например, определение правил преобразования входных данных в нечёткую форму, построение базы знаний, содержащей нечёткие правила, механизм нечёткого логического вывода и обратное преобразование нечёткого представления выходной информации (управляющего воздействия) в детерминированную форму. В связи с этим процесс построения систем автоматического управления на основе нечёткой логики требует применения адекватных средств автоматизации. В данной статье рассматриваются вопросы решения задачи построения и исследования систем автоматического управления на основе нечёткой логики средствами системы ГАММА-3 [5].

1. Методика построения и исследования процесса управления на основе нечёткой логики

В качестве исходных данных в задачах синтеза закона управления систем автоматического управления выступают [6]:

- Модель объекта управления,
- Модель внешней среды,
- Цель управления.

Выбор метода синтеза закона управления в теории автоматического управления зависит от видов, форм, свойств и характеристик указанных моделей. Учитывая их большое разнообразие, проблема выбора оказывается весьма сложной и продолжает нарастать в связи с разработкой новых методов в силу развития теории управления. Интеллектуализация систем автоматического управления призвана часть функций, выполняемых проектировщиком, возложить на саму систему управления. Однако для этого придется наделить её некоторыми знаниями.

В рамках модели управляемого объекта выделяются его выходные переменные, доступные измерению, что осуществляет измерительное устройство.

Цель управления задаётся по некоторым переменным, называемым регулируемыми. Часто они совпадают с измеряемыми переменными.

В системах с нечёткой логикой используются логико-лингвистические модели [1, 3]. При этом каждой входной и выходной переменной объекта управления ставится в соответствие лингвистическая переменная. Значения этих переменных позволяют осуществить разбиение областей допустимых значений входных и выходных переменных на непересекающиеся множества. Соответствие между ними задаётся функциями принадлежности.

Эта функция определяет степень соответствия элементов исходного множества и элементов нечёткого множества, что может быть задано следующим образом

$$A = (\mu_A(x), x), \quad x \in X, \quad \mu_A(x) \in [0, 1], \quad (1)$$

где A – определяемое нечёткое множество; X – исходное множество (базовая шкала значений исходной переменной); $\mu_A(x)$ – функция принадлежности.

Нечёткое множество компактно может быть задано непосредственно функцией принадлежности, которая является его исчерпывающей характеристикой

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1].$$

Алгоритм формирования управляющих воздействий на основе нечёткой логики с учётом заданной цели управления базируется на учёте причинно-следственных связей, доставляемых логико-лингвистическими моделями объекта управления и его внешней среды.

Для формирования лингвистических моделей используется ограниченный естественный язык в виде совокупности продукционных правил типа «ЕСЛИ ... ТО ...». Эти правила и характеризуют взаимосвязь входных и выходных параметров как лингвистических переменных. Их значения задаются с помощью средств используемого ограниченного естественного языка. С их помощью формируются выражения, задающие необходимые качественные оценки. Например,

$$\begin{aligned} &\text{ЕСЛИ } X_1 \text{ есть } A_{11} \text{ И } \dots \text{ И } X_m \text{ есть } A_{1m}, \text{ ТО } Y_1 \text{ есть } B_{11} \text{ И } \dots \text{ И } Y_n \text{ есть } B_{1n} \\ &\text{ЕСЛИ } X_1 \text{ есть } A_{p1} \text{ И } \dots \text{ И } X_m \text{ есть } A_{pm}, \text{ ТО } Y_1 \text{ есть } B_{p1} \text{ И } \dots \text{ И } Y_n \text{ есть } B_{pn}, \end{aligned} \quad (2)$$

где m, n – количество входных и выходных лингвистических переменных X_i, Y_j ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$); p – количество правил в составе лингвистической модели; $A_{ki} \in U_i, B_{kj} \in V_j$ – конкретные лингвистические значения соответствующих входных и выходных переменных в составе k -го правила ($k = \overline{1, p}$); U_i, V_j – множества допустимых лингвистических значений, задаваемых для каждой из используемых переменных.

При этом каждому значению лингвистических переменных ставится в соответствие нечеткое подмножество с соответствующей функцией принадлежности

$$\mu_{A_{ki}} \in F(X_i), \mu_{B_{kj}} \in F(X_j),$$

где $F(X_i), F(X_j)$ – множества нечётких подмножеств, определенных на базовых шкалах X_i, Y_j ($i = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$).

При этом в правилах (2) могут использоваться различные виды связок И, ИЛИ, НЕ включительно.

В целом совокупность правил типа (2) представляет собой описание отображения множества значений входных лингвистических переменных в соответствующее множество выходных лингвистических переменных

$$U^m \rightarrow V^n, \quad (3)$$

где

$$U^m = \prod_{i \in I} U_i, V^n = \prod_{j \in J} V_j.$$

К нечетким множествам применяются логические операции, включая пересечение, объединение, дополнение (отрицание), наиболее часто определяемые следующим образом:

$$\begin{aligned} \mu_{A \cap B}(x) &= \mu_A(x) \wedge \mu_B(x), \\ \mu_{A \cup B}(x) &= \mu_A(x) \vee \mu_B(x), \\ \mu_{\neg A}(x) &= 1 - \mu_A(x), \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\mu_A(x): X \rightarrow [0, 1], \mu_B(x): X \rightarrow [0, 1], x \in X.$$

Логические операторы конъюнкции и дизъюнкции в соответствии с [7] реализуются в следующей интерпретации:

$$\begin{aligned} \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) &= \min\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}, \\ \mu_A(x) \vee \mu_B(x) &= \max\{\mu_A(x), \mu_B(x)\}. \end{aligned}$$

Далее вводится понятие нечёткого отношения между множествами

$$\mu_R(x, y): X \times Y \rightarrow [0, 1], x \in X, y \in Y,$$

где X, Y – произвольные множества; \bar{R} – нечёткое отношение, отображающее декартово произведение множеств $X \times Y$ в отрезок $[0, 1]$ вещественной прямой; $\mu_R(x, y)$ – функция принадлежности нечёткого отношения.

Среди операций над нечёткими отношениями выделяется композиция, задаваемая следующим образом:

$$R \bullet P = (\mu_{R \bullet P}(x, z), (x, z)), \quad (x, z) \in X \times Z,$$

где

$$\mu_{R \bullet P}(x, z) = \bigvee_{y \in Y} (\mu_R(x, y) \wedge \mu_P(y, z)), \quad x \in X, \quad z \in Z.$$

Именно операция композиции нечётких отношений выступает в качестве инструмента в процессе нечёткого логического вывода на лингвистических моделях.

С учетом введенных обозначений нечётких отображений соотношение (3) можно представить в виде [1]:

$$S : F(X) \rightarrow F(Y), \quad (5)$$

где

$$S = \bigcup_{k \in K} \mu_{A_k} \times \mu_{B_k}, \quad \mu_{A_k} = \prod_{i \in I} \mu_{A_{ki}}, \quad \mu_{B_k} = \prod_{j \in J} \mu_{B_{kj}}$$

В нечёткой логике аналогом классического правила вывода *modus ponens* является композиционное правило вывода

$$\mu_{B'} = \mu_{A'} \bullet S, \quad (6)$$

где $\mu_{A'}$ – исходная посылка, получаемая посредством фаззификации измеряемых входных данных; $\mu_{B'}$ – результат нечёткого вывода, полученный на основе знаний, представленных в виде нечётких отображений (4).

Нечёткий логический вывод в развернутом виде для знаний, представленных в виде (2) может быть представлен в виде

$$\mu_{B'} = \bigvee_{k \in K} \left(\bigwedge_{j \in J} (\mu_{B_{kj}}(y_j)) \wedge \bigwedge_{i \in I} (\mu_{A_{ki}}(x'_i)) \right). \quad (7)$$

Выходные переменные системы автоматического управления (управляющие воздействия) перед выдачей их на объект управления из нечёткой формы должны быть приведены к форме, использующей точные значения. Этот этап принято называть дефаззификацией.

В целом методика решения задач управления динамическими объектами на основе нечёткой логики может быть представлена в виде:

- 1) определение входных и выходных переменных системы управления;
- 2) задание шкал для каждой входной и выходной переменных;
- 3) построение лингвистических переменных для каждой входной и выходной переменных;
- 4) определение наборов допустимых значений для каждой лингвистической переменной;
- 5) реализация процедуры нечёткого множества (вида (1)) допустимых значений для каждой лингвистической переменной и задание функций принадлежности, определяющих соответствие входных шкал и элементов нечёткого множества допустимых значений лингвистической переменной;
- 6) построение совокупности продукционных правил типа «ЕСЛИ ... ТО ...», характеризующих взаимосвязь входных и выходных параметров как лингвистических переменных;
- 7) получение результатов измерений выходных параметров объекта управления (получение входных данных);
- 8) определение значений лингвистических переменных по полученным входным данным, используя функции принадлежности соответствующего нечёткого множества (фаззификация);
- 9) применение процедуры нечёткого логического вывода на лингвистических моделях, базирующейся на операции композиции нечётких отношений (вида (6) или подробно (7)) для получения значений выходных лингвистических переменных, соответствующих полученным значениям входных лингвистических переменных (нечёткий логический вывод);
- 10) определение и выдача на объект управления точных значений выходных переменных по соответствующим значениям выходных лингвистических переменных (дефаззификация).

2. Реализация методики решения задач управления динамическими объектами на основе нечёткой логики средствами системы ГАММА-3

В целях автоматизации процесса построения и исследования систем управления на основе нечёткой логики в многофункциональной системе ГАММА-3 [5] разработаны компоненты, реализующие вышеприведенную методику решения задач управления динамическими объектами на основе нечёткой логики. Для этого в рамках интеллектуальной подсистемы, унаследованной от системы ИНСТРУМЕНТ-3м-И [8], расширена модель знаний о методах решения задач управления, построены интерактивные операции, реализующие этапы приведенной методики, разработана подсистема моделирования процесса управления динамическим объектом с помощью системы управления на основе нечёткой логики. Исследуемый управляемый объект может включать нелинейные элементы, а его параметры могут изменяться во времени.

Рассмотрим решение задачи нечеткого управления.

Пусть модель объекта управления описывается дифференциальными уравнениями

$$\dot{x} = Ax + Bu + Mf, \quad x \in R^n, u \in R^m, f \in R^\mu,$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -300 & 1000 \\ 0 & -3 & -1 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}; \quad M = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Измерительное устройство

$$y = Dx, \quad y \in R^r, \quad D = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Регулируемые переменные

$$\Theta = Nx, \quad \Theta \in R^\lambda, \quad N = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Внешние возмущения

$$f_i(t) = \begin{cases} 0, & t < 0 \\ \bar{f}, & t \geq 0 \end{cases}, \quad f \in R^\mu, \bar{f} \in R^\mu, \bar{f} = [1].$$

Необходимо определить закон управления в виде совокупности правил на основе нечёткой логики, обеспечивающий устойчивость замкнутой системы управления и выполнение заданных инженерных показателей качества – установившаяся ошибка, время регулирования, перерегулирование.

Для решения указанной задачи в соответствии с методикой решения задач управления динамическими объектами на основе нечёткой логики необходимо выполнить следующие действия:

1. Загрузить систему ГАММА-3.
2. В главном меню выбрать пункты «Решение задач» → «Решение декларативно поставленных задач». При этом откроется главное окно подсистемы решения непроцедурно поставленных задач.
3. Открыть проект и в нём модель разрабатываемой в проекте САУ.
4. На закладке «Задачи» выбрать в списке задач задачу «Построение и исследование нечеткого закона управления» (см. рис. 1).
5. На открывшейся закладке атрибутов задачи необходимо щелкнуть мышью на кнопке «Решение задачи» (см. рис. 2).
6. В открывшемся окне «Построение и исследование нечеткого закона управления» необходимо задать закон управления и параметры моделирования замкнутой системы, включая длительность интервала моделирования, шаг, состав выводимых графиков переходных процессов. Для построения нечёткого закона управления необходимо щелкнуть мышью на кнопке «Закон управления», что приводит к открыванию экранной формы «Модель управляющего устройства» (см. рис. 3), где в интерактивном режиме осуществляется задание правил функционирования закона управления. Правила представлены в виде списка, в котором они идентифицируются своими именами. Правило характеризуется параметрами, определяющими область действия правила в пространстве входных сигналов, а также величиной соответствующего правилу управляющего воздействия.

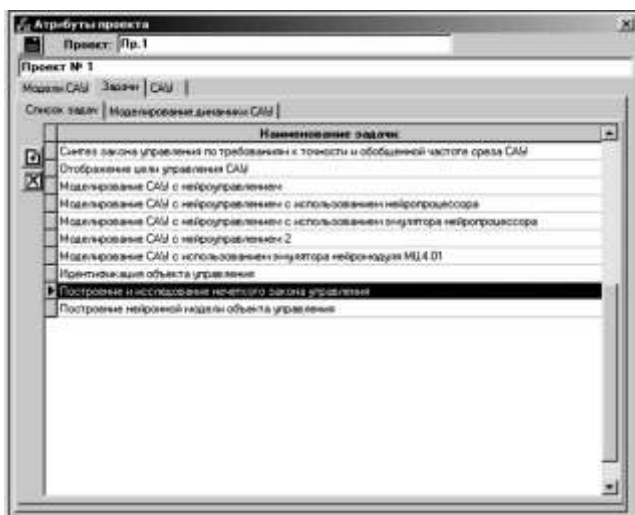


Рис. 1. Окно выбора задачи

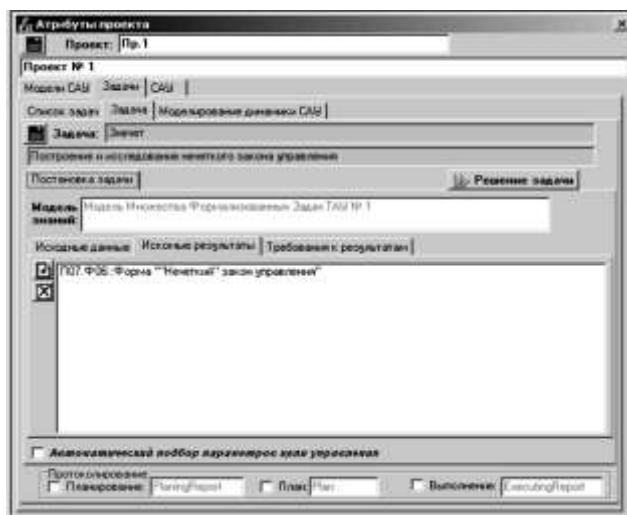


Рис. 2. Окно атрибутов задачи

7. Построение закона управления на основе правил сводится к процессу ведения списка правил. Правила можно добавлять, корректировать, удалять. Вначале список правил пуст. Поэтому необходимо щелкнуть мышью на кнопке создания добавления правила в список. При этом открывается область экранной формы (см. рис. 3), в которой отображаются параметры правила. В первую очередь, следует указать тип функции принадлежности, поскольку это определяет состав параметров правила. Графическое изображение вида функции принадлежности облегчает процесс создания правила (см. рис. 3). Перед построением правил следует определить всю область возможных изменений входного сигнала с целью недопущения не охваченных правилами областей. По окончании задания (модификации) параметров создаваемого или модифицируемого правила следует сохранить его параметры щелчком мышью на кнопке сохранения правила. Завершив построение всех правил закона управления, необходимо сохранить модель управляющего устройства. При этом вновь открывается экранная форма «Построение и исследование нечеткого закона управления».

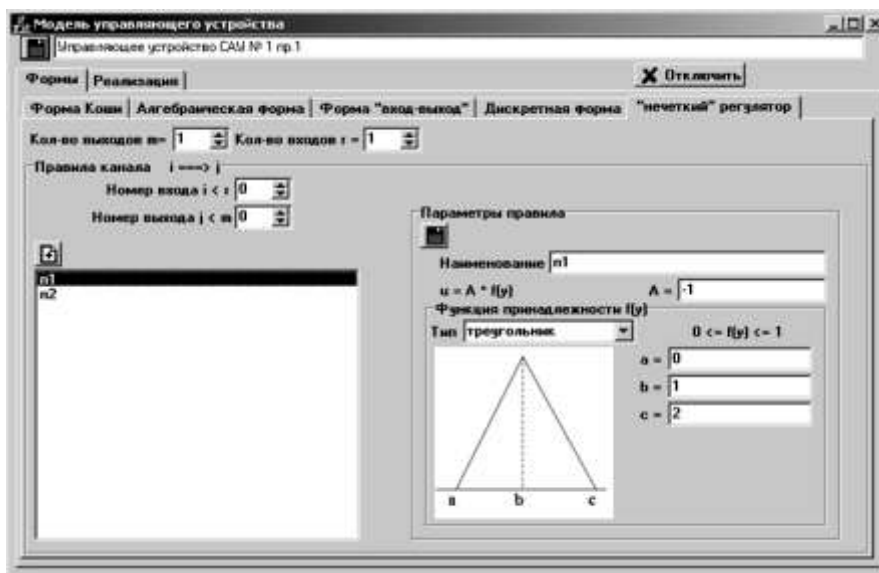



Рис. 3. Окно задания атрибутов нечёткого закона управления

8. Исследование построенного закона управления осуществляется методом математического моделирования. Инициализация процесса моделирования осуществляется щелчком на кнопке «Моделирование» (см. рис. 4). Просмотр графиков переходных процессов можно осуществить посредством щелчка мышью на кнопке . Если оценить полученные результаты моделирования только на основе анализа

графиков переходных процессов, то можно воспользоваться протоколом моделирования (закладка «Протокол»), содержащим численные значения результатов моделирования (см. рис. 5).

9. Процесс исследования закона управления может потребовать достаточно большого числа итераций. Состав отображаемых графиков можно корректировать в процессе работы (см. рис. 4).

10. Окончательные значения параметров идентифицированной модели можно получить на экранной форме визуализации модели управляющего устройства (рис. 3), доступной из экранной формы сохранения результатов решения задачи.

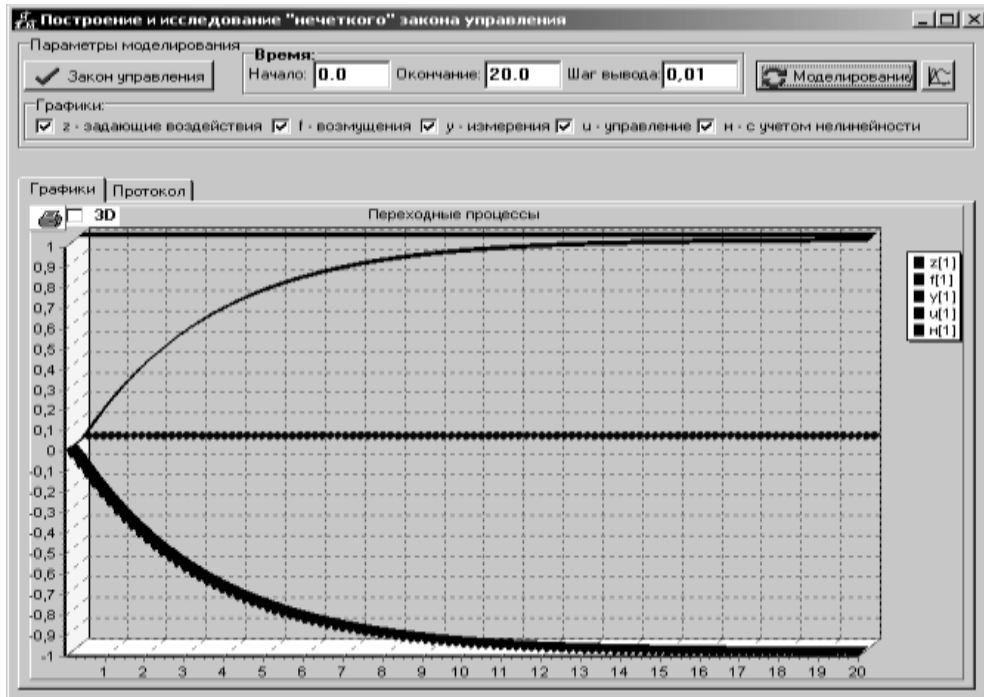


Рис. 4. Результаты моделирования процесса управления

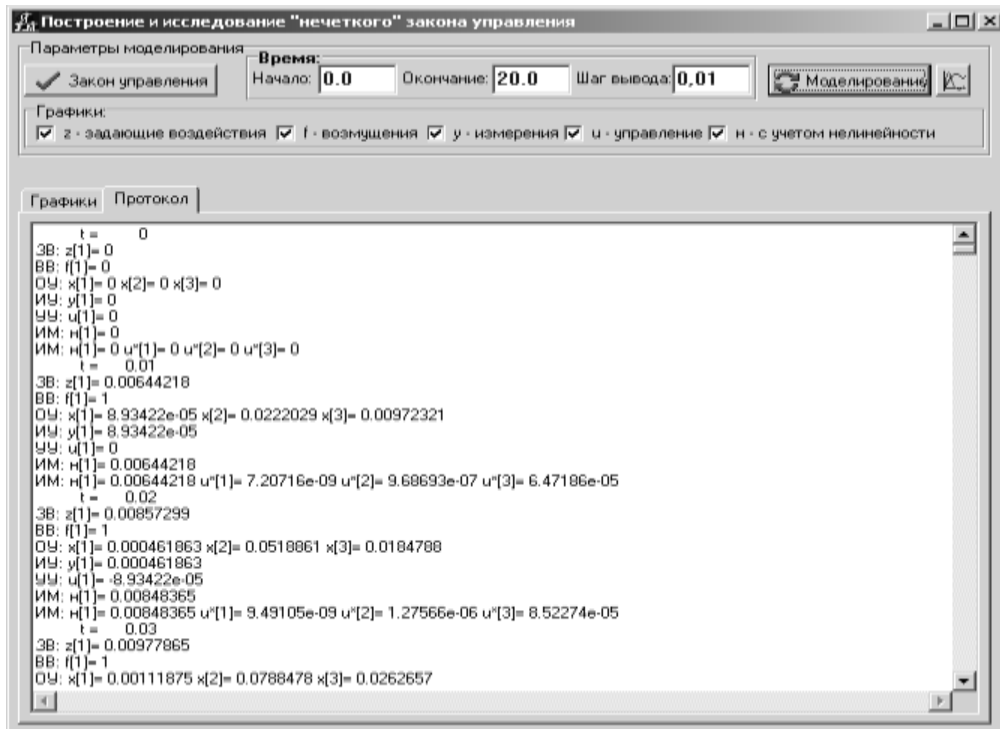


Рис. 5. Протокол процесса моделирования

Заключение

Рассмотрена задача управления динамическим объектом на основе нечёткой логики. Изложена методика решения задач управления на основе нечёткой логики. Рассмотрены средства реализации приведенной методики в системе ГАММА-3. Приведен пример решения задачи управления динамическим объектом на основе нечёткой логики с использованием средств системы ГАММА-3.

Данная статья представляет результаты работы, выполняемой при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 15-07-99684-а).

ЛИТЕРАТУРА

1. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, 1986.
2. Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений. М.: Мир, 1976.
3. Прикладные нечеткие системы / под ред. Т. Тэрано, К. Асаи, М. Сугэно. М.: Мир, 1993.
4. Интеллектуальные системы автоматического управления / под ред. И.М. Макарова, В.М. Лохина. М.: Физматлит, 2001. 576 с.
5. Александров А.Г., Михайлова Л.С., Степанов М.Ф. Система ГАММА-3 и ее применение // Автоматика и телемеханика. 2011. № 10. С. 19-27.
6. Александров А.Г. Методы построения систем автоматического управления. М.: Физматлит, 2008. 232 с.
7. Zadeh L.A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8.
8. Степанов М.Ф. Анализ и синтез систем автоматического управления в программной среде «ИНСТРУМЕНТ-3м-И» // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2004. Т. 47. № 6. С. 27-30.

Михайлова Любовь Сергеевна – кандидат технических наук, доцент Электростальского политехнического института Московского государственного машиностроительного университета (МАМИ)

Lubov S. Mikhailova – Ph.D., Associate Professor
Electrostal Polytechnic Institute of the Moscow State Machine-Building University (MSMU)

Пахомов Максим Александрович – магистрант по направлению «Управление в технических системах» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Maxim A. Pakhomov – Master student
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Степанов Андрей Михайлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института проблем точной механики и управления РАН

Andrei M. Stepanov – Ph.D., Senior Research Fellow
Institute of Precision Mechanics and Control of the Russian Academy of Sciences

Степанов Михаил Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail F. Stepanov – Dr.Sc., Professor
Department of Radioelectronics and Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

Л.С. Михайлова, М.А. Пахомов, А.М. Степанов, М.Ф. Степанов

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ КОНЕЧНО-ЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ В СИСТЕМЕ ГАММА-3

Рассматриваются средства реализации алгоритмов автоматического управления в среде ГАММА-3 и их применение для разработки программного обеспечения конечно-частотной идентификации. Использование испытательных сигналов позволяет получить достаточно информации об объекте в соответствующих режимах его функционирования. Трудности их применения обусловлены необходимостью определения количества сигналов и их частот. Задачей данной работы является автоматизация частотной идентификации в рамках системы ГАММА-3. С этой целью разработан пакет программ на специализированном языке ГАММА. Его компоненты позволяют осуществить все этапы обработки экспериментальных данных. Используемое алгоритмическое обеспечение позволяет определять структуру и параметры модели идентифицируемого объекта, в том числе решается задача выбора параметров испытательных сигналов (количество, частота, длительность). Для удобства получения и обработки экспериментальные данные размещаются в файлах. Рассмотрен пример решения задачи идентификации.

Автоматизация решения задач, частотная идентификация, пакет программ

L.S. Mikhailova, M.A. Pakhomov, A.M. Stepanov, M.F. Stepanov

A TECHNIQUE FOR AUTOMATED SOLUTION TO THE A TASK OF FINITE-FREQUENCY IDENTIFICATION BY THE GAMMA-3 SYSTEM

The paper describes the means for developing an algorithm of automatic control in the GAMMA-3 system. Application of GAMMA-3 for the development of software for finite-frequency identification is described. Usage test signals allows to receive sufficient information about the plant within the respective modes of its functioning. The task of the given work is automation of finite-frequency identification within the GAMMA-3 system. For this purpose we developed a software package in the specialized GAMMA language. Its components allow for carrying out all the stages of processing experimental data. The given algorithm allows us to define the structure and parameters of the model to the identified plant. Additionally, we solve the problem with selecting parameters for the test signals, such as quantity, frequencies, and duration. For convenience purposes, the processed experimental data are placed in files. A case of solution of the identification task is considered.

Automation of solution of the tasks, frequency identification, software package

Введение

Процесс создания систем автоматического управления в отличие от других технических систем требует решения специфических задач. К ним, в первую очередь, относятся задачи синтеза и анализа (исследования) закона управления разрабатываемой системы управления. В теории автоматического управления разработано большое количество различных методов. Их разнообразие обусловлено необходимостью учёта специфических особенностей свойств конкретных объектов управления. Так, существенно различны методы для линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных, одномерных и многомерных, минимально-фазовых и неминимально-фазовых, сосредоточенных и распределённых объектов. Этот перечень можно продолжать. С другой стороны, разнообразие требований цели управления (инженерные, например установившаяся ошибка, время регулирования и т.д.; аксиоматические, например минимизация затрат энергии управления, среднеквадратического отклонения от программного движения и т.д.) создаёт дополнительные трудности по выбору адекватного задаче метода синтеза закона управления. Однако следует отметить, что чем более высокие требования цели управления зада-

ны, тем большим объёмом информации об объекте управления и среде его функционирования необходимо обладать. Поэтому, в частности, методы адаптивного управления, использующие мало априорной информации, требуют много времени на адаптацию, да и достигаемая точность управления оказывается невысокой. Так называемые методы «точного» управления требуют наличия математической модели объекта управления. Для построения математических моделей управляемых объектов необходимо решать задачу идентификации. Различают структурную и параметрическую идентификацию. Структурная идентификация призвана определить структуру модели исследуемого объекта. После этого решается задача параметрической идентификации, позволяющая определить параметры выбранной модели. Методы структурной идентификации в отличие от параметрической идентификации менее формализованы. При этом часто процедуры структурной идентификации используют в качестве вспомогательного средства параметрическую идентификацию. К таким относятся процедуры, реализующие итерационную схему. Она предусматривает циклическое выполнение этапов выбора структуры модели объекта и параметрической идентификации её параметров. Сравнительный анализ полученных вариантов по критериям адекватности позволяет сделать корректный выбор.

Как следствие, эффективность решения задач синтеза и анализа во многом зависит от эффективности автоматизации процедуры параметрической идентификации.

В статье рассматривается методика автоматизации решения задач идентификации модели объекта управления в системе ГАММА-3.

1. Возможности системы ГАММА-3 для автоматизации решения задач

Система ГАММА-3 [1] является развитием системы ИНСТРУМЕНТ-3м-И [2]. Система ИНСТРУМЕНТ-3м-И включает два варианта организации интерфейса пользователя – «Среда исследователя» и «Среда инженера», объединенных в рамках интегрированной среды. При этом каждому пользователю в зависимости от его категории предоставляется интерфейс соответствующей среды. Система ИНСТРУМЕНТ-3м-И предназначена в основном для решения непроцедурно поставленных задач. Входящая в состав интегрированной среды системы ИНСТРУМЕНТ-3м-И «Среда исследователя» предоставляет возможности создания моделей знаний, на основе которых «Среда инженера» позволяет решать задачи в непроцедурной постановке. Однако для решения типовых задач такие возможности не требуются, что и послужило мотивом создания системы ГАММА-3, сочетающей возможности решения как непроцедурно поставленных, так и типовых задач.

Основу системы ГАММА-3 составляют:

- библиотека элементарных математических функций;
- собственный язык программирования ГАММА;
- интеллектуальная подсистема автоматического планирования решений непроцедурно поставленных задач, базирующаяся на использовании планирующих искусственных нейронных сетей.

Наличие библиотеки математических функций и собственного языка программирования позволяют реализовать универсальную систему, обеспечивающую автоматизацию программирования различных математических методов. Проблемная ориентация системы достигается за счет: включения в ее состав пользовательских функций, автоматизирующих отдельные операции, входящие в состав процедур решения задач теории автоматического управления; введения в систему пакетов расширения, содержащих программы решения задач анализа, синтеза, идентификации и адаптивного управления; соответствующего наполнения базы знаний системы.

В состав системы ГАММА-3 включаются пакеты расширения, каждый из которых представляет собой набор специальных программ – директив.

Особенности директивы:

- директива представляет собой законченную самодокументирующуюся программу, такую, что пользователь, не обладающий глубокими знаниями в теории автоматического управления, может с её помощью решить достаточно сложную задачу проектирования системы автоматического управления (САУ);

– интерфейсы всех пакетов расширения и всех директив унифицированы, что значительно упрощает работу с системой. Ввод-вывод данных осуществляется на привычном для проектировщиков систем управления языке (в виде векторов, матриц, дифференциальных уравнений и т.д.);

– структурно директива состоит из трёх частей: интерфейса, который обеспечивает ввод исходных данных в естественном виде; расчётной части; операций вывода результатов работы в протокол решения задачи;

– директивы представляют собой программу на языке ГАММА. Расчётная часть директивы состоит из операций вызова математических функций, входящих в ядро системы и функций, написанных на языке ГАММА.

В настоящей работе рассматриваются средства для решения задач идентификации в системе ГАММА-3. За основу взяты алгоритмы, реализованные в пакете «Автоматика» [3]. Пакет «Автоматика» разработан в среде MATLAB и содержит 3 группы директив: синтез регуляторов, конечно-частотная идентификация, частотное адаптивное управление.

Директива идентификации предназначена для определения коэффициентов передаточной матрицы объекта при известных амплитудах и частотах испытательных сигналов.

2. Процедура решения задачи конечно-частотной идентификации

Задан объект управления с неизвестными значениями параметров:

$$y(t) = W_u(s) \cdot u(t) + W_f(s) \cdot f(t), \quad (1)$$

где $y(t) \in R^r$ – r -мерный вектор измеряемых переменных; $u(t) \in R^m$ – m -мерный вектор управления; $f(t) \in R^\mu$ – μ -мерный вектор неизмеряемых внешних возмущений, для которых заданы границы возмущений $f_i^* \in R^\mu, (i = \overline{1,2})$ такие, что $|f_i(t)| < f_i^*, (i = \overline{1,2})$; $W_u(s)$ – передаточная матрица объекта по управлению; $W_f(s)$ – передаточная матрица объекта по внешнему возмущению.

Передаточные матрицы имеют вид

$$W_u(s) = \begin{pmatrix} w_{11}(s) & w_{12}(s) \\ w_{21}(s) & w_{22}(s) \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$W_f(s) = \begin{pmatrix} w_{11f}(s) & w_{12f}(s) \\ w_{21f}(s) & w_{22f}(s) \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где

$$w_{11}(s) = \frac{k_{11}(s)}{d_{11}(s)} = \frac{k_{11}^{[\gamma_{11}]} s^{\gamma_{11}} + \dots + k_{11}^{[1]} s + k_{11}^{[0]}}{d_{11}^{[n_{11}]} s^{n_{11}} + \dots + d_{11}^{[1]} s + d_{11}^{[0]}},$$

$$w_{12}(s) = \frac{k_{12}(s)}{d_{12}(s)} = \frac{k_{12}^{[\gamma_{12}]} s^{\gamma_{12}} + \dots + k_{12}^{[1]} s + k_{12}^{[0]}}{d_{12}^{[n_{12}]} s^{n_{12}} + \dots + d_{12}^{[1]} s + d_{12}^{[0]}}, \quad (4)$$

$$w_{21}(s) = \frac{k_{21}(s)}{d_{21}(s)} = \frac{k_{21}^{[\gamma_{21}]} s^{\gamma_{21}} + \dots + k_{21}^{[1]} s + k_{21}^{[0]}}{d_{21}^{[n_{21}]} s^{n_{21}} + \dots + d_{21}^{[1]} s + d_{21}^{[0]}},$$

$$w_{22}(s) = \frac{k_{22}(s)}{d_{22}(s)} = \frac{k_{22}^{[\gamma_{22}]} s^{\gamma_{22}} + \dots + k_{22}^{[1]} s + k_{22}^{[0]}}{d_{22}^{[n_{22}]} s^{n_{22}} + \dots + d_{22}^{[1]} s + d_{22}^{[0]}}. \quad (5)$$

Здесь $n_{11}, n_{12}, n_{21}, n_{22}$ и $\gamma_{11}, \gamma_{12}, \gamma_{21}, \gamma_{22}$ порядки полиномов знаменателей и числителей передаточной матрицы (2).

Коэффициенты этих передаточных функций – неизвестные числа:

$k_{11}^{[\gamma_{11}]}, \dots, k_{11}^{[0]}, k_{12}^{[\gamma_{12}]}, \dots, k_{12}^{[0]}, k_{21}^{[\gamma_{21}]}, \dots, k_{21}^{[0]}, k_{22}^{[\gamma_{22}]}, \dots, k_{22}^{[0]},$
 $d_{11}^{[n_{11}]}, \dots, d_{11}^{[0]}, d_{12}^{[n_{12}]}, \dots, d_{12}^{[0]}, d_{21}^{[n_{21}]}, \dots, d_{21}^{[0]}, d_{22}^{[n_{22}]}, \dots, d_{22}^{[0]}$ – коэффициенты соответствующих передаточных функций (4) и (5), подлежащие определению.

В результате работы директивы находятся оценки коэффициентов соответствующих передаточных функций.

Решение задачи сводится к нахождению неизвестных коэффициентов из частотных уравнений (6), (7), (8), (9).

$$\sum_{\mu=1}^{\gamma_{11}} k_{11}^{[\mu-1]} (s_{11i})^{\mu-1} - (\alpha_{11}^{[i]} + j\beta_{11}^{[i]}) \sum_{\mu=0}^{n_{11}} d_{11}^{[\mu]} (s_{11i})^{[\mu]} = \alpha_{11}^{[i]} + j\beta_{11}^{[i]}, \quad (6)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\gamma_{12}} k_{12}^{[\mu-1]} (s_{12i})^{\mu-1} - (\alpha_{12}^{[j]} + j\beta_{12}^{[j]}) \sum_{\mu=0}^{n_{12}} d_{12}^{[\mu]} (s_{12i})^{[\mu]} = \alpha_{12}^{[j]} + j\beta_{12}^{[j]}, \quad (7)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\gamma_{21}} k_{21}^{[\mu-1]} (s_{21i})^{\mu-1} - (\alpha_{21}^{[q]} + j\beta_{21}^{[q]}) \sum_{\mu=0}^{n_{21}} d_{21}^{[\mu]} (s_{21i})^{[\mu]} = \alpha_{21}^{[q]} + j\beta_{21}^{[q]}, \quad (8)$$

$$\sum_{\mu=1}^{\gamma_{22}} k_{22}^{[\mu-1]} (s_{22i})^{\mu-1} - (\alpha_{22}^{[p]} + j\beta_{22}^{[p]}) \sum_{\mu=0}^{n_{22}} d_{22}^{[\mu]} (s_{22i})^{[\mu]} = \alpha_{22}^{[p]} + j\beta_{22}^{[p]}, \quad (9)$$

где $s_{11i} = j\omega_{11i}, s_{12j} = j\omega_{12j}, s_{21q} = j\omega_{21q}, s_{22p} = j\omega_{22p}$; $\alpha_{11}^{[i]} = \text{Re } w_{11i}(j\omega_{11i})$, $\alpha_{12}^{[j]} = \text{Re } w_{12j}(j\omega_{12j})$, $\alpha_{21}^{[q]} = \text{Re } w_{21q}(j\omega_{21q})$, $\alpha_{22}^{[p]} = \text{Re } w_{22p}(j\omega_{22p})$ – действительные части частотных параметров соответствующих передаточных функций; $\beta_{11}^{[i]} = \text{Im } w_{11i}(j\omega_{11i})$, $\beta_{12}^{[j]} = \text{Im } w_{12j}(j\omega_{12j})$, $\beta_{21}^{[q]} = \text{Im } w_{21q}(j\omega_{21q})$, $\beta_{22}^{[p]} = \text{Im } w_{22p}(j\omega_{22p})$ – мнимые части частотных параметров соответствующих передаточных функций; $i = \overline{1, n_{11}}, j = \overline{1, n_{12}}, q = \overline{1, n_{21}}, p = \overline{1, n_{22}}$ – индексы соответствующих размерностей.

Для определения (идентификации) коэффициентов передаточной матрицы объекта используется метод частотных параметров.

Директива имеет следующую структуру:

<d123sumi4a>=<интерфейс><df123sumi4a>
<df123sumi4a>=<предварительные вычисления><omm4><dist><lsim><fdppla1><freq><decren3>

3. Методика решения задачи конечно-частотной идентификации в системе ГАММА-3

1. Для объекта вида (1) необходимо найти оценки коэффициентов передаточной матрицы (2) в процессе его работы при постоянном воздействии внешнего возмущения.

2. Вначале решения задачи производится преобразование объекта (1) к форме Коши:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + Mf(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (10)$$

где $x(t) \in R^n$ – n -мерный вектор переменных состояния объекта; A, B, C, M – матрицы чисел соответствующих размеров. Оно необходимо для того, чтобы осуществлять моделирование объекта в форме Коши.

3. Формирование частот испытательных сигналов с помощью функции **omm4**. Далее формируются испытательные сигналы:

$$u_1(t) = \sum_{k=1}^{n_1} \rho_{1k} \sin(\omega_{1k}t), \quad (11)$$

$$u_2(t) = \sum_{k=1}^{n_2} \rho_{2k} \sin(\omega_{2k}t), \quad (12)$$

где n_1, n_2 – количество частот и амплитуд испытательного сигнала; ρ_1, ρ_2 – векторы амплитуд испытательных сигналов.

4. Формирование внешнего возмущения, воздействующего на объект, осуществляется функцией **dist**.

Внешнее возмущение $f(t)$, формируемое модулем **dist**, может быть в виде ступенчатой или гармонической функции с заданными параметрами либо меандр с заданными амплитудой и длительностью перехода от положительных постоянных значений к отрицательным.

5. Моделирование процесса воздействия испытательных сигналов и внешнего возмущения на объект осуществляется модулем **lsim**.

Результатом выполнения модуля **lsim** являются функции выходов объекта $y_1(t)$, $y_2(t)$ определенные на интервале $[0, N]$, где N – число интервалов дискретности h . Величина N задается путем задания числа периодов фильтрации P_τ минимальной из частот испытательного сигналов.

6. В качестве программы для определения частотных параметров выступает функция **fdppla1**, которая для заданной частотной передаточной функции объекта, используя пары $y_1(t)$, $u_1(t)$, $y_2(t)$, $u_1(t)$, $y_2(t)$, $u_2(t)$, $y_2(t)$, $u_2(t)$, определенные на интервале $[0, N]$, где N – число интервалов дискретности, находит их частотные параметры.

$$\alpha_{ij} = \frac{\alpha_{yij}\alpha_{uij} + \beta_{yij}\beta_{uij}}{\alpha_u^2 + \beta_u^2}, \quad (13)$$

$$\beta_{ij} = \frac{\alpha_{uij}\beta_{yij} - \alpha_{yij}\beta_{uij}}{\alpha_u^2 + \beta_u^2}, \quad (14)$$

где α_y , β_y – результаты преобразования Фурье по выходным сигналам; α_u , β_u – результаты преобразования Фурье по входным сигналам.

7. На следующем этапе процедуры, используя частотные параметры, с помощью модуля **freq** находятся коэффициенты передаточной матрицы объекта (2) посредством решения частотных уравнений (6)-(9).

8. На заключительном этапе процедуры с помощью функции **decren** осуществляется понижение порядков полиномов числителей передаточных функций, составляющих передаточную матрицу объекта.

9. Конец работы процедуры.

Модули (функции) директивы идентификации разработаны на языке ГАММА с использованием встроенных функций, включенных в ядро системы. В последней версии системы перечень этих функций существенно расширен, что обеспечивает более высокий уровень автоматизации программирования.

Перечень основных модулей, используемых в рассматриваемой директиве, приведен в таблице.

Фрагмент исходного текста директивы на языке ГАММА в редакторе кода системы ГАММА-3 представлен на рис. 1.

График процесса моделирования объекта при подаче на вход испытательного сигнала представлен на рис. 2.

Основные модули директивы

Имя модуля	Назначение модуля	Синтаксис
omm4	Пересчет вектора испытательных частот, кратных интервалу дискретности	[om]=omm4(om,h)
c2d	Приведение модели в форме Коши к дискретной форме	[Ad, Bd, Cd, Dd] = c2d(A,B,C,D,h)
lsim	Моделирование объекта, заданного в дискретной форме Коши	[y1,x1] = lsim(Ad,Bd,Cd,Dd,u,x0)
fdppla1	Вычисление оценок частотных параметров объекта	[valf,vbet]=fdppla1(y,u,om,np,h,N,N0)
freq	Решение идентификационных частотных уравнений	[vk,vd] = freq(valf,vbet,np,om)
decren3	Понижение порядка числителя передаточной функции объекта	[vkd] = decren3(vk,mden)
dist	Формирование вектора внешнего возмущения	[fun] = dist(par, t, flag)

3. Александров А.Г., Шатов Д.В. Пакет «Автоматика»: расширение возможностей // Системы технологической подготовки производства и управления этапами жизненного цикла промышленного продукта (CAD\CAM\PDM-2012): труды 12-й Междунар. конф.; под ред. Е.И. Артамонова. М.: ООО «Аналитик», 2012. С. 41-46.

Михайлова Любовь Сергеевна –
кандидат технических наук, доцент
Электростальского политехнического института
Московского государственного
машиностроительного университета (МАМИ)

Lubov S. Mikhailova –
Ph.D., Associate Professor
Electrostal Polytechnic Institute of the Moscow State
Machine-Building University (MSMU)

Пахомов Максим Александрович –
магистрант по направлению
«Управление в технических системах»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Maksim A. Pakhomov –
Master student
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Степанов Андрей Михайлович –
кандидат технических наук, старший научный
сотрудник Института проблем точной механики
и управления РАН

Andrei M. Stepanov–
Ph.D., Senior Research Fellow
Institute of Precision Mechanics and Control of the
Russian Academy of Sciences

Степанов Михаил Федорович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Радиоэлектроника и телекоммуникации»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Mikhail F. Stepanov–
Dr. Sc., Professor
Department of Radioelectronics and
Telecommunications
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 681.586.785; 53.087.92

В.Н. Прошкин, И.А. Прошин, Л.А. Прошкина, М.А. Магомедова

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ С ГЕЛИКОИДАЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ

Рассмотрен способ совершенствования магнитострикционного преобразователя угловых перемещений с геликоидальной магнитной системой позиционирования для измерения параметров движения нереверсивных вращающихся объектов.

Магнитострикционный преобразователь, угловые перемещения, геликоида, магнитная система, позиционирование

V.N. Proshkin, I.A. Proshin, L.A. Proshkina, M.A. Magomedova

IMPROVING MAGNETOSTRICTIVE ANGULAR DISPLACEMENT TRANSDUCERS WITH A HELICAL MAGNETIC POSITIONING SYSTEM

The paper describes a method for improving magnetostrictive angular displacement transducers comprising a helical magnetic positioning system developed with the aim of measuring the movement of unidirectional rotating objects.

Magnetostriction transducer, angular displacement, helicoid, magnetic system, positioning

Развитие машиностроения, приборостроения, транспорта, создание современных авиационных тренажеров обуславливает высокие требования к комплексу метрологических, эксплуатационных и экономических характеристик систем измерения угловых перемещений. Перспективным направлением построения устройств для измерения линейных и угловых перемещений [1] следует признать использование магнитоотрицательных эффектов (J. Joule, E. Villari, G. Wiedemann, C. Matteucci и др.). Магнитоотрицательные преобразователи, удовлетворяющие наиболее жестким метрологическим, динамическим и технико-экономическим требованиям, вместе с тем обеспечивают высокую конструктивную совместимость и встраиваемость в технические системы широкого назначения [1-9].

В состав измерительного преобразователя входят магнитная система позиционирования (МСП), механически связанная с контролируемым вращающимся объектом, и первичный преобразователь (ПП) с цилиндрическим акустическим волноводом (ЦАВ), акустоэлектрическим преобразователем (АЭП), акустическими демпферами. В известных преобразователях угловых перемещений корпусу ПП вместе с ЦАВ [1] придают различную криволинейную форму (U-образную, C-образную, O-образную, спиралеобразную). Волновод во всех преобразователях выполняет функцию чувствительного элемента из ферромагнитных сплавов. Создавая из него ту или иную форму, в его рабочем пространстве формируются нежелательные внутренние напряжения и изменяются его магнитные свойства. Чем меньше радиус изгиба, тем больше эти напряжения и намагниченность. Поэтому преобразователь может эффективно работать только при больших радиусах кривизны чувствительного элемента. Даже термообработка для снятия внутренних напряжений и остаточной намагниченности в рабочем пространстве ЦАВ не даст положительного результата, так как известно, что для их уменьшения необходимо одно-временное температурное и механическое (растягивающее и крутильное) воздействие на чувствительный элемент [10-13], что практически неосуществимо для ЦАВ криволинейной формы.

Известно, что в преобразователях для линейных перемещений измерительный диапазон, длина «мертвой зоны», наблюдаемая в районе АЭП, и характеристика нелинейности напрямую зависят от вида размещения и крепления чувствительного элемента в корпусе ПП [11].

С целью компенсации внутренних напряжений и исключения образования в рабочем пространстве интерферирующих магнитоупругих волн акустический волновод устанавливают с определенными продольным и радиальным механическими напряжениями, выбираемыми исходя из диаметра, длины и материала ЦАВ. Для уменьшения провиса волновода дополнительно устанавливают систему внутренних и внешних канальных опор [11, 14]. Введение предлагаемых усовершенствований обеспечивает высокие метрологические характеристики преобразователя.

Предлагаемая концепция построения магнитоотрицательных преобразователей угловых перемещений основывается на придании криволинейной формы МСП, а не волноводу. Так, в работе [15] реализован один из вариантов измерительного преобразователя, в котором МСП выполнена в виде одного витка геликоиды, расположенного на цилиндрической поверхности радиусом R . Высота H геликоидальной магнитной системы позиционирования составляет шаг винтовой линии, равный диапазону перемещения МСП $l_{\text{МСП}}$. Ось вращения геликоиды цилиндра механически связана с осью вращения контролируемого объекта.

Рассмотренное техническое решение характеризуется значительным преимуществом, которое может быть полезным только для работы в диапазоне $0 \dots < 360$ градусов. Это связано с проблемной зоной измерения угловых перемещений объекта при переходе от 360 до 0 градусов, в районе начальной и конечной точек магнитной винтовой линии, которые соответствуют началу и концу рабочей зоны измерения на линейном участке измерительного преобразователя. Даже если на этапе изготовления МСП эту зону можно максимально объединить, в процессе эксплуатации из-за различных факторов (температурные, вибрационные, временные и т.д.) эти точки могут не совпасть, что приведет к наложению или пропаданию полезных измерительных сигналов.

Для расширения диапазона измерения угловых перемещений и снижения погрешности измерения при переходе от 360 до 0 градусов предлагается (рис. 1 а) размещение на цилиндрической поверхности 1 системы позиционирования 2 в виде двух полувитков: правого и левого (половины витков правой и левой геликоиды) с равным шагом из магнитных винтовых линий. Начала правого a_0 и левого a_5 полувитков объединены в одной точке цилиндрической поверхности, а концы правого a_2 и левого a_3 полувитков объединены в диаметрально противоположной точке цилиндрической поверхности.

В развернутом виде правый и левый полувитки цилиндрической винтовой линии представляют собой два отрезка прямой (рис. 1 б). Действительно, развертку винтовой линии на протяжении ее ша-

га можно рассматривать как геометрическое место точек, ордината и абсцисса которых связаны линейной функцией $y = k \cdot x$. Крутизна подъема винтовой линии определяется формулой $\operatorname{tg} \varphi = H/\pi R$, где H – шаг винтовой линии, R – радиус цилиндра, φ – угол подъема винтовой линии. Длина каждого полувитка геликоиды равна $L = \sqrt{H^2 + (\pi R)^2}$.

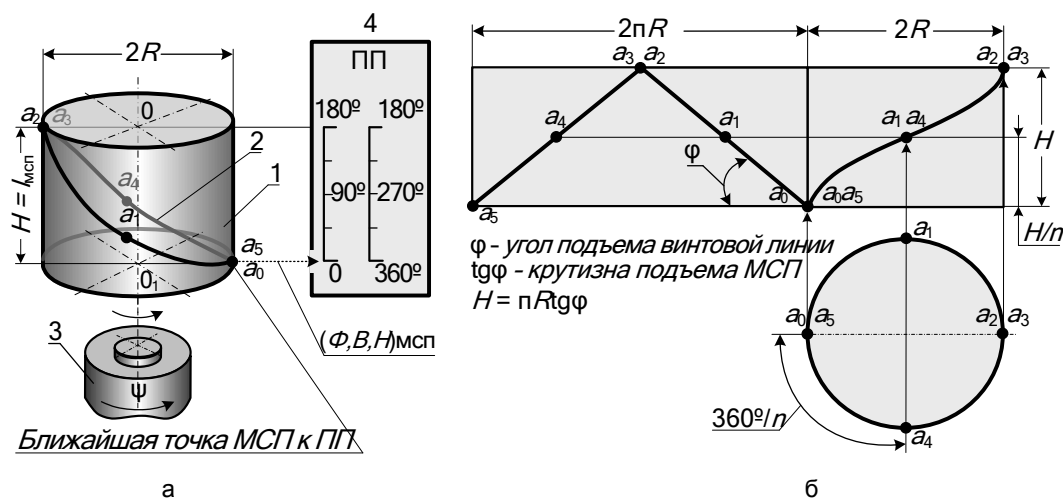


Рис. 1. Геликоидальная магнитная система позиционирования: а – двухполувитковая МСП; б – развертка двухполувитковой МСП

Математически формы правого и левого полувитков винтовых линий зададим системой из трех уравнений соответственно:

$$\begin{cases} x = R \cdot \sin(\psi / 2) \\ y = R \cdot \cos(\psi / 2) \\ z = \frac{l_{\text{мсп}}}{2\pi} \cdot \psi \end{cases} \quad \begin{cases} x = -R \cdot \sin(\psi / 2) \\ y = R \cdot \cos(\psi / 2) \\ z = \frac{l_{\text{мсп}}}{2\pi} \cdot \psi, \end{cases}$$

где x, y, z – координаты декартовой системы координат, центром которой является точка пересечения оси цилиндра с перпендикуляром, восстановленным в точке начала рабочей зоны a_0a_5 , показанной на рисунке, причем ось OZ совпадает с осью цилиндра 00_1 ; R – радиус цилиндра; $l_{\text{мсп}}$ – длина рабочей зоны измерения угловых перемещений; ψ – угол поворота вращающегося объекта.

За один оборот вала вращающегося объекта 3 геликоидальное магнитное поле 2 последовательно воздействует на чувствительный элемент преобразователя 4 в диапазоне точек $a_0 \dots a_5$. За начало отсчета условно принята точка a_0 правого полувитка геликоиды МСП 2, конец – левого полувитка a_5 . При вращении объекта 3 события периодически повторяются. Предлагаемая МСП и первичный преобразователь конструктивно в два раза короче по сравнению с одновитковой геликоидальной магнитной системой позиционирования [15].

Механизм формирования магнитоупругих волн в чувствительном элементе акустического волновода отражает рис. 2.

В среду акустического волновода 1, выполненного из ферромагнитного материала [16], подается импульс тока возбуждения $i_{\text{уме}}$ со вторичного преобразователя [17] и формирует в его рабочем пространстве циркулярное (круговое) электромагнитное поле. Взаимодействие циркулярного и аксиального (продольного) поля магнитной системы позиционирования 2 (на рисунке для наглядности показана часть МСП) индуцирует результирующее импульсное магнитное поле. Под действием этого поля в среде волновода 1 формируются распространяющиеся от места возникновения в обе стороны по спирали крутильные магнитоупругие волны ультразвуковой природы (эффект G. Wiedemann). Волны, достигая в некоторый момент времени акустоэлектрического преобразователя 3, считываются им [18, 19] (эффект С. Matteucci) и поглощаются [20] (поглощаются) демпфером 4.

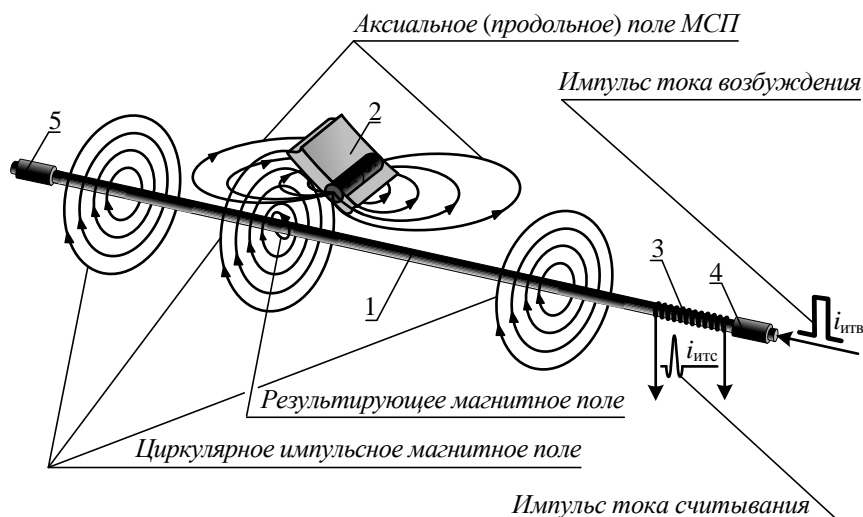


Рис. 2. Формирование магнитоупругих волн в чувствительном элементе:
1 – ЦАВ; 2 – МСП; 3 – АЭП; 4 и 5 – акустические демпферы

Время, разделяющее начало подачи токового импульса возбуждения $i_{итв}$ и получения считывающего импульса $i_{итс}$, пропорционально расстоянию от места возникновения упругой волны до акустоэлектрического преобразователя 3. На другом конце волновода расположен еще один демпфер 5, который исключает возможность образования отраженных волн от его конца и интерференцию сигналов в волноводном тракте. Вычисление параметров вращения контролируемого объекта происходит во вторичном преобразователе, входящем в состав магнитострикционного преобразователя угловых перемещений (на рисунке не показан).

На рис. 3 представлен состав измерительного преобразователя с тремя вариантами МСП с различным шагом подъема винтовых линий.

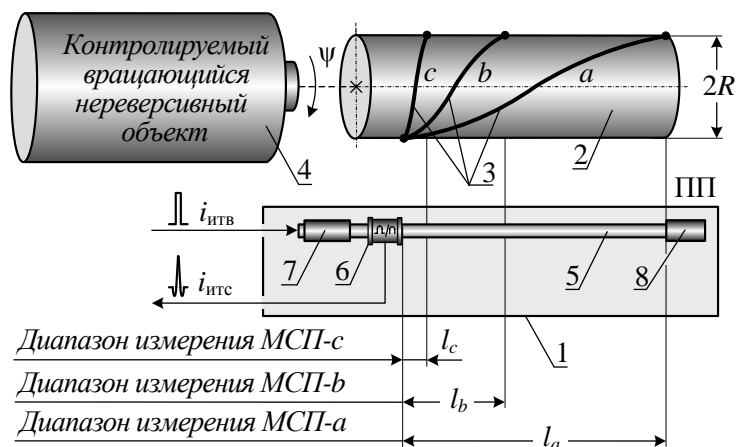


Рис. 3. Магнитострикционный измерительный преобразователь угловых перемещений:
1 – ПП; 2 – цилиндр; 3 – МСП с различными углами подъема винтовых линий;
4 – контролируемый объект; 5 – ЦАВ; 6 – АЭП; 7 и 8 – акустические демпферы

На рис. 4 изображены зависимости величины перемещения $l_{мсп}$ от угла поворота ψ контролируемого объекта при различном шаге подъема винтовых линий. Как видно из графика, чем ниже подъем, тем меньше измерительный диапазон и габаритные размеры ПП. Эту закономерность следует учитывать при сохранении необходимой разрешающей способности преобразователя, которая задается изменением периода квантования измеряемых временных интервалов во вторичном преобразователе и должна быть тем выше, чем меньше измерительный диапазон $l_{мсп}$.

Магнитная система позиционирования может быть выполнена с использованием различных технологий, например на магнитных эластомерах [21].

Достоинство магнитоэластомеров заключается в удачном сочетании эластических и магнитных свойств. Кроме того, они обладают достаточно высокой прочностью, легко поддаются механической обработке, из них можно формировать детали сложной конфигурации, а эластичность позволяет им плотно прилегать к искривленным поверхностям. По структуре магнитоэластомеры представляют собой композиционные материалы, состоящие из эластичной полимерной матрицы и наполнителя – магнитотвердого дисперсного порошка. Разработаны научные основы технологии магнитных эластомеров на основе фторкаучука СКФ-26 и порошка сплава системы Nd-Fe-B, обладающих высокими магнитными и эластическими характеристиками.

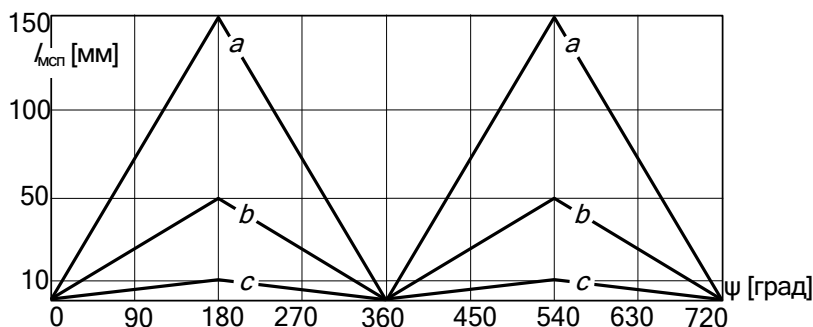


Рис. 4. Зависимости величины перемещения $l_{мсп}$ от угла поворота ψ контролируемого объекта

Проведенный анализ и предложенное техническое решение показали, что в сравнении с известными преобразователями магнитная система позиционирования обладает малыми габаритными размерами, имеет широкий диапазон измерения, обладая высокой конструктивной совместимостью, легко интегрируется с другими системами в единые комплексы, обеспечивая их многофункциональность. Поэтому разработанный преобразователь может быть рекомендован для широкого использования в транспортных системах различного назначения, приборостроении, машиностроении и системах навигации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сысоева С.С. Автомобильные датчики положения. Современные технологии и новые перспективы. Ч. 13. Магнестрикционные преобразователи – актуальные измерители линейных и нелинейных перемещений и детекторы крутящего момента // Компоненты и технологии. 2006. № 6 (59). С. 92-103.
2. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Совершенствование динамических стендов авиационных тренажеров на базе гидроприводов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 12. С. 18-22.
3. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер плавающего объекта для обучения экипажей действиям в чрезвычайных ситуациях // Вестник Астраханского государственного технического университета. Сер. Морская техника и технология. 2009. № 1. С. 82-87.
4. Прошкин В.Н., Прошин И.А., Тимаков В.М. Принципы построения преобразователей параметров движений для гидропривода тренажеров транспортных средств // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. Пенза, 2010. Т. 1. С. 272-275.
5. Прошин И.А., Тимаков В.М., Прошкин В.Н. Тренажер вертолета с имитацией посадки на взволнованную водную поверхность // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 9. С. 65-69.
6. Прошкина Л.А., Прошкин В.Н. Повышение качества и конкурентоспособности авиационных тренажеров на основе модернизации // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. Пенза, 2013. Т. 2. С. 262-264.
7. Артемьев Э.А., Прошкин В.Н. Способ измерения уровня и массы жидких сред в резервуарах // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2010. Т. 2. С. 153-154.
8. Многофункциональный преобразователь параметров движения гидропривода тренажера транспортных средств / В.Н. Прошкин, И.А. Прошин, Л.А. Прошкина и др. // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире: материалы XIII Междунар. науч.-практ. конф. СПб., 2016. Т. 1. С. 104-110.

9. Автоматизированная система для сертификационных испытаний динамических стендов тренажеров транспортных средств / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина, Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова // Проблемы и перспективы современной науки: материалы X Междунар. науч.-практ. конф. Ставрополь: Логос, 2016. С. 87-93.

10. Прошкин В.Н. Магнитострикционные преобразователи линейных перемещений для специальных условий эксплуатации // Датчики и системы. 2007. № 6. С. 35-38.

11. Прошкин В.Н. Конструкторско-технологические способы совершенствования магнитострикционных преобразователей линейных перемещений для специальных условий эксплуатации: дис. ... канд. техн. наук. Астрахань, 2007. 173 с.

12. Прошкин В.Н., Прошкина Л.А. Способ термомеханической обработки ферромагнитных проволок для акустических волноводов // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2013. Т. 2. С. 180-181.

11. Прошкин В.Н., Прошкина Л.А., Разживина Г.П. Способ проверки ферромагнитных проволок после их термомеханической обработки // Надежность и качество: труды Междунар. симпозиума. 2013. Т. 2. С. 181-182.

12. Способы уменьшения влияния внешних ударных и вибрационных воздействий на чувствительный элемент магнитострикционного преобразователя параметров движения / В.Н. Прошкин, Л.А. Прошкина, Э.А. Магомедова, М.А. Магомедова // Научная дискуссия: вопросы технических наук: сб. ст. по материалам XLIV Междунар. науч.-практ. конф. М.: Интернаука, 2016. № 3 (33). С. 13-19.

13. Прошкин В.Н., Прошин И.А., Прошкина Л.А. Способ детектирования угловых перемещений на магнитострикционных эффектах с геликоидальной магнитной системой позиционирования // Естественные и технические науки. 2013. № 6 (68). С. 342-347.

14. Артемьев Э.А., Прошкин В.Н. Материалы для чувствительных элементов магнитострикционных преобразователей параметров движения // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2012. Т. 2. С. 258.

15. Магомедова Э.А., Магомедова М.А., Прошкин В.Н. Формирователь импульсов тока возбуждения магнитоупругих волн в акустических волноводах магнитострикционных преобразователях // Молодой ученый. 2011. № 10. С. 45-48.

16. Систематизация требований, предъявляемых к акустоэлектрическим преобразователям магнитострикционных измерительных систем / В.Н. Прошкин, М.А. Магомедова, Л.А. Прошкина, Е.В. Трусов // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2015. Т. 2. С. 40-42.

17. Магомедова Э.А., Магомедова М.А., Прошкин В.Н. Проектирование прецизионных помехоустойчивых импульсных усилителей токовых сигналов для магнитострикционных преобразователей, // Молодой ученый. 2011. № 10. С. 43-45.

18. Систематизация требований, предъявляемых к демпферам акустического волновода магнитострикционных преобразователей параметров движений / В.Н. Прошкин, М.А. Магомедова, Л.А. Прошкина, Е.В. Трусов // Надежность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2015. Т. 2. С. 42-44.

19. Таганова В.А. Технология магнитных эластомеров с повышенными эксплуатационными свойствами: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2011. 135 с.

Прошкин Виктор Николаевич –
кандидат технических наук, доцент
цикла «Автоматизация и управление»
кафедры «Технология машиностроения»
Пензенского государственного технологического
университета

Viktor N. Proshkin –
Ph.D., Associate Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Penza State University of Technology

Прошин Иван Александрович –
доктор технических наук, профессор
цикла «Автоматизация и управление»
кафедры «Технология машиностроения»
Пензенского государственного технологического
университета

Ivan A. Proshin –
Ph.D., Professor
Department of Mechanical Engineering Technology
Penza State University of Technology

Прошкина Людмила Андреевна –
кандидат экономических наук,
доцент кафедры «Экономическая теория
и международные отношения»
Пензенского государственного университета

Lyudmila A. Proshkina –
Ph.D., Associate Professor
Department of Economic Theory and International
Relations
Penza State University

Магомедова Мадина Асадуллаевна –
аспирант цикла «Автоматизация и управление»
кафедры «Технология машиностроения»
Пензенского государственного технологического
университета

Madina A. Magomedova –
Postgraduate
Department of Mechanical Engineering Technology
Penza State University of Technology

Статья поступила в редакцию 15.04.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 004.4'236

А.А. Сытник, И.В. Гвоздюк

ОБ ОДНОМ МЕТОДЕ АВТОМАТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ

Проводятся исследования эффективности алгоритмов, работающих в современных сетевых коммуникационных устройствах, в свете увеличения обслуживаемого адресного пространства сети. Исследуются временные и емкостные сложности их работы, а также предлагается новый подход в их разработке, основанный на логике нейронных сетей.

Сетевые информационные системы, автоматное моделирование, логика нейронных сетей

A.A. Sytnik, I.V. Gvozdyuk

ON THE METHOD AUTOMATION MODEL NETWORK INFORMATION SYSTEMS

Researches efficiency algorithms employed in modern communication network devices in the light of increasing network address space served. We study the time and space complexity of their work, as well as a new approach in their design, based on the logic of neural networks.

Network information systems, automation model, logic of neural networks

Благодаря возникновению и развитию сетей передачи данных появился новый высокоэффективный способ взаимодействия. Первоначально сети использовались главным образом для научных исследований, но затем они стали проникать буквально во все области человеческой деятельности. При этом большинство сетей существовали совершенно независимо друг от друга, решая конкретные задачи для конкретных групп пользователей. В соответствии с этими задачами выбирались те или иные сетевые технологии и аппаратное обеспечение. Построить универсальную физическую сеть мирового масштаба из однотипной аппаратуры просто невозможно, поскольку такая сеть не могла бы удовлетворять потребности всех ее потенциальных пользователей. Одним нужна высокоскоростная сеть для соединения машин в пределах здания, а другим – надежные коммуникации между компьютерами, разнесенными на сотни километров.

Тогда возникла идея объединить множество физических сетей в единую глобальную сеть, в которой использовались бы как соединения на физическом уровне, так и новый набор специальных протоколов более высоких уровней. Эта технология, получившая название internet, должна была позволить компьютерам «общаться» друг с другом независимо от того, к какой сети и каким образом они подсоединены.

Осознав важность идеи internet, несколько правительственных организаций в США стали работать над ее реализацией. И наибольшего успеха в этом достигло агентство Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), создавшее стек протоколов TCP/IP.

Идея internet в настоящее время получила столь широкое распространение, что существующие сети практически исчерпали ресурс протокола IP, созданного в конце 60-х годов в DARPA. Предоставляемый нынешней версией протокола IP объем адресного пространства в 4 миллиарда потенциальных адресов, особенно в связи с его неэффективным использованием, уже с большим трудом позволяет удовлетворять потребностям быстрорастущей сети. Таким образом, на первый план выходят уже не проблемы увеличения емкости и пропускной способности коммуникационного оборудования, а проблемы эффективной организации адресного пространства сети и усовершенствования алгоритмов маршрутизации и коммутации, которые также являются сдерживающим фактором в увеличении адресного пространства. На смену существующему протоколу IP (или IPv4, по количеству байт из которых состоит адрес) идет протокол IPv6, разработка которого началась в 90-х годах. Этот протокол предоставит ресурс несколько десятков квинтиллионов адресов. Однако его внедрение может осложниться необходимостью реорганизации сетевого оборудования.

В данной работе проводятся исследования эффективности алгоритмов, работающих в современных сетевых коммуникационных устройствах, в свете увеличения обслуживаемого адресного пространства сети. Исследуются временные и емкостные сложности их работы, а также предлагается новый подход в их разработке, основанный на логике нейронных сетей.

Определим ряд понятий, которыми будем пользоваться в дальнейшем.

Топология сети – это логический и физический способ соединения активного оборудования, проводников, кабелей и кабельных каналов, в целом составляющих сеть. Физические характеристики (например, кабельные маршруты, расположение оборудования и т.д.) не входят в понятие логической топологии. Топологию можно представить простыми геометрическими формами: кольцо, шина, звезда, дерево.

Пусть в нашей сети компьютеры обмениваются сообщениями в следующем формате:

$\$abcd\dots ef\#$, где $\$$ – стартовый символ, говорящий о начале приема нового сообщения, $\#$ – стоповый символ, сообщающий об окончании обработки текущего сообщения, I – символ в некотором алфавите A (номер (адрес) машины получателя сообщения), $abcd\dots ef$ – сообщение над некоторым алфавитом V , которое необходимо доставить адресату I .

Часть 1. Децентрализованные сетевые топологии

К таким топологиям относят такие сетевые конструкции, в которых нет выделенных центров, отвечающих за доставку сообщений. Соответственно к ним относятся кольцо и шина.

Кольцо. Данная модель является наиболее простой и требует минимум дополнительного оборудования. Для организации компьютеров в сеть они соединяются в цепочку, а затем первая и последняя машина также соединяются для организации кольца. Машины в кольце нумеруются, то есть им выдаются уникальные имена (адреса) и выбирается направление доставки сообщений.

Для правильной доставки сообщений в схему адаптера необходимо включить специальный управляющий элемент. Смоделируем его при помощи конечного детерминированного автомата. Заметим сразу, что моделировать сейчас и в дальнейшем мы будем лишь процесс доставки сообщения в сети, так как процесс генерации сообщения сильно зависит от прикладного приложения и поэтому его моделирование не представляется эффективным.

Каждый компьютер подключен к кольцу двумя выводами: по одному из них сообщения попадают в машину, по другому при необходимости ретранслируются далее. Соответственно первый из них будет входом нашего КДА, а второй – выходом.

Множество состояний КДА $S: S_0, S_1, S_2, S_3$ (ожидание, получение, обработка и ретрансляция сообщения соответственно), входной X и выходной алфавит Y совпадают с множеством $VU \{\$, \#\}$ UA .

Таблица переходов и выходов для I -й машины выглядит следующим образом:

S	X	$\$$	$\#$	I	$n \text{ in } A/\{I\}$	$v \text{ in } V$
S_0		S_1	–	–	–	–
S_1		–	–	S_2	$S_3, \$n$	–
S_2		–	S_0	–	–	S_2
S_3		–	$S_0, \#$	–	–	S_0, v

Функционирование устройства протекает по следующей схеме.

В начальный момент автомат находится в состоянии S_0 (ожидание сообщения). После получения стартового символа автомат переходит в состояние S_1 (получение сообщения), затем должен следовать адрес получателя. Если он совпадает с адресом текущей машины I , значит, сообщение предназначено ей, и устройство переходит в состояние S_2 (обработка сообщения), в котором и находится до получения стопового символа. В противном случае необходимо переслать сообщение дальше по кольцу – автомат переходит в состояние S_3 и ретранслирует на выход все сообщение до стопового символа.

Как видно, данное управляющее устройство является чрезвычайно простым, однако требуется устанавливать его в каждую машину в сети. Кроме этого, топология «кольцо» имеет еще целый ряд серьезных недостатков, например чрезвычайно низкая отказоустойчивость и слабая устойчивость к коллизиям. Так, во время передачи по кольцу одного сообщения другая станция по пути следования пакета может инициировать еще одну передачу, в результате чего до адресатов не дойдут исходные сообщения. Для решения таких проблем были разработаны более совершенные модели.

Шина. Здесь мы рассмотрим модель, получившую название шина с передачей маркера (TokenBus). Все рабочие станции сети подключены к одному общему каналу передачи данных. В сети циркулирует маркер, который передается последовательно от одной станции к другой через канал передачи данных. Машины прослушивают канал, и при наличии в канале маркера, номер которого соответствует номеру данной станции, она переходит в активный режим. В активном режиме станция анализирует заполненность буфера передачи. Если в буфере есть сообщения для передачи, то в канал передается пакет указанного выше формата. После передачи пакета сообщения или в случае отсутствия сообщений для передачи в канал передается маркер с номером следующей включенной станции.

В качестве маркера будем использовать сообщение, в котором в качестве тела будет специальный символ M .

Заметим, что на рисунке рабочие станции подключены к шине одним каналом, однако здесь и в дальнейшем подразумевается, что этот физический канал функционирует в режиме full duplex, то есть в нем действуют 2 виртуальных канала, пересылающих данные в противоположных направлениях.

Понятно, что эта модель также не имеет управляющего центра, поэтому управляющие устройства также нужно будет установить в каждой рабочей станции.

Множество состояний КДА S : $S_0, S_1, S_2, S_3, S_4, S_5$ (ожидание, получение, чтение, активное состояние, обработка, отсылка маркера соответственно), входной X и выходной алфавит Y совпадают с множеством $VU \{ \$, \#, M \} UA$.

Таблица переходов и выходов для I -й рабочей станции выглядит следующим образом:

S / X	$\$$	$\#$	l	$n \text{ in } A/\{l\}$	M	$v \text{ in } V$
S_0	S_1	-	-	-	-	-
S_1	-	-	S_2	S_0	-	-
S_2	-	-	-	-	S_3	S_4
S_3	-	-	-	-	-	-
S_4	-	S_0	-	-	-	S_4
S_5	$S_0, \$I+1M\#$	$S_0, \$I+1M\#$	$S_0, \$I+1M\#$	$S_0, \$I+1M\#$	$S_0, \$I+1M\#$	$S_0, \$I+1M\#$

Схема функционирования данного устройства следующая.

В начальном состоянии автомат находится в состоянии S_0 (ожидание сообщения), при получении стартового символа он переходит в состояние S_1 (получение сообщения). Если далее идет символ из множества $A/\{I\}$, то это означает, что пакет адресован не этой рабочей станции, и устройство снова переходит к ожиданию S_0 , иначе же автомат переходит к состоянию S_2 (чтение сообщения). Затем в зависимости от следующего символа устройство либо переходит в активное состояние S_3 , либо приступает к обработке сообщения S_4 . Работу устройства в активном состоянии мы не рассматриваем, поскольку это не входит в нашу задачу, однако ее суть состоит в посылке сообщения из накопительного буфера и дальнейшем переходе к состоянию передачи маркера S_5 , в котором вне зависимости от входного символа автомат переходит в начальное состояние S_0 и отсылает на выход маркер для следующей рабочей станции (сложение $I+1$ при этом происходит по модулю N – количества рабочих станций в сети).

Данная модель в выгодную сторону отличается от предыдущей тем, что не подвержена коллизиям первого рода (связанным непосредственно с передачей сообщений внутри сети), однако здесь остро встают проблемы коллизий второго рода (связанных с изменением структуры сети). Они возникают в следующих ситуациях:

- а) при подключении к сети новой станции;
- б) при потере маркера (например, при аварийной ситуации на активной станции или при выключении станции, работающей в сети);
- в) при появлении нескольких маркеров.

При обнаружении коллизии станции переходят в режим реконфигурации. В режиме реконфигурации каждая станция ожидает прихода маркера определенное время, зависящее от номера станции. Если за это время станция не получила маркер, то она сама генерирует маркер и передает его через канал станции, номер которой на единицу больше номера передающей станции, и ожидает передачу маркера следующей станцией. Если следующая станция не активна, то станция, передавшая маркер, увеличивает номер станции и снова передает маркер. Так продолжается до тех пор, пока какая-либо станция кольца не получит маркер и не начнет передавать его дальше по кольцу. Станция, передавшая маркер, переходит в режим нормальной работы.

Следует также отметить, что возможны модификации на базе этой модели. Так, широко известен стандарт TokenRing / IEEE 802.5, в основе которого лежит топология «кольцо», а для разрешения коллизий применяется заимствованная из этой модели технология разграничения доступа при помощи маркера. Стандарт разработан в начале 1970-х годов и до сих пор является приоритетным стандартом локальных сетей, продвигаемых фирмой IBM.

Часть 2. Централизованные сетевые топологии

В данных сетевых моделях рабочие станции не участвуют в процессе доставки сообщения, а лишь выступают в роли генератора или потребителя сообщений. Функции по доставке пакетов адресатам возлагаются на специализированные устройства. Таким образом, в сети происходит своего рода «разделение труда». Такой подход предоставляет массу удобств как для администрирования, так и для поддержания работоспособности сети, кроме того, делает сеть практически невосприимчивой к коллизиям второго рода.

Исследование функционирования таких устройств представляет большой интерес.

Звезда

На сегодняшний день является самым распространенным и популярным принципом построения сетей, поскольку сочетает в себе высокую скорость и хорошую отказоустойчивость. В данном случае сеть строится вокруг коммуникационного устройства, при этом рабочие станции подключаются к нему непосредственно.

Простейшим устройством, которое может быть применено для создания сети, является hub (концентратор). Концентратор – многопортовый повторитель сети. Все порты концентратора равноправны. Получив сигнал от одной из подключенных к нему станций, концентратор транслирует его на все свои активные порты. Рабочая станция, получив пакет, должна сама определить, ей ли этот пакет предназначен, и в случае несовпадения номера адресата со своим номером должна отвергнуть его обработку. Рассмотрим сеть на основе топологии «звезда» с концентратором и промоделируем автоматом его работу, придерживаясь введенных ранее обозначений для структуры сообщения.

Пусть концентратор имеет N портов, и k -му порту подключена рабочая станция с адресом I . Для его функций нам потребуется N однотипных КДА, выходы которых объединены и подключены к соответствующим выходам портов концентратора (рис. 1).

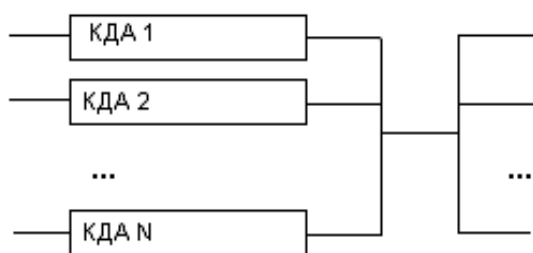


Рис. 1

Входы автоматов подключаются к соответствующим входам портов. Все N автоматов абсолютно идентичны. Рассмотрим подробнее один из них.

Множество состояний S состоит из двух состояний: ожидание сообщения S_0 , пересылка сообщения S_1 . Входной X и выходной алфавит Y совпадают с множеством $VU \{ \$, \# \} UA$. Таблица выходов и переходов автомата представлена ниже.

S / X	\$	#	c in V U A
S0	S1,\$	–	–
S1	–	S0,#	S1,c

Схема функционирования данного устройства предельно проста. Ожидая сообщения, автомат находится в состоянии S0, после получения стартового символа он переходит в состояние S1 и пересылает на выход все символы, поступающие на вход, вплоть до стопового знака #. Благодаря тому, что выходы автоматов объединены, сообщение рассылается на все порты концентратора, тем самым достигается требуемая функциональность. Управляющий элемент в концентраторе чрезвычайно простой. Это и объясняет его небольшую стоимость и огромную популярность. Однако в современном представлении о компьютерных сетях немалую часть отводят проблемам безопасности передачи конфиденциальных данных. Таким образом, такая простая схема имеет и обратную сторону, поскольку концентратор не обеспечивает разграничения доступа, а оставляет это на совести рабочей станции. В итоге недобросовестный пользователь может без труда получить все сообщения, которые предназначены другой рабочей станции, находящейся в одном сегменте с ним. При этом ни адресат, ни автор сообщения не будут даже проинформированы о несанкционированном доступе к сообщению. Кроме того, в концентраторах также возможны коллизии вследствие того, что выходной канал устройства в N раз уже суммы входных каналов, и при интенсивной нагрузке на сеть неизбежны потери сообщений.

Такие обстоятельства привели к появлению новых устройств, выполняющих схожие функции. Одним из таких устройств является коммутатор (switch). Главной его особенностью является то, что он способен анализировать структуру сети и разграничивать доступ к данным. В модели OSI/ISO это выражается в том, что коммутатор работает не только на физическом, но и на канальном уровне, устанавливая своеобразный виртуальный канал между отправителем и получателем сообщения. Рассмотрим простой случай подключения коммутатора в сеть. Пусть на рис. 4 коммуникационное устройство является коммутатором, такое подключение будет способствовать тому, что сообщение будет рассылаться не всем рабочим станциям в сегменте, а лишь той машине, которой оно предназначено. Промоделируем работу коммутатора в данном подключении.

Модель также будет состоять из N конечных детерминированных автоматов, однако каждый из них будет иметь N выходов, объединены будут одноименные выходы всех автоматов и будут подключены к выходам портов коммутатора (рис. 2).

Допустим, что к порту коммутатора с номером i подключена машина с адресом I (это избавит нас от необходимости моделирования алгоритма анализа структуры сети, которым мы займемся при рассмотрении следующего пункта).

Все автоматы будут также идентичны друг другу. Выходной алфавит каждого автомата представляет собой множество векторов длины N , элементами которых являются символы из множества $VU \{ \$, \# \} UA$. Входной алфавит каждого из автоматов совпадает с множеством $VU \{ \$, \# \} UA$. Множество состояний автомата состоит из $N+2$ элементов: S0 (ожидание сообщения), K (коммутация), и S1, ..., SN (отправка сообщение по каналу 1, ..., N).

Таблица переходов и выходов для каждого из автоматов выглядит следующим образом:

S / N	\$	#	p in A	v in V
S0	K	–	–	–
K	–	–	$S_p, (... , \$p, ...)^*$	–
$S_i, i \text{ in } 1, \dots, N$	–	$S0, (... , \#, ...)^{***}$	–	$S_i, (... , v, ...)^{**}$

$S_p, (... , \$p, ...)^*$ – символы $\$p$ стоят на позиции p в выходном векторе, остальные позиции в векторе пустые;

$S_i, (... , v, ...)^{**}$ – символ v стоит на позиции i в выходном векторе, остальные позиции в векторе пустые;

$S_i, (... , \#, ...)^{***}$ – символ $\#$ стоит на позиции i в выходном векторе, остальные позиции в векторе пустые.

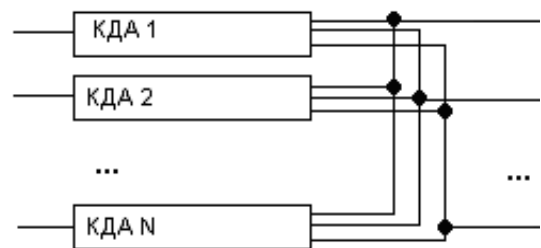


Рис. 2

Автомат функционирует следующим образом. В начальный момент времени он находится в состоянии S_0 (ожидание сообщения). При получении стартового символа $\$$ сообщения он переходит в состояние коммутации, в котором он читает адрес получателя сообщения и производит коммутацию его на соответствующий выходной поток, то есть переходит в состояние S_p , где p – адрес рабочей станции – получателя. В дальнейшем, находясь в состоянии S_p , устройство пересылает пакет на выходной порт p и переходит в исходное состояние при получении стопового символа $\#$.

Данное устройство обеспечивает высокую пропускную способность, а добавление к нему буферов для сообщений на выходе практически исключает возможность коллизий. Однако наш случай подключения сети достаточно примитивен и не реализует все возможности данного устройства. Более подробная его модель будет рассмотрена в следующем разделе.

Дерево. Данная топология является развитием топологии «звезда» и в настоящее время применяется при построении больших локальных сетей. Поскольку число портов у коммуникационных устройств стандартизировано и невелико, для подключения в сеть большого числа компьютеров потребовалось соединять между собой непосредственно коммуникационные устройства. Кроме того, такой метод может применяться и в небольших локальных сетях, когда группы компьютеров удалены на достаточно большое расстояние.

При использовании концентраторов в качестве коммуникационных устройств не требуется вносить никаких изменений в предложенную нами ранее модель, поскольку они применяют широко-вещательный способ доставки сообщений, и рано или поздно сообщение дойдет до получателя.

Однако чем больше концентраторов будет подключено в дереве, тем больше вероятность возникновения коллизий. Поэтому такую структуру, состоящую из одних концентраторов, называют доменом коллизий. Во всех сетевых стандартах есть ограничения на размер доменов коллизий, связанный с гарантированностью доставки сообщения (при большем размере домена доставка не гарантируется).

Для разделения доменов коллизий раньше применялись такие устройства как мосты (двухпортовые устройства, предназначенные для пересылки сообщений между доменами коллизий). В настоящее время их успешно заменяют коммутаторы, которые позволяют соединять сразу несколько доменов.

Для реализации этого нам придется пересмотреть модель коммутатора, представленную в предыдущем разделе. Для того чтобы правильно пересылать сообщения, коммутаторы должны знать, за каким портом находится тот или иной адрес. Для этих целей в реальных устройствах применяются специальные адресные кэши. В нашей же модели мы применим автомат с магазинной памятью. Кроме того, устройство должно информироваться об изменениях в рабочих станциях, подключенных к нему, поэтому при подключении/отключении новой рабочей станции порт коммутатора будет генерировать специальный пакет, который будет уходить внутрь устройства ($\$+I\#$ – при подключении и $\$-I\#$ – при отключении, где I – адрес рабочей станции).

Схема подключения автоматов такая же, как на рис. 6, с той лишь разницей, что в ней участвуют не КДА, а МП-автоматы. Кроме того, все N автоматов будут обладать общими N лентами, однако I -й автомат может писать только на ленту с номером I , а читать с любой ленты.

Структура автомата с номером I :

Множества входных символов X и выходных символов Y совпадают с множеством $VUAU$ $\{\$, \#, +, -\}$. Алфавит магазинов F является множеством A .

Множество состояний автомата S состоит из $2 \cdot N + 5$ элементов: S_0 – ожидание сообщения, R – распознавание, K – коммутация, P – добавление адреса, M – удаление адреса, $S_1 \dots S_N$ – отправка сообщения по одному из N каналов, $O_1 \dots O_N$ – оповещение об изменении по одному из N каналов.

Состояние автомата будем описывать следующим образом: (q, x, y, f) , где q – текущее состояние автомата, x – оставшаяся цепочка на входе, y – текущая цепочка на выходе, f принадлежит $(F^*)^N$ и представляет собой текущее содержание лент магазина. В начальный момент автомат находится в состоянии S_0 , и все ленты пусты.

Опишем функционирование автомата переходами между состояниями; для того, чтобы не загромождать состояния, будем указывать, в какой из выходных портов осуществляется вывод в каждом случае:

1. $(S_0, \$x, e, f) \Rightarrow (R, x, e, f)$
2. $(R, jx, e, f) \Rightarrow (K, jx, e, f)$, где j принадлежит множеству адресов A
3. $(R, +x, e, f) \Rightarrow (P, +x, e, f)$
4. $(R, -x, e, f) \Rightarrow (M, -x, e, f)$

5. $(K, jx, e, (f_1, f_2, \dots, \alpha j \beta, \dots, f_n)) \Rightarrow (Sk, x, \$j, f)$, где $f = (f_1, f_2, \dots, \alpha j \beta, \dots, f_n)$, и $\alpha j \beta$ стоит в f на k -м месте ($f_k = \alpha j \beta$), вывод осуществляется в k -й порт, α и β произвольные (возможно пустые) цепочки в алфавите F
6. $(Sk, vx, y, f) \Rightarrow (Sk, x, yv, f)$, для все k из $1..N$ и для всех v из V , вывод осуществляется в k -й порт
7. $(Sk, \#, y, f) \Rightarrow (S0, e, y\#, f)$, вывод осуществляется в k -й порт
8. $(P, +C\#, e, (f_1, f_2, \dots, f_i, \dots, f_n)) \Rightarrow (O1, +C\#, \$, (f_1, f_2, \dots, f_i C, \dots, f_n))$, вывод осуществляется в первый порт, C – символ из алфавита A
9. $(M, -C\#, e, (f_1, f_2, \dots, \alpha C \beta, \dots, f_n)) \Rightarrow (O1, -C\#, \$, (f_1, f_2, \dots, \alpha \beta, \dots, f_n))$, где $\alpha j \beta$ находится в f на позиции I (номера автомата), то есть $f_i = \alpha j \beta$, вывод осуществляется в первый порт, α и β произвольные (возможно пустые) цепочки в алфавите F
10. $(Ok, x, y, f) \Rightarrow (Ok+1, x, (.yx, \$.), f)$, для всех k из $1..N-1$ вывод yx осуществляется в k -й порт, а $\$$ в $k+1$ -й
11. $(ON, x, y, f) \Rightarrow (S0, e, yx, f)$, вывод осуществляется в N -й порт

Устройство функционирует следующим образом. Находясь в начальный момент в состоянии $S0$ и получая стартовый символ $\$$, устройство переходит в состояние R (распознавание сообщения), если следующий символ является адресом, то автомат переходит к коммутации K , иначе в зависимости от символа «+» или «-» коммутатор переходит к добавлению или удалению адреса. Процесс коммутации похож на коммутацию в предыдущей модели с той разницей, что адрес получателя сообщения находится на ленте, соответствующей определенному порту и затем на этот порт происходит отправка пакета. Добавление и удаление адреса заключается в том, что на ленту с номером I дописывается пришедший в пакете адрес, а затем коммутатор переходит к рассылке оповещения по всем портам о вновь подключившейся рабочей станции, чтобы и другие коммутаторы в сети сумели обновить свои кэши адресов. Удаление сообщения отличается лишь тем, что с ленты с номером I стирается соответствующий адрес.

Утверждение 1. Для правильной работы данного устройства в сети, содержащей M функционирующих адресов, логическому элементу необходимо иметь объем памяти порядка $O(M)$.

Доказательство

Представленная модель логического элемента работает с двумя видами памяти (имеет $2*N+5$ состояний и хранит список адресов на лентах), поскольку при правильной работе устройства в сети, содержащей M адресов, каждый адрес должен быть записан на одной из лент автомата (располагаться за одним из портов устройства). Таким образом, суммарная емкость памяти для всех лент автомата должна быть не менее sM , где s – коэффициент, характеризующий объем памяти, необходимый для хранения 1 адреса. Поскольку количество портов коммутирующего устройства зависит от количества обслуживаемых адресов лишь косвенно, то количество состояний модели можно принять за константу S при рассмотрении зависимости объема памяти от количества обслуживаемых адресов.

Таким образом, получаем, что необходимый объем памяти устройства составляет $sM + S$. Утверждение доказано.

Утверждение 2. Для правильной работы данного устройства в сети, содержащей M функционирующих адресов, при принятии решения относительно направления пакета на один из выходных портов устройству достаточно совершить порядка $O(M)$ циклов работы логического элемента.

Доказательство

Действительно, при выполнении шага 5 описанной модели логический элемент осуществляет поиск на лентах адреса назначения пакета, просматривая за 1 такт работы 1 адрес. Очевидно, что в худшем случае логическому элементу придется просмотреть содержимое всех лент. Как было показано в утверждении 1, в ходе работы ленты автомата содержат ровно M записей. Таким образом, автомату в худшем случае может потребовать M циклов работы. Утверждение доказано.

Примечание. Зачастую реальные сетевые устройства могут осуществлять поиск по буферу адресов параллельно для разных портов, однако это уменьшает время поиска в константное число раз, оставляя сложность операции такой же $O(M)$.

Данный метод доставки сообщений является наиболее эффективным в настоящее время, так как требует широкоэвентальной передачи только тогда, когда в сеть подключается новая рабочая станция. Однако данная модель требует четко выдерживать топологию дерева, поскольку появление в сети циклов может привести к непредсказуемым последствиям, так как на один коммутатор с разных портов могут прийти оповещения с одним и тем же адресом. Эта ситуация не предусмотрена стандартом и устройства различных производителей ведут себя по-разному.

Заключение

Таким образом, рассмотрев несколько сетевых топологий и моделей коммуникационных устройств, приходим к выводу, что в современных вычислительных сетях большую популярность имеют централизованные топологии, поскольку они удешевляют стоимость абонентского оборудования за счет вынесения всех логических элементов в специальные коммуникационные устройства. Существует также и тенденция усложнения функциональности коммуникационных устройств, которая позволяет организовывать наиболее эффективные и безопасные сети передачи данных.

ЛИТЕРАТУРА

1. Пархоменко П.П., Согомонян Е.С. Основы технической диагностики, оптимизации алгоритмов диагностирования, аппаратные средства. М.: Энергоиздат, 1981.
2. Сытник А.А. Перечислимость при восстановлении поведения автоматов // Доклады РАН. 1993. Т. 238. С. 25-26.
3. Сытник А.А. Методы и модели восстановления автоматов // Автоматика и телемеханика. 1992. № 11.
4. Сытник А.А., Шульга Т.Э., Романов С.В. О возможностях использования коммуникативных грамматик и LSPL-шаблонов для автоматического построения онтологий // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015. Т. 17. № 2(5). С. 1104-1108.

Сытник Александр Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Информационные системы и технологии» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Sytnik – Dr. Sc., Professor
Head: Department of Information Systems And Technologies
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Гвоздюк Илья Вячеславович – аспирант Национального исследовательского технологического университета «МИСиС»

Илья V. Gvozdyuk – Postgraduate,
National University of Science and Technology «MISIS» (Moscow Institute of Steel and Alloys)

Статья поступила в редакцию 15.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 004.42

А.В. Чугунов

МЕТОДИКА РАСЧЕТА КООРДИНАТЫ ЗАДАННОЙ ЗОНЫ ПОКРЫТИЯ ДЛЯ БЕСПРОВОДНОЙ СЕТИ ВНУТРИ ПОМЕЩЕНИЙ, СООРУЖЕНИЙ ДЛЯ ПРОИЗВОЛЬНОГО ЛУЧА СКАНИРУЮЩЕГО ОТ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ДО ПРИЕМНИКА

Предложен и описан алгоритм расчета координаты заданной зоны покрытия беспроводной сети внутри помещений, в основе которого лежит метод трассировки лучей. Данный метод, несмотря на свою высокую точность, несет большие аппаратные затраты. Задачей алгоритма является уменьшение аппаратных затрат при расчете зон покрытия таким образом, чтобы точность получаемых данных была по-прежнему высокой. Результаты работы алгоритма были сопоставлены с данными экспериментальных измерений и находятся в хорошем соответствии.

IEEE 802.11, зона покрытия, метод трассировки лучей, архитектурные планы здания, лучи сканирования, уровень сигнала

A.V. Chugunov

CALCULATING THE COORDINATE FOR THE INDOOR WIRELESS COVERAGE WITH THE ARBITRARY BEAM SCANNING FROM THE RADIATION SOURCE TO THE RECEIVER

The paper suggests and describes an algorithm for calculating the coordinates of a given zone in a wireless network inside buildings, based on the ray tracing method. Despite its high accuracy, the method involves large hardware costs. The purpose of the algorithm is to reduce hardware costs when calculating the coverage, so that the accuracy of the data remained high. The results of the algorithm were compared with the experimental measurements and are consistent.

IEEE 802.11, coverage, rays transgression method, architectural plans of the building, scanning beams, the signal level

В настоящее время идет непрерывный рост доли беспроводных технологий в передаче сетевого трафика. Основной технологией построения беспроводных локальных сетей является семейство стандартов IEEE 802.11, имеющее более известное коммерческое название – Wi-Fi. Для увеличения мобильности бизнеса и производственных процессов повсеместно внедряются беспроводные локальные сети (WLAN). Wi-Fi сети легко развернуть в небольших помещениях, обычно при этом используется одна точка доступа. Примерами таких сетей являются домашние WLAN, а также беспроводные сети малого бизнеса. Однако при создании крупной корпоративной беспроводной сети архитектор сталкивается с рядом проблем. Семейство стандартов IEEE 802.11 работает частотах 2,4 и 5,1 ГГц, на них имеет место сильное поглощение радиосигнала средой и вместе с низкой мощностью точек доступа радиус их действия даже на открытой местности не превышает 70 м. В офисных и производственных помещениях, имеющих сложную конфигурацию межкомнатных перегородок, материалы которых обладают разными значениями комплексной диэлектрической проницаемости, определить зону покрытия без ее моделирования представляется довольно сложным процессом с большими временными затратами. Не используя программное моделирование, единственным способом определения области действия сети является измерение уровня радиосигнала с помощью специального оборудования во всех помещениях, в которых должна работать WLAN. Построение корпоративных беспроводных сетей подразумевает создание зоны покрытия большой площади, и, как следствие, измерение уровня сигнала экспериментальным путем для одной ТД не даст желаемого результата. Производить же ручные измерения для десятков и сотен беспроводных роутеров очень затратно как по времени, так и по финансам. Основываясь на этом, весьма актуальным является формирование специализированных алгоритмов программ, которые могут быть внедрены в САПР, дающие возможность на базе чертежей планов здания сделать оценку характера распространения электромагнитных волн и выбрать оптимальные местоположения ТД. Существующие на сегодня программы характеризуются большой погрешностью в вычислениях, или в их вычислениях идет потребление огромного количества ресурсов [1].

Целью данной работы является создание алгоритма расчета зон покрытия беспроводных сетей семейства стандартов IEEE 802.11 внутри помещений со сложной конфигурацией перегородок с точностью получаемых данных, близкой к экспериментальным замерам.

Для разработки модели распространения сканируемых лучей используем в своей основе метод трассировки лучей [2-6]. Главным достоинством метода является то, что модели, построенные на этом методе, достаточно точные, но несут довольно большие аппаратные затраты – высокую стоимость вычислений. Задачей данного алгоритма является оптимизация модели трассировки лучей для уменьшения стоимости вычислений. Исходными данными выбран одинарный сканирующий луч произвольной длины с углом сканирования, равным 15 градусов, заданы расстояние до препятствия, его толщина, комплексная диэлектрическая проницаемость материала и угол падения на отражающую поверхность препятствия на каждом из 24 сканируемых лучей, а также заданы зоны покрытия, для которых производится расчет. В основу алгоритма положен принцип расчета потерь при распространении радиоволны с шагом приращения 0,01 м до момента совпадения расчетных значений по-

терь со значением заданной зоны с последующей записью координаты определенной зоны в таблицу результатов расчета. По этому принципу рассчитываются все последующие лучи сканирования. Расчет уровня сигнала в алгоритме производится по формуле общих потерь распространении радиосигнала [7]:

$$L_{06}[dBm] = 10 \cdot \lg \frac{P_T}{P_0} [dBm] + L_0 [dB] + \dot{T} [dB], \quad (1)$$

где P_T – мощность передатчика источника излучения; P_0 – опорная мощность; L_0 – потери в свободном пространстве; \dot{T} – комплексный коэффициент передачи;

$$L_0 = 20 \cdot \lg \frac{\lambda}{4 \cdot \pi \cdot d}, \quad (2)$$

где λ – длина волны излучения, $\lambda = 12 \cdot 10^{-2}$ м; d – расстояние до препятствия.

Формула расчета коэффициента передачи [8, с. 15]:

$$\dot{T} = \frac{(1-R_c^2) \cdot e^{(-i \cdot 2 \cdot \delta)}}{1-R_c^2 \cdot e^{(-i \cdot 2 \cdot \delta)}} \text{ (коэффициент передачи)}, \quad (3)$$

где

$$\delta = \sqrt{\eta - (\sin \theta)^2} \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot d}{\lambda}, \quad (4)$$

где d – толщина строительного материала; η – коэффициент диэлектрической проницаемости материала препятствия; θ – угол падения луча сканирования на поверхность препятствия;

$$R_c = \frac{(R_n + R_p)}{2} \text{ (круговая поляризация)}, \quad (5)$$

$$R_n = \frac{(\cos \theta - \sqrt{\eta - (\sin \theta)^2})}{(\cos \theta + \sqrt{\eta - (\sin \theta)^2})} \text{ (составляющая Е-поля, перпендикулярная плоскости отражения)}, \quad (6)$$

$$R_p = \frac{(\cos \theta - \sqrt{\frac{\eta - (\sin \theta)^2}{\eta^2}})}{(\cos \theta + \sqrt{\frac{\eta - (\sin \theta)^2}{\eta^2}})} \text{ (составляющая Е-поля, параллельная плоскости отражения)}, \quad (7)$$

$$T_{ab} = 20 \cdot \log(|\dot{T}|). \quad (8)$$

На рис. 1, 2 показан алгоритм расчета зон покрытия беспроводной сети внутри помещений для произвольного луча сканирования.

Достоинства метода:

- программа учитывает затухание сигнала при прохождении через препятствие с учетом угла падения сканируемого луча, толщины и диэлектрических свойств материала препятствия;
- процесс расчета полностью автоматизирован до момента определения координаты заданной зоны покрытия;

– при использовании данного метода расчета мы получим координату зоны покрытия беспроводной сети для сканируемого луча, не задаваясь радиусом сканирования.

К недостаткам метода стоит отнести:

- отсутствие автоматического ввода координат препятствий, его толщины на пути сканируемых лучей с чертежа плана исследуемого помещения.

Для сравнения зоны покрытия, выполненной с помощью алгоритма, с реальными значениями уровней RSSI излучений от ТД в различных точках пространства были проведены замеры зон покрытия в одном из помещений вуза, имеющем сложную конфигурацию межкомнатных перегородок [9].

В исследуемом помещении беспроводной маршрутизатор выбирается точкой отсчета координат. На плане помещения от него строятся линии в виде лучей с интервалом в 15 градусов, вдоль которых будут проводиться измерения (рис. 3). Для детального определения изменений, вносимых отраженным от препятствий сигналом, в основной, при построении измерительных линий следует сделать более короткий интервал их построения. Такое решение приведет к резкому увеличению временных и финансовых затрат при проведении экспериментальных замеров зоны покрытия.

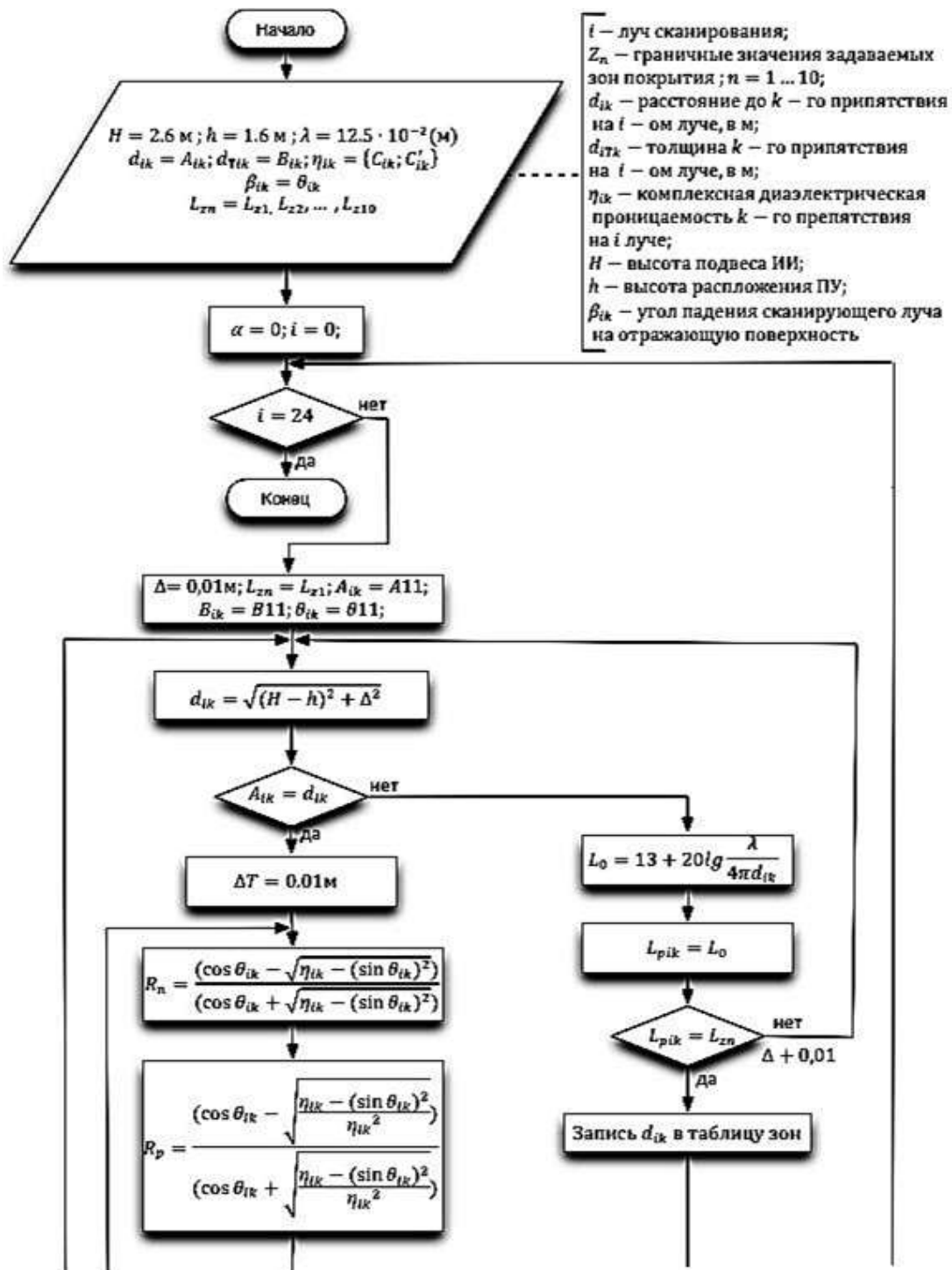


Рис. 1. Алгоритм расчета зон покрытия беспроводной сети внутри помещений для произвольного луча сканирования, часть 1

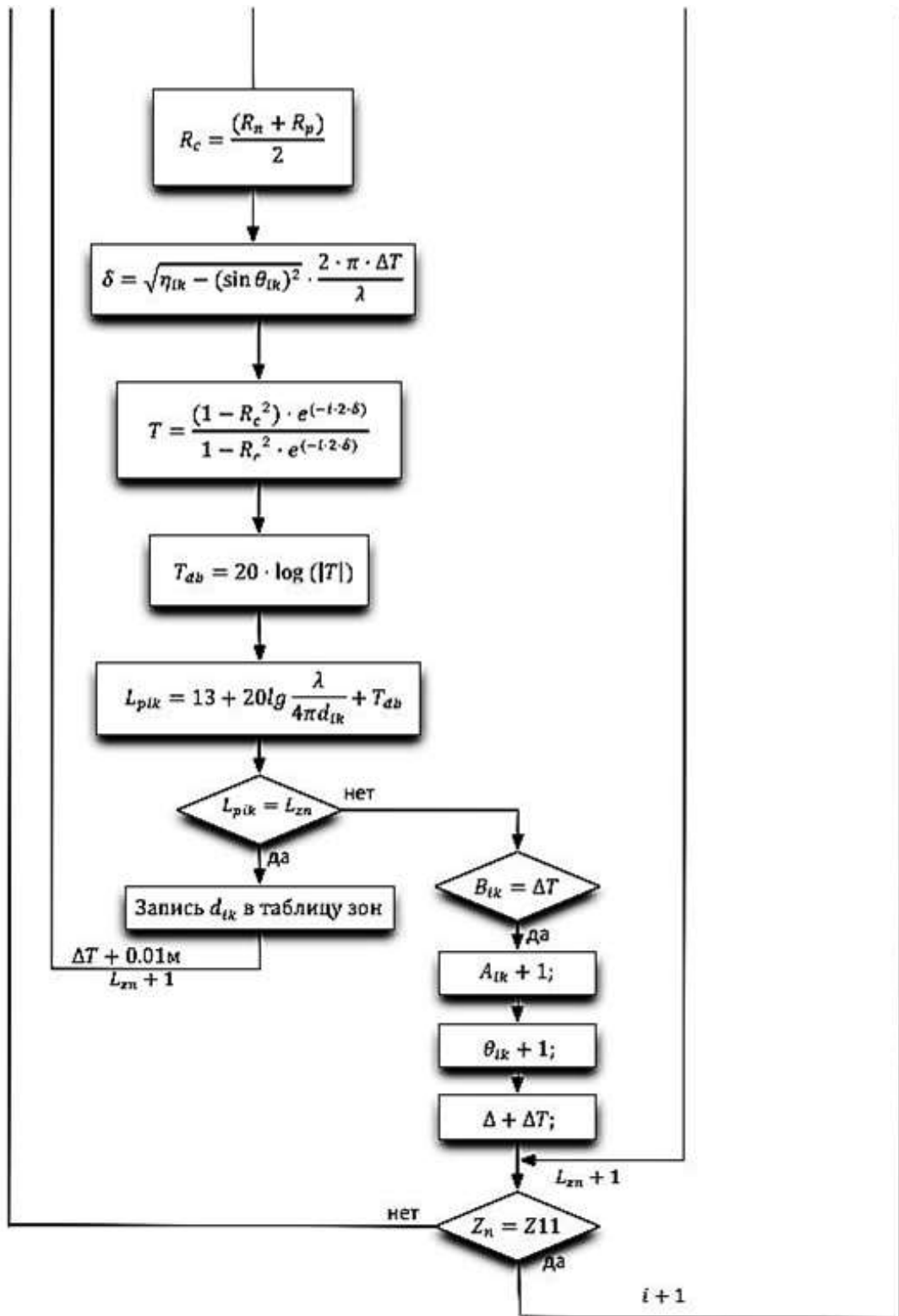


Рис. 2. Алгоритм расчета зон покрытия беспроводной сети внутри помещений для произвольного луча сканирования, часть 2

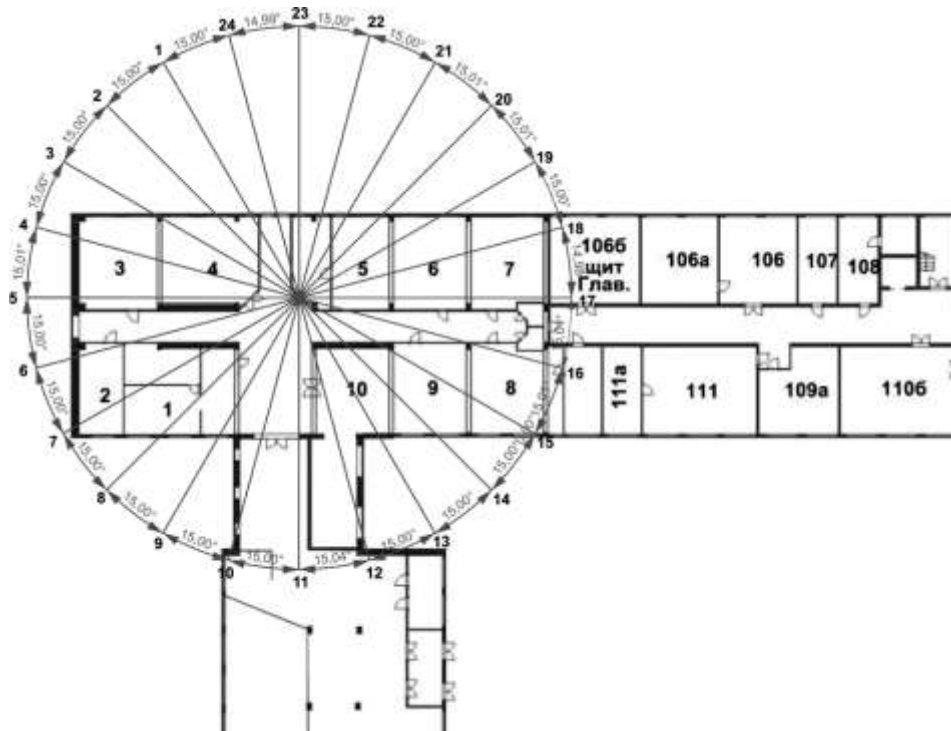


Рис. 3. Линии измерения на плане этажа

Использование компаса совместно с измерительным оборудованием, работающим на частоте 2,4 ГГц, не представляется возможным вследствие электромагнитных помех, вносимыми последним. Исходя из этого, точность перемещения по измерительным линиям при осуществлении замеров задается геометрическими расчетами на плане помещения, вследствие чего для осуществления экспериментальных измерений так важно иметь точный архитектурный план, а также прибор для измерения расстояний – лазерный дальномер.

Данные напряженности электромагнитного поля в приемной антенне измерительного устройства снимались с шагом в 1 м. В качестве измерительного оборудования использовался сканер беспроводных сетей семейства стандартов IEEE 802.11 AirCheck [10] от компании Fluke Networks. Он позволяет, просканировав радиоэфир, подключиться к нужной беспроводной сети и выбрать для исследования уровня сигнала определенную ТД. Уровень сигнала на приборе отображается в виде RSSI (индикатор силы принимаемого сигнала) [11, с. 194-195], выражаемой в dBm [12]. Данные значения всегда отрицательны. Если проводить замер уровня сигнала непосредственно под беспроводным маршрутизатором, значение RSSI будет в диапазоне от $-35 \dots -25$ dBm в зависимости от мощности передатчика, варьируемой от 20 до 100 мВт. Уровень RSSI в -85 dBm является граничным для большинства клиентских устройств, поэтому, достигнув этого значения, дальнейшие замеры вдоль измерительной линии не имеют смысла и можно переходить к замерам вдоль следующей. Все измерения осуществлялись в одной плоскости, параллельной полу, на высоте 1,5 м. Антенна измерительного прибора всегда находится в направлении распространения сигнала вдоль линии измерения.

Для каждого из лучей были получены графики величины RSSI в приемной антенне измерительного устройства. По оси Y отложены значения уровня сигнала в dBm, по оси X – расстояние от точки доступа с шагом в 1 м. В качестве влияния переотраженного сигнала на уровень сигнала в приемной антенне клиентских устройств можно привести график луча 18, пересекающего несколько помещений (рис. 4). Как видно из рисунка, расхождения данных об уровнях RSSI, полученных экспериментальным путем, от данных, полученных в ходе работы прототипа программы, построенной на основе алгоритма, приведенного выше, минимальна. Из этого следует, что базовые формулы по расчету потерь радиосигналов в открытом пространстве и при прохождении через препятствия, используемые в алгоритме, выбраны верно.

Луч 18

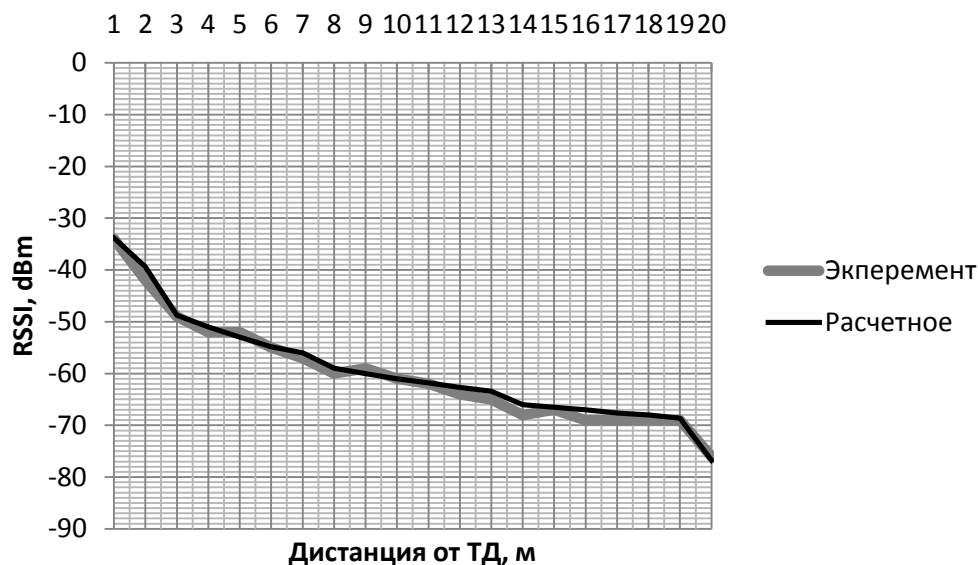


Рис. 4. Сравнение значений RSSI, полученных в ходе расчета с помощью алгоритма, с экспериментальными замерами

В результате разработки алгоритма мы получили возможность написания программного обеспечения определения зон покрытия беспроводной сети семейства стандартов IEEE 802.11 внутри помещений, имеющих сложную конфигурацию межкомнатных перегородок из различного материала. Это даст возможность производить сравнительный анализ размещения точек доступа при планировании зоны покрытия, что позволит сократить затраты на покупку беспроводного оборудования в сравнении с развертыванием беспроводной сети без планирования карты покрытия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Чугунов А.В. Система мониторинга беспроводной локальной сети стандарта IEEE 802.11 // Информационно-коммуникационные технологии в науке, производстве и образовании – ICIT 2014. Саратов, 27-29 янв. 2014 г. Саратов, 2014. С. 114-116.
2. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Методика прогнозирования радиолокационных характеристик объектов в диапазоне длин волн с использованием результатов измерения характеристик рассеяния на дискретных частотах // Системы управления и информационные технологии. 2004. Т. 14. № 2. С. 98-101.
3. Кульнева Е.Ю., Гашенко И.А. О характеристиках, влияющих на моделирование радиотехнических устройств // Современные наукоемкие технологии. 2014. № 5-2. С. 50.
4. Исследование методов оптимизации при проектировании систем радиосвязи / Я.Е. Львович, И.Я. Львович, А.П. Преображенский, С.О. Головинов // Теория и техника радиосвязи. 2011. № 1. С. 5-9.
5. Преображенский А.П., Чопоров О.Н. Алгоритм расчета радиолокационных характеристик полостей с использованием приближенной модели // Системы управления и информационные технологии. 2005. Т. 21. № 4. С. 17-19.
6. Программный комплекс для автоматизированного анализа характеристик рассеяния объектов с применением математических моделей / И.Я. Львович, А.П. Преображенский, Р.П. Юров, О.Н. Чопоров // Системы управления и информационные технологии. 2006. Т. 24. № 2. С. 96-98.
7. Распространение радиоволн в мобильной связи: метод. указ. по курсу «Распространение радиоволн и антенно-фидерные устройства в системах мобильной связи» / сост.: С.Н. Шабунин, Л.Л. Лесная. Екатеринбург: УГТУ, 2000. 38 с.
8. Рекомендация МСЭ-R P.1238-6. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования для планирования систем радиосвязи внутри помещений и локальных зонных радиосетей в частотном диапазоне 900 МГц - 100 ГГц. 2009. 25 с.

9. Чугунов А.В. Методика замера зон покрытия сетей IEEE 802.11, актуализирующая данные системы управления Cisco Prime Infrastructure // Проблемы управления в социально-экономических системах: труды XI Междунар. науч.-практ. конф. Саратов, 09-10 апр. 2015 г. Саратов, 2015. С. 44-47.

10. Тестер AirCheck для сетей Wi-Fi [Электронный ресурс]: официальный сайт. Режим доступа http://download.fluke-networks.com/Download/Asset/AirCheck_3611371_6500_RUS_F_W.PDF.

11. CC2510Fx/CC2511Fx Low-Power SoC (System-on-Chip) with MCU, Memory, 2.4 GHz RF Transceiver, and USB Controller [Электронный ресурс]: официальный сайт. Режим доступа <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/cc2511.pdf>.

12. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ: учеб. пособие для вузов. М.: Радиотехника, 2008. 184 с.

Чугунов Алексей Владимирович –
старший преподаватель кафедры
«Информационные системы и технологии»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey V. Chugunov –
Senior lecturer
Department Information Systems
and Technologies
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.06.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 625.72

Н.В. Щеголева

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦЕНКИ ВЕРОЯТНОСТИ ПОТЕРИ ИНФОРМАЦИИ ВОДИТЕЛЯМИ

Для решения проблемы повышения безопасности движения недостаточно сведений, получаемых традиционными методами исследования режима движения, в которых водитель выступает в неявной форме [1]. Это не только ограничивает точность исследований, но может служить причиной ошибочных выводов. В отечественной и зарубежной литературе, посвященной анализу аварийности на дорогах, неоднократно указывалось на необходимость прямого изучения процесса восприятия водителем дорожных условий, более полного учета человеческого фактора и возможностей человека в нормативных документах и методах проектирования дорог и организации движения.

Математическая модель, теория риска, информация, нормальный закон распределения, среднее квадратическое отклонение

N.V. Schegoleva

A MATHEMATICAL MODEL FOR ESTIMATING PROBABILITY OF INFORMATION LOSS BY THE DRIVERS

Information obtained by traditional methods of researching the driving mode, where the driver acts implicitly, is insufficient in order to solve the problems with improving traffic safety [1]. The given issue is challenging not only for the accuracy of investigations, but can result in erroneous conclusions. In domestic and foreign literature on the analysis of road accidents, the focus has been repeatedly made on the need for the study of perceptions of road conditions by the driver, and complete account of the human factor and human performance in regulations and methods of road design and traffic management.

Mathematical model, risk theory, information, the law of distribution, quadratic deviation

Любой уровень эмоционального состояния и психического напряжения является следствием информационной нагрузки и (или) перегрузки человека. Один и тот же уровень информации является неприемлемым для одних людей и не вызывающим больших напряжений для других. Этим подтверждается вероятностная сущность восприятия и переработки информации человеком. Динамический объем информации (B , бит/с) об опасной дорожной обстановке, частично или полностью воспринимаемый водителем, непрерывно поступающий к нему, определяется по формуле

$$B = b \cdot V. \quad (1)$$

Объем информации зависит от скорости движения автомобиля (V , м/с) и фактического количества информации (b , бит/м), сосредоточенной на конкретном участке дороги или в конкретной дорожно-транспортной ситуации (ДТС).

Зависимость (1) показывает, что с ростом скорости движения автомобилей увеличивается информационная нагрузка водителей, и поэтому в основе вывода формул теории риска должны быть положены такие теоретические законы распределения вероятностей, которые хорошо согласуются с фактическими распределениями вероятностей скоростей свободного движения автомобилей. Плотности (гистограммы) распределения скоростей свободного движения современных автомобилей хорошо согласуются с законом нормального распределения [3, 4].

Для вывода формул, описывающих риск потери информации водителем на основе нормального закона распределения, введем следующие обозначения (рисунок):

B_{cp} – математическое ожидание или среднее значение расчетного или фактического количества информации об опасных геометрических элементах, поступающей в кратковременную память водителя за 1 с, бит/с;

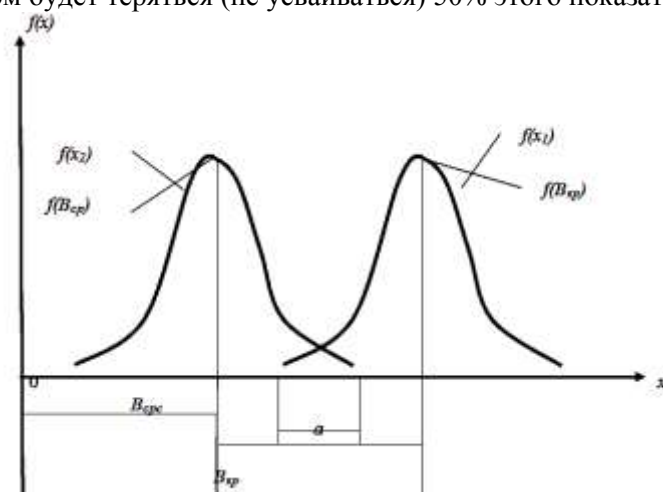
$B_{кр}$ – математическое ожидание или среднее значение критического количества информации об опасных геометрических элементах, при поступлении которой в кратковременную память водителя за 1 с будет потеряно (не усвоено) 50% этой информации, бит/с;

$f(B_{cp})$ – поле рассеивания параметра B_i^{cp} в пределах плотности распределения ($f(x_2)$);

$f(B_{кр})$ – поле рассеивания параметра $B_i^{кр}$ в пределах плотности распределения ($f(x_1)$);

$\sigma_{B_{cp}}$ и $\sigma_{B_{кр}}$ – средние квадратические отклонения текущих значений указанных параметров.

Формулы теории риска представляют собой формулы сравнения, в которых анализируется в данном случае положение закона распределения фактического количества информации со средним значением B_{cp} относительно положения закона распределения критического количества информации со средним значением $B_{кр}$ (см. рисунок) [2]. При этом подвижным является фактический закон распределения информации, а неподвижным является закон распределения критического количества информации (при котором будет теряться (не усваиваться) 50% этого показателя).



Плотность распределения фактического и критического количества информации с геометрическим представлением области риска: c – область риска; a – интервал между математическими ожиданиями; $f(x_2)$ – подвижное распределение фактической информации

Чем ближе фактический закон распределения к неподвижному закону, тем больше область риска (c), показывающая, какая часть значений фактической информации попала в область распределения критической информации. При этом интервал $a = B_{кр} - B_{ср}$ между математическими ожиданиями фактического количества $B_{ср}$ и критического количества $B_{кр}$ информации уменьшается.

Выполним свертку независимых нормально распределённых случайных величин $B_i^{ср}$ и $B_i^{кр}$, показанных на рисунке. В соответствии с решениями теории вероятностей известно, что сумма независимых нормально распределённых случайных величин имеет нормальное распределение. Тогда по формуле свертки получаем

$$f_{x_1-x_2}(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(x_1) \times f(z-x_1) dx = \frac{1}{\sigma_a \times \sqrt{2\pi}} \times e^{-\frac{(z-a)^2}{2\sigma_a^2}}, \quad (2)$$

где $f(z-x_1) = f(x_2)$ – см. рисунок; $a = B_{кр} - B_{ср}$ – интервал между математическими ожиданиями нормально распределённых величин; $\sigma_a = \sqrt{\sigma_{B_{ср}}^2 + \sigma_{B_{кр}}^2}$ – среднее квадратическое отклонение суммарного распределения двух нормально распределённых величин.

Функция суммарного распределения имеет вид

$$F(z) = \left[\frac{1}{(\sigma_a \sqrt{2\pi})} \right] \int_{-\infty}^z e^{-\frac{(z-a)^2}{2\sigma_a^2}} dx. \quad (3)$$

Заменой переменной $U = (z-a)/\sigma_a$ при $a=0$ и $dz = \sigma_a du$ получаем вероятность того, что $z < 0$:

$$P(z < 0) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right] \int_{-\infty}^u e^{-u^2/2} du = \Phi_u(u) - \Phi_u(-\infty) = \Phi_u(u), \quad (4)$$

где $\Phi_u(u)$ – функция нормального распределения.

Учитывая, что риск потери информации $r = P(z > 0)$ связан с формулой (4) соотношением $P(z > 0) = 1 - P(z < 0)$, получаем

$$r = P(z > 0) = 1 - \Phi_u(u) = 1 - \Phi_u\left(\frac{z}{\sigma_a}\right). \quad (5)$$

Табулируется, как правило, функция Лапласа

$$\Phi(u) = \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \right] \int_0^u e^{-u^2/2} du, \quad (6)$$

которая связана с функцией нормального распределения $\Phi_u(u)$ соотношением $\Phi_u(u) = 0,5 + \Phi(U)$.

Тогда

$$r = 1 - [0,5 + \Phi(u)] = 0,5 - \Phi(u) = 0,5 - \Phi(z/\sigma_a). \quad (7)$$

При $u = 0$ [или при $z = 0$] формула (7) дает риск 50%, то есть $r = 0,5$. При отрицательном аргументе u имеем $\Phi(-u) = -\Phi(u)$ и, следовательно, риск потери информации, устанавливаемый по формуле (7), становится больше 50%.

При $z = a$ формула (7) принимает вид

$$r = 0,5 - \Phi\left(\frac{a}{\sigma_a}\right) \quad (8)$$

и позволяет определять риск возникновения интервала a между математическими ожиданиями фактического количества информации и количества информации, соответствующей 50%-му риску.

Учитывая, что $a = B_{кр} - B_{ср}$ и $\sigma_a = \sqrt{\sigma_{B_{ср}}^2 + \sigma_{B_{кр}}^2}$, окончательно получаем

$$r_{ни} = 0,5 - \Phi \left[\frac{B_{кр} - B_{ср}}{\sqrt{\sigma_{B_{ср}}^2 + \sigma_{B_{кр}}^2}} \right], \quad (9)$$

где $\Phi(u)$ – функция Лапласа, определяемая по специальным таблицам в зависимости от значения квантили

$$u = \frac{B_{кр} - B_{ср}}{\sqrt{\sigma_{B_{ср}}^2 + \sigma_{B_{кр}}^2}},$$

где $B_{ср}$ – см. формулу (1); $\sigma_{B_{ср}}$ – среднее квадратическое отклонение фактического количества информации, учитывающее, что процесс восприятия водителем дорожной обстановки неоднозначен.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гусев В.А., Щеголева Н.В. Усилия международных организаций для решения проблемы безопасности дорожного движения // Модернизация и научные исследования в транспортном комплексе: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Пермь, 2013. Т. 2. С. 124-132.
2. Столяров В.В. Теория риска в судебно-технической экспертизе дорожно-транспортных происшествий (+ABS): монография. Саратов: ИД «МарК», 2010. 412 с.
3. Яркин А.М., Щеголева Н.В. Влияние информации, поступающей к водителю во время движения, на скоростной режим // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: СГТУ, 2014. С. 470-472.
4. Щеголева Н.В. Риск потери информации как обобщенная характеристика водителя при проектировании и эксплуатации автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук. Саратов, 2006. 128 с.

Щеголева Наталья Вячеславовна –
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia V. Shchegoleva –
Ph.D., Associate Professor
Department of Vehicle Buildment
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 625.72

Н.В. Щеголева

ПРИМЕНЕНИЕ ЭНТРОПИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ДОРОЖНО-ТРАНСПОРТНОЙ СИТУАЦИИ

Учет человеческого фактора в настоящее время базируется на двух самостоятельных подходах. Один из них основывается на изучении психической напряженности водителя с использованием так называемых «медицинских» методов изучения психофизиологических показателей. Другой подход к учету человеческого фактора в проектировании дорог и организации дорожного движения основывается на изучении и учете параметров теории информации, таких как вероятность возникновения нежелательного события, энтропия (мера неопределенности), объем информации на участке дороги и объем информации, поступающей к водителю за единицу времени. В связи с этим для учета человеческого фактора в проектировании дорог и организации движения можно

обратиться к математическим моделям теории информации и показать, что «риск потери информации» можно рассматривать как обобщенную характеристику водителя при проектировании и эксплуатации автомобильных дорог.

Неопределенность, энтропия, теория риска, теория информации, информационная емкость

N.V. Schegoleva

USING ENTROPY FOR UNCERTAINTY EVALUATION IN TRAFFIC MODELS

Today taking into account the human factor is based on two approaches. The first is based on the study of the mental tension of a driver using the so-called «medical» methods for the study of psycho-physiological indicators. Another approach, which takes account of the human factor in designing roads and the organization of traffic systems is based on the study and consideration of information theory parameters, such as probability of undesirable situations, entropy (uncertainty index), amount of incoming information per road stretch, and amount of information received by the driver per time unit. In this regard, to take account of the human factor in designing roads and traffic models, we can refer to a mathematical models from the information theory, and show that «risk of information losses» can be regarded as a generalized characteristic of the driver in the design and operation of automobile roads.

Uncertainty, entropy, risk theory, information theory, information capacity

Водитель автомобиля с точки зрения кибернетики является очень сложной вероятностной системой. Основным отличием вероятностных систем является то, что действия таких систем в любой ситуации можно предсказать только приблизительно с большей или меньшей степенью вероятности.

Так, зная дорожную обстановку, можно только в общих чертах судить о режимах движения, а следовательно, и о действиях водителей на том или ином участке дороги. Последнее обусловлено большим количеством доминирующих факторов, определяющих поведение водителей (климатические факторы, освещенность и т.п.), и разнообразием психофизического состояния отдельных водителей.

В рассматриваемой транспортной системе водитель выполняет роль управляющего элемента. При этом под управлением кибернетика понимает не процесс принуждения (например, регулирование уличного движения), а процесс саморегулирования, широко распространенный в природе.

Работа любой кибернетической системы начинается с момента ввода в ее связи информации. В рассматриваемой транспортной системе основным источником информации для водителя служит дорога. Воспринимая органами чувств (в первую очередь – зрением) дорожную обстановку, водитель назначает определенный режим движения автомобиля. Сопоставляя затем характеристики этого режима и дорожной обстановки, водитель автомобиля получает дополнительную информацию о возможности безопасного проезда и в случае необходимости вносит коррективы в назначенный режим движения.

Теория информации – наука, изучающая количественные закономерности, связанные с получением, передачей, обработкой и хранением информации. Эта теория в настоящее время становится необходимым математическим аппаратом при изучении всевозможных процессов управления.

Под информацией вообще подразумевают различного рода данные, новости, сведения, знания, полученные путем изучения или наблюдения.

При этом обычно считают, что физическая система, и особенно система сложная, определена не полностью.

Так, в данном случае информация о системе «дорога – водитель – автомобиль» ограничивается знанием технических параметров дороги (уклонов, радиусов кривых и др.) и в общих чертах состояния и эксплуатационных характеристик автомобиля.

Информация же о действиях того или иного водителя в определенной дорожной обстановке, возникновении опасных ситуаций, техническом состоянии отдельных автомобилей транспортного потока и многом другом отсутствует.

Черты случайности, присущие процессам передачи информации, заставляют обратиться при изучении этих процессов к вероятностным методам.

Получение, обработка, передача и хранение различного рода информации – непереносимое условие работы системы ВАДС. В этом процессе всегда происходит передача информации от различных звеньев системы к водителю. Однако любая информация, для того чтобы быть переданной, должна быть соответствующим образом «закодирована», т.е. переведена на язык специальных символов и сигналов. Сигналами, передающими информацию, могут быть перемещение встречного или попутного автомобиля, свет фар, геометрические параметры дороги, дорожные знаки и т.д.

Одна из задач теории информации ставится следующим образом: имеется «передатчик» – источник информации (кривая в плане, дорожный знак, автомобиль) или дорожно-транспортная ситуация (ДТС) и «приемник» (водитель), к которому эта информация передается. Очевидно, что для решения подобных задач нужно, прежде всего, научиться измерять количественно объем передаваемой или хранимой информации и пропускную способность «приемника». По мнению профессора Лобанова Е.М. [3], оценить пропускную способность человека в настоящее время затруднительно в связи с отсутствием методики по определению этого показателя и сложностью учета индивидуальности каждого человека. Вторая причина, которая, по мнению ряда исследователей, препятствует использованию теории информации при решении проблемы человеческого фактора в дорожном движении, заключается в сложности определения объема информации, поступающей к нему. В связи со сложностью определения пропускной способности человека в работе применен подход, в котором вероятностную сущность водителя будем учитывать через риск возникновения дорожно-транспортного происшествия (ДТП) по причине несовершенства геометрических элементов дороги, а объем информации будем определять с учетом методики, разработанной в монографии [2] с выделением в качестве ценных сведений информации, связанной с безопасностью движения. Этот материал будет изложен после описания понятия энтропии. Используя в энтропии найденные по теории риска вероятности, будем выходить на риск потери информации водителем. Тем самым найдем решение проблемы использования теории информации при учете человеческого фактора в проектировании дорог и организации дорожного движения.

Любое сообщение, с которым мы имеем дело в теории информации, представляет собой совокупность сведений о некоторой физической системе. Например, на участке дороги имеется следующая дорожно-транспортная ситуация (ДТС): по ходу движения справа расположены 3 дорожных знака; в районе знаков на обочине находится пешеход с намерением перейти дорогу; непосредственно за знаками видимость дороги ограничена вершиной выпуклой кривой и т.д. Следовательно, водитель должен воспринять информацию на этих знаках, учесть намерение пешехода выйти на проезжую часть, зафиксировать в памяти информацию о недопустимом обгоне на участке с ограниченной видимостью. То есть компоненты, входящие в ДТС, являются компонентами физической системы и влияют на состояние водителя (человека).

Очевидно, если бы состояние физической системы было известно заранее, информация о состоянии этой системы не была бы настолько ценной (важной). Сообщение приобретает смысл только тогда, когда состояние системы заранее неизвестно, случайно. В нашем случае ДТС является вероятностным объектом и как вероятностный объект может находиться в различных состояниях. Количество информации должно соответствовать ДТС и до соответствующего эксперимента и (или) испытания является неопределенным. Степень этой неопределенности зависит от числа возможных состояний ДТС и вероятностей появления этих состояний, которые меняются под влиянием дорожной и транспортной составляющих. Дорожная составляющая меняется в пространстве, то есть при движении наблюдателя транспортная составляющая меняется не только в связи с движением наблюдателя, но и может изменяться независимо от того, движется наблюдатель или находится в покое. Поэтому описанная выше физическая система (ДТС) может оказаться в различных состояниях и иметь разную степень неопределенности. Очевидно, сведения, полученные о системе, будут тем ценнее и содержательнее, чем больше была неопределенность системы до получения этих сведений («априори»).

В качестве меры неопределенности состояния вероятностного объекта, включая ДТС, используется специальная характеристика – энтропия, предложенная К. Шенноном и другими авторами [1]. Под энтропией в теории информации понимается неопределенность, которая бывает при распознавании человеком того или иного предмета объективного мира в процессе опыта (в широком смысле слова).

На основе изложенного выше следует, что необходимым условием «превращения» неопределенной системы в определенную является поступление информации, причем количество информации должно быть равным по величине неопределенности (энтропии) системы. Поэтому информация количественно является величиной, как бы обратной энтропии, т. е. антиэнтропией.

Так, отсутствие у водителя полной уверенности в том, что в следующий момент движения появится заранее известный элемент либо создастся заранее известная обстановка, вносит неопределенность в его действия по управлению автомобилем, т. е. в этом случае имеет место явление энтропии.

Количество информации, которое может содержать любой элемент ДТС (например, дорожные условия), называют информационной емкостью этого элемента. Информационная емкость физической системы возрастает с числом различных состояний, в которые она может переводиться. Например, фрагмент дорожной обстановки, попавший в поле зрения водителя в любой момент движения, содержит значительное количество объектов, каждый из которых может оказаться любым элементом ландшафта, характерным для данного района. Следовательно, количество состояний элементов (объектов) дорожной обстановки будет выражаться чрезвычайно большим числом. Поэтому следует выделять из физической системы только ценную информацию, определенную с позиции теории безопасности движения.

В теории информации как разделе теории вероятности рассматривается только цифровая (дискретная) информация о состоянии вероятностных объектов, т.е. объектов, которые с определенной вероятностью могут находиться в различных состояниях [4].

Энтропия как мера неопределенности вероятностного объекта представляет собой величину, равную сумме произведений вероятностей p_i состояний объекта на логарифмы этих вероятностей $\log_2 p_i$, взятую со знаком минус:

$$H = -\sum_1^n p_i \times \log_2 p_i, \quad (1)$$

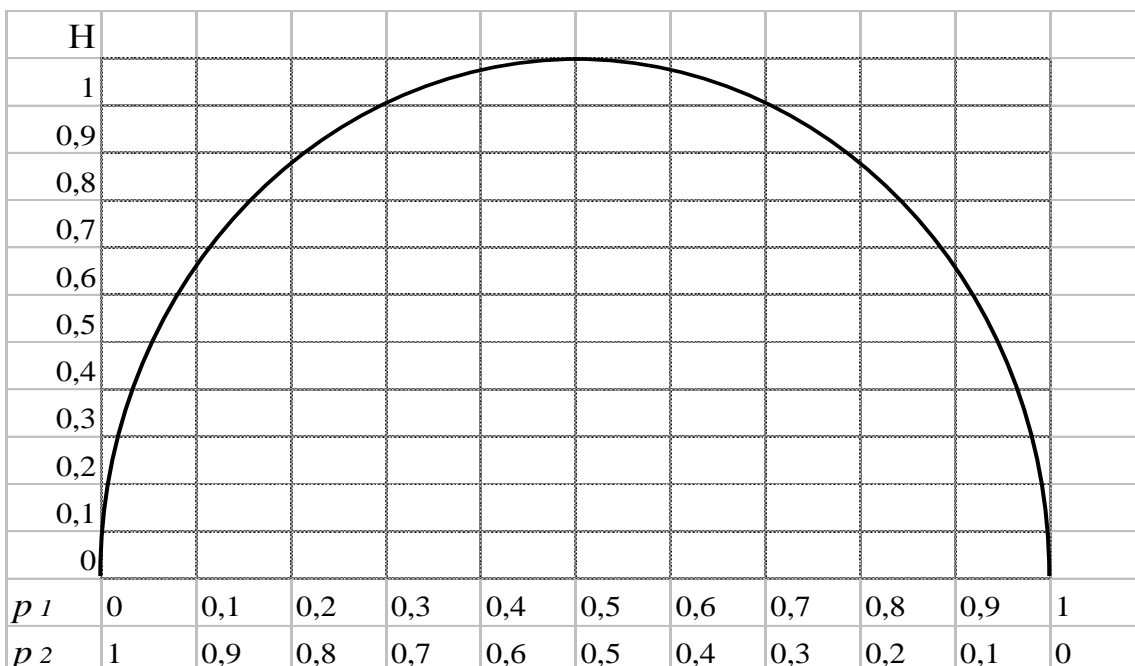
где n – общее число возможных состояний объекта; $\log_2 p_i$ – логарифм p_i по основанию «2».

Двоичный логарифм $\log_2 p_i$ связан с натуральным $\ln p_i$ и десятичным $\lg p_i$ логарифмическими соотношениями

$$\log_2 p_i = \ln p_i / \ln 2 = \lg p_i / \lg 2, \quad (2)$$

где $\ln 2 = 0,693147$; $\lg 2 = 0,30103$.

Рисунок отражает график изменения величины энтропии двух возможных значений.



Зависимость неопределенности (энтропии) дорожно-транспортной ситуации от реализуемых вероятностей p_1 и p_2 (при $p_1 = r_1$ и $p_2 = 1 - r_1$)

Каждому из n возможных состояний объекта соответствует определенное конкретное значение x_i некоторой дискретной случайной величины X . Например, в результате состоявшейся ДТС может произойти ДТП с вероятностью p_1 и не произойдет ДТП с вероятностью $1-p_1$. На рис. 1 показан график этой ситуации, рассчитанный по формуле (1). В граничных точках этого графика ситуация полностью определена, т.е. энтропия равна 0. Максимальная величина энтропии соответствует равновероятностному событию $p_1 = p_2 = 0,5$, так как по формуле (1) имеем

$$H = -(0,5 \log_2 0,5 + 0,5 \log_2 0,5) = 1.$$

В теории информации принимается, что количество информации, получаемое при полном выяснении состояния вероятностного объекта, равно энтропии этого объекта.

Энтропия обладает следующим свойством: она достигает максимального значения при равенстве вероятностей исходов ДТС (см. рисунок при $p_1 = p_2 = 0,5$).

Другими словами, при n событиях, имеющих равную вероятность ($p_1 = p_2 = \dots = p_i = p_n$), получаем

$$H_{\max} = \log_2 n. \quad (3)$$

Энтропия неравновероятностных событий равна сумме произведений вероятностей всех возможных состояний на их логарифмы с обратным знаком

$$H = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{ij} \log_2 P_{ij}. \quad (4)$$

На основе вышеприведенного информационную емкость «картины» находят по формуле

$$H_{\max} \cdot n = n \cdot \log_2 n = b, \quad (5)$$

где H_{\max} – наибольшая информационная емкость элемента; n – число элементов на «картине»; b – информационная емкость «картины», приходящаяся на 1 метр дороги, бит/м.

Среднюю информационную емкость «картины», приходящуюся на одну секунду, находят по формуле

$$B = b \cdot V, \quad (6)$$

где B – информационная емкость «картины» за 1 секунду, бит/м \times м/с = бит/с.

Уровень надёжности восприятия информации (вероятность безотказной работы водителя) можно определить по формуле

$$P = 1 - r, \quad (7)$$

где r – риск потери информации кратковременной памятью человека; P – уровень надёжности восприятия информации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гмурман В.Е. Руководство к решению задач по теории вероятностей и математической статистике: учеб. пособие для студентов вузов. 9-е изд., стер. М.: Высш. шк., 2004. 404 с.
2. Столяров В.В. Проектирование автомобильных дорог с учетом теории риска: в 2 ч. Саратов: СГТУ, 1994. Ч. 2. 232 с.
3. Лобанов Е.М. Проектирование дорог и организация движения с учетом психофизиологии водителя. М.: Транспорт, 1980. 311 с.

4. Яркин А.М., Щеголева Н.В. Влияние информации, поступающей к водителю во время движения, на скоростной режим // Ресурсо- и энергоэффективные технологии в строительном комплексе региона: сб. науч. тр. по материалам Междунар. науч.-практ. конф. Саратов: СГТУ, 2014. С. 470-472.

Щеголева Наталья Вячеславовна –
кандидат технических наук, доцент
кафедры «Транспортное строительство»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Natalia V. Shchegoleva –
Ph.D., Associate Professor
Department of Vehicle Buildment
Yuri Gagarin State Technical
University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.08.15, принята к опубликованию 10.11.15

ЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

**П.П. Говорухин, Е.Е. Миргородская, Н.П. Митяшин,
Л.Э. Рогинская, Ю.Б. Томашевский**

АНАЛИЗ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ КАЧЕСТВА ВЫХОДНОЙ КРИВОЙ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА К ТОЧНОСТИ РЕАЛИЗАЦИИ ЕЕ ПАРАМЕТРОВ

Описывается методика анализа чувствительности показателей качества электрической энергии, генерируемой многоуровневым инвертором напряжения, к нечеткости задания параметров его кривой. Методика основана на использовании нечетких чисел, принципа обобщения Заде и понятия нечеткой чувствительности. Приведены результаты расчета нечеткой чувствительности коэффициента искажения синусоидальности выходной кривой многоуровневого инвертора к нечеткости настройки моментов переключения и величины ее уровней.

Инвертор, выходное напряжение, качество электрической энергии, нечеткое число, чувствительность, принцип обобщения

**P.P. Govorukhin, E.E. Mirgorodskaya, N.P. Mityashin,
L.E. Roginskaya, Yu.B. Tomashevsky**

ANALYSIS OF QUALITY SENSITIVITY OF THE OUTPUT CURVE OF AN INVERTER VS. ACCURACY OF ITS PARAMETERS

The paper describes a method for analyzing sensitivity of quality parameters of the electric energy generated by a multi-level voltage inverter in relation to the fuzziness of the parameters of its curve. The given technique is based on the use of fuzzy numbers, the principle of Zadeh generalization, and idea of fuzzy sensitivity. The results of fuzzy sensitivity estimates of the harmonic distortion factor in the output curve of a multi-level inverter to fuzziness in setting switching times and value of its levels are presented.

Inverter, output voltage, power quality, fuzzy number, sensitivity, principle of generalization

Постановка задачи

В последние десятилетия в схемотехнике силовой электроники с целью улучшения качества выходной кривой стали применяться автономные инверторы напряжения (АИН) с многоуровневым формированием напряжения. В таких АИН качество выходной кривой определяется значениями параметрами ее задания, а именно числом уровней напряжения, их величинами и моментами перехода от одних уровней к следующим. Для каждого числа уровней существуют оптимальные значения величин уровней и моментов их коммутаций, обеспечивающие наименьший коэффициент искажения синусоидальности K_u .

В реальной схеме преобразователя оптимальные значения величин уровней и моментов коммутаций могут задаваться с некоторой погрешностью. Представляет интерес исследования чувствительности величины коэффициента K_u к неизбежным отклонениям основных параметров кривой от их номинальных значений, обеспечивающих требуемое функционирование комплексов.

Методика исследования

В работе предлагается задавать параметры кривой в виде нечетких чисел (НЧ) [1]. При этом значения неопределенных параметров отображаются степенью размытости соответствующих НЧ.

Математические операции с НЧ осуществляются с использованием принципа обобщения Заде [3]. В случае если один или несколько параметров модели исследуемого комплекса представлены в виде НЧ, непосредственное применение этих операций при реализации модели приводило бы к весьма громоздким вычислениям. Из-за отсутствия аналитической модели комплекса, которая часто задается алгоритмически, т. е. существует в виде компьютерной программы, оперирующей с четко заданными значениями параметров, это вовсе невозможно. Поэтому предлагается прямое применение принципа обобщения, при котором алгоритм рассматривается как обобщенная математическая операция [4].

В этом случае принцип обобщения имеет следующую интерпретацию.

Пусть $(\tilde{x}_1, \dots, \tilde{x}_n)$ – совокупность НЧ, соответствующих неопределенным параметрам комплекса, а $(\mu(\tilde{x}_1), \dots, \mu(\tilde{x}_n))$ – их функции принадлежности.

Рассмотрим некоторый показатель y , характеризующий качество функционирования комплекса. Очевидно, этот показатель в рассматриваемом случае также должен быть представлен в виде НЧ \tilde{y} . Если бы параметры x_1, x_2, \dots, x_n имели четкие значения, то показатель y также имел бы четкое значение, которое могло быть рассчитано с помощью оператора S

$$y = S(x_1, x_2, \dots, x_n). \quad (1)$$

Оператор S может быть задан в простейшем случае в аналитической форме, но для сложных комплексов чаще реализуется в виде компьютерной программы.

Принцип обобщения позволяет рассчитать функцию принадлежности этого НЧ $\mu(y)$ по формуле [3]

$$\mu(y) = \max_{\substack{(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ S(x_1, x_2, \dots, x_n) = y}} \min(\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)). \quad (2)$$

Здесь максимум берется по всем наборам (x_1, x_2, \dots, x_n) , для которых $S(x_1, x_2, \dots, x_n) = y$ по известным четким значениям параметров x_1, x_2, \dots, x_n .

Поскольку мы предполагаем, что оператор S задан в виде компьютерной программы, для ее применения необходимо дискретизировать значения параметров x_1, x_2, \dots, x_n и показателя y .

Обозначим через $\text{supp}(\tilde{x}_i)$ множество значений параметра x_i , для которых его функция принадлежности отлична от нуля (т.е. носитель НЧ \tilde{x}_i [4]). Для треугольных НЧ носитель представляет собой некоторый интервал Δ_i на оси x_i [5]. Дискретизация значений x_i сводится к разделению интервала Δ_i на непересекающиеся достаточно малые подынтервалы Δ_i^j такие, что

$$\Delta_i = \bigcup_{j=1}^{N_i} \Delta_i^j \quad (3)$$

и значения функции $\mu_i(x_i)$ на них можно считать постоянными.

Особенностью дискретизации показателя y состоит в том, что носитель нечеткого числа \tilde{y} заранее точно неизвестен. Однако можно использовать его верхнюю оценку, т.е. интервал, заведомо содержащий носитель \tilde{y} .

Пусть δ – такой интервал, а δ_k – подынтервал его разбиения, т.е.

$$\delta = \bigcup_{j=1}^{N_i} \delta^j. \quad (4)$$

причем искомые значения функции принадлежности $\mu(y)$ НЧ \tilde{y} на интервале δ_k считаем постоянными и равными v_k .

Тогда формула (2) для дискретизированных значений будет иметь вид

$$v_k = \max_{\substack{(x_1, x_2, \dots, x_n) \\ S(x_1, x_2, \dots, x_n) \in \delta_k}} \min(\mu(x_1), \mu(x_2), \dots, \mu(x_n)). \quad (5)$$

Формула (5) позволяет рассчитать функцию принадлежности нечеткого параметра \tilde{y} по известным функциям принадлежности параметров \tilde{x}_i . Эта функция $\mu(y)$ содержит информацию о возможных значениях отклонения показателя y от номинального значения y_0 . Из формулы (5) следует, что функция $\mu(y)$ достигает максимума на этом значении y_0 .

В качестве примера рассмотрим влияние нечеткого задания углов переключения уровней и величин этих уровней кривой выходного напряжения пятиуровневого инвертора [2] на коэффициент искажения синусоидальности K_u . При оптимальных значениях углов переключения и величинах уровней напряжения коэффициент K_u имеет значение 7,62%. В случае нечеткого задания, например, угла включения четвертого уровня θ_4 коэффициент K_u также оказывается нечетким.

Нечеткость включения углов θ_i зададим в виде треугольных нечетких чисел (рис. 1).

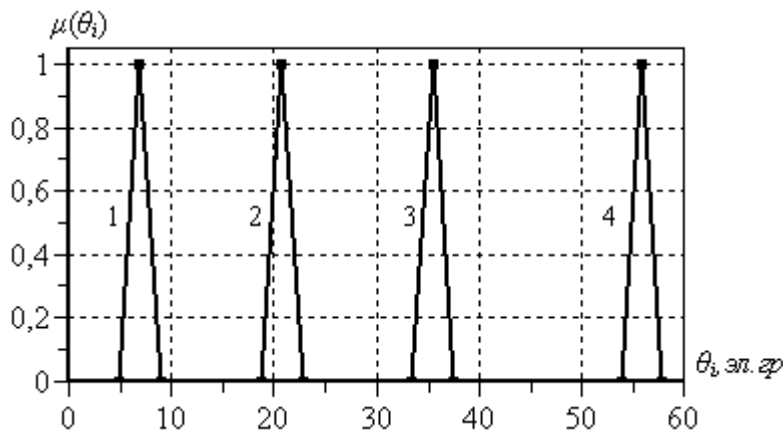


Рис. 1. Функции принадлежности треугольных НЧ, отображающих возможные значения углов θ_1 (1), θ_2 (2), θ_3 (3), θ_4 (4)

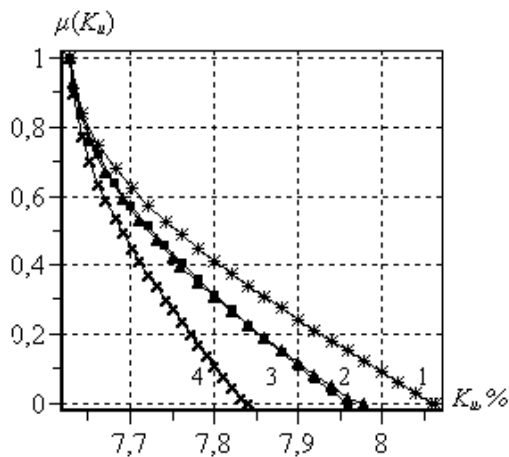


Рис. 2. Функции принадлежности коэффициента искажения синусоидальности $\mu_{\theta_1}(K_u)$, $\mu_{\theta_2}(K_u)$, $\mu_{\theta_3}(K_u)$, $\mu_{\theta_4}(K_u)$, соответствующие функциям принадлежности углов переключения θ_1 , θ_2 , θ_3 , θ_4 (рис. 1)

Расчеты по описанной выше методике в предположении четкого оптимального задания всех остальных параметров кривой приводит к функциям принадлежности $\mu_{\theta_1}(K_u)$, $\mu_{\theta_2}(K_u)$, $\mu_{\theta_3}(K_u)$, $\mu_{\theta_4}(K_u)$, приведенные на рис. 2.

Сравнение кривых $\mu_{\theta_i}(K_u)$ свидетельствует о различной чувствительности показателя K_u к неопределенности задания угла переключения различных уровней. В этой связи целесообразным яв-

ляется введение количественных характеристик чувствительности показателей качества функционирования комплексов к нечеткости задания их параметров.

Для этого полезным является понятие уровня или среза нечеткого множества.

Как известно [5], λ -срезом нечеткого множества A называется множество A_λ , у которого функция принадлежности μ_{A_λ} связана с функцией принадлежности μ_A множества A следующим образом

$$\mu_{A_\lambda}(x) = \begin{cases} 1, & \text{если } \mu_A(x) \geq \lambda \\ 0, & \text{если } \mu_A(x) < \lambda \end{cases} \quad (6)$$

Здесь $0 < \lambda \leq 1$.

Величина λ характеризует требование исследователя к величине степени принадлежности значения x к рассматриваемому нечеткому множеству A . Очевидно, A_λ является четким множеством, причем для нечетких множеств A с односвязным носителем A_λ есть интервал. При этом длина интервала A_λ , которую будем обозначать как $m(A_\lambda)$, характеризует степень «размытости» множества A при данной степени требования λ к четкости задания переменных.

Если показатель \tilde{y} является функцией нечетко заданного параметра \tilde{x} , то можно рассчитать отношение

$$D_x^y(\lambda) = \frac{m(y_\lambda)}{m(x_\lambda)}. \quad (7)$$

Величина $D_x^y(\lambda)$ может рассматриваться как нечеткий аналог производной, поскольку характеризует степень «расширения» интервала неопределенности $m(y_\lambda)$ нечеткой переменной \tilde{y} , являющейся функцией нечеткой переменной \tilde{x} , по отношению к интервалу неопределенности $m(x_\lambda)$. Величина D_x^y является функцией уровня λ , т.е. зависит от степени требования к четкости задания переменных.

Недостатком величины D_x^y с точки зрения оценки чувствительности показателя y к неопределенности задания параметра x заключается в том, что меры λ -уровней $m(x_\lambda)$ и $m(y_\lambda)$ не соотнесены к точным значениям y_0 и x_0 , для которых соответствующие функции принадлежности равны 1. Целесообразно оценить степень неопределенности задания этих НЧ безразмерными отношениями $m(y_\lambda)/y_0$ и $m(x_\lambda)/x_0$.

Тогда чувствительность показателя \tilde{y} к нечеткости задания параметра \tilde{x} может быть оценена величиной

$$\Xi_x^y(\lambda) = \frac{m(y_\lambda)/y_0}{m(x_\lambda)/x_0} = D_x^y(\lambda) \cdot \frac{x_0}{y_0}. \quad (8)$$

Эту функцию уровня можно рассматривать как нечеткий аналог классической чувствительности, задаваемой известной формулой [6]:

$$\Xi_x^y = \frac{d \ln(y)}{d \ln(x)} = \frac{dy/y}{dx/x} = \frac{y'(x) x}{y}. \quad (9)$$

Результаты расчетов нечеткой чувствительности

Результаты расчетов, проведенных по формулам (5) и (8) для определения чувствительности качества кривой выходного напряжения к точности задания углов переключения $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ пяти-уровневого инвертора напряжения, задаваемого функциями принадлежности соответствующих НЧ по рис. 1, приведены на рис. 3 а.

Знание, например, функции $\Xi_{\theta_2}^{K_u}(\lambda)$ позволяет определить допустимую величину интервала λ разброса угла θ_2 переключения второго уровня, при котором величина интервала отклонения значения K_u от оптимального значения не превысит произведения $\lambda \cdot \Xi_{\theta_2}^{K_u}(\lambda)$.

Очевидно, что функция $\Xi_x^y(\lambda)$ не является функцией принадлежности НЧ. Вместо нее можно рассмотреть обратную функцию $\mu(\Sigma)$, которая является функцией принадлежности НЧ Ξ_x^y , содержащего ту же информацию, что и функция $\Xi_x^y(\lambda)$. Это НЧ можно назвать НЧ-чувствительностью показателя y к нечеткости задания параметра x . Функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\Xi_{\theta_i}^{K_u}$, соответствующие функциям $\Xi_{\theta_i}^{K_u}(\lambda)$, приведены на рис. 3 б.

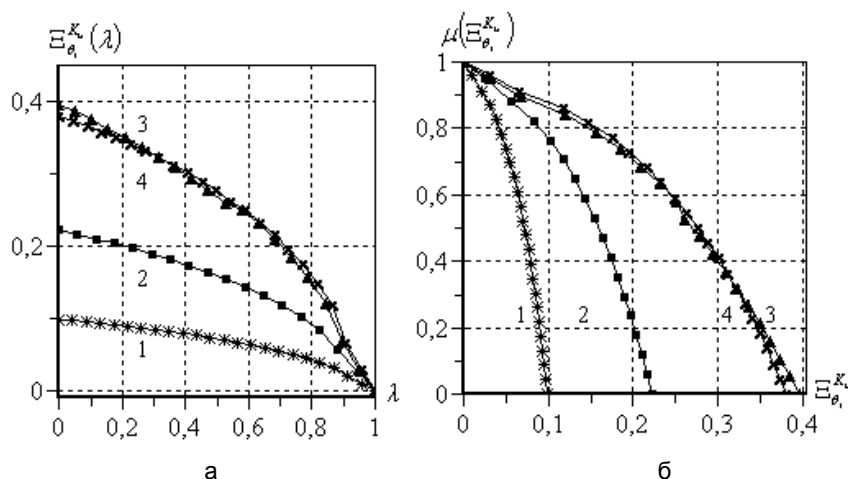


Рис. 3. Нечеткие чувствительности $\Xi_{\theta_i}^{K_u}(\lambda)$ (а) и функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\Xi_{\theta_i}^{K_u}$ (б) коэффициента искажения синусоидальности K_u , соответствующие функциям принадлежности углов переключения θ_i

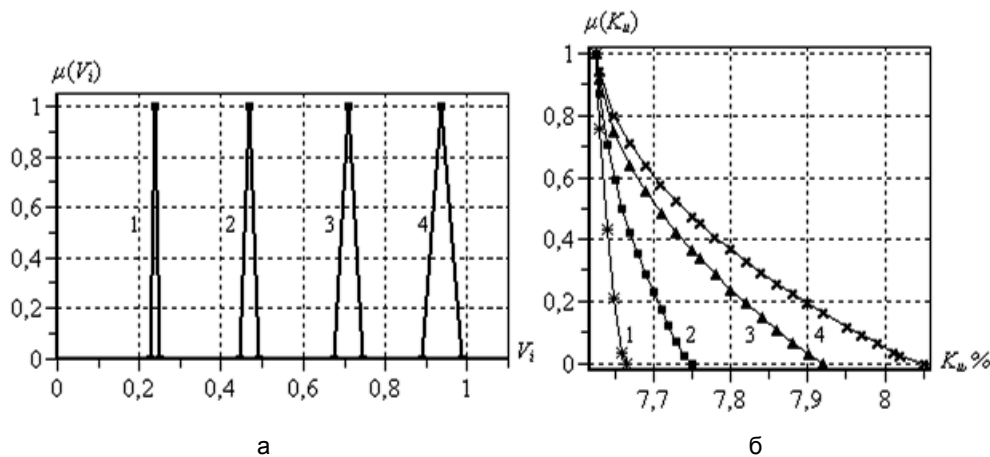


Рис. 4. Функции принадлежности треугольных НЧ (а), отображающих возможные значения уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$, и функции принадлежности коэффициента искажения синусоидальности K_u (б), соответствующие функциям принадлежности уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$

Были проведены аналогичные исследования влияния нечеткости задания значений уровней напряжения выходной кривой на коэффициент искажения синусоидальности K_u .

На рис. 4 а показаны функции принадлежности треугольных НЧ $\mu(\tilde{V}_i)$, $i=1,2,3,4$, отображающие возможные значения относительных значений уровней напряжения V_i , $i = 1, 2, 3, 4$, причем за базовое значение взято напряжение пятого уровня, т.е. амплитуда напряжения. При задании функций принадлежности предполагается, что стабилизация напряжений уровней производится с 5%-й точностью, а их значения на оптимальных значениях напряжений равны 1.

Расчеты по описанной выше методике в предположении четкого оптимального задания всех остальных параметров кривой приводят к функции принадлежности $\mu_{V_i}(K_u)$, приведенной на рис. 4 б.

Результаты расчетов, проведенных по формулам (5) и (8) для определения чувствительности качества кривой выходного напряжения к точности задания уровней напряжения U_2 и U_4 пятиуровневого инвертора напряжения, задаваемого функциями принадлежности соответствующих НЧ по рис. 1, приведены на рис. 5.

Знание, например, функции $\Xi_2^{K_u}(\lambda)$ позволяет определить допустимую величину интервала λ разброса уровня напряжения U_2 , при котором величина интервала отклонения значения K_u от оптимального значения не превысит произведения $\lambda \cdot \Xi_2^{K_u}(\lambda)$.

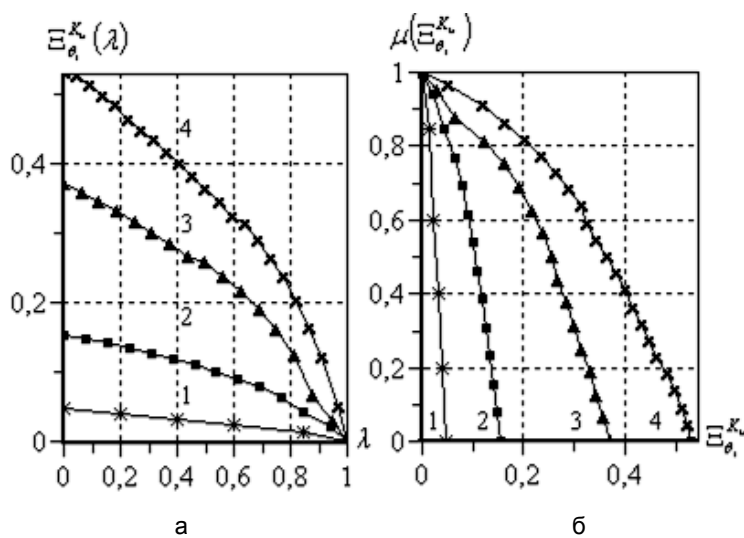


Рис. 5. Нечеткие чувствительности $\Xi_{V_i}^{K_u}(\lambda)$ (а) и функции принадлежности НЧ-чувствительностей $\mu(\Sigma)$ (б) коэффициента искажения синусоидальности K_u , соответствующие функциям принадлежности уровней напряжения U_2 и U_4

Выводы

Описывается методика оценки чувствительности показателей качества функционирования инвертора к нечеткой настройке параметров силовой схемы преобразователя и системы управления. Методика иллюстрируется результатами исследования влияния нечеткости установления углов переключения транзисторов в пятиуровневом инверторе на качество кривой выходного напряжения.

Рассмотренная методика оценки чувствительности показателей качества функционирования инвертора, к нечеткой настройке параметров силовой схемы преобразователя и системы управления может быть распространена на изучение электротехнических систем любой сложности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Dubois D., Prade H. Operations on fuzzy numbers // Int. J. Syst. Sci. 1978. Vol. 9. № 6. P. 613-626.
2. Calais M., Vaasilios G.A., Dymond M.S. When to Switch Which Switch in a Five Level Single Phase Cascaded Inverter. URL: http://www.researchgate.net/profile/Vassilios_Agelidis/publication/228608572_When_to_Switch_Which_Switch_in_a_Five_Level_Single_Phase_Cascaded_Inverter/links/0c96053887160e0ca4000000.pdf (дата обращения: 04.10.2015).
3. Zadeh L.A. Basis for a new approach to the analysis of complex systems and decision making // Math today. M.: Knowledge, 1974. P. 5-49.
4. Митяшин Н.П., Томашевский Ю.Б. Оценка влияния малых неопределенных параметров на характеристики агрегированного преобразователя // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2003. № 11-12. С. 96-106.

5. Нечеткие множества в моделях управления и искусственного интеллекта / под ред. Д.А. Поспелова. М.: Наука, гл. ред. физ.-мат. лит., 1986. 321 с.

6. Справочник по теории автоматического управления / под ред. А.А. Красовского. М.: Наука, 1987. 712 с.

Говорухин Павел Павлович –
аспирант кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Pavel P. Govorukhin –
Postgraduate
Department of Systems Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Миргородская Екатерина Евгеньевна –
кандидат технических наук,
доцент кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina E. Mirgorodskaya –
Ph.D., Associate Professor
Department of Systems Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Митяшин Никита Петрович –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita P. Mityashin –
Dr. Sc., Professor
Department of Systems Engineering
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Рогинская Любовь Эммануиловна –
доктор технических наук,
профессор кафедры «Электромеханика»
Уфимского государственного авиационного
технического университета

Lubov E. Roginskaya –
Dr. Sc., Professor
Department of Electromechanics
Ufa State Aviation Technical University

Томашевский Юрий Болеславович –
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Системотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Yuri B. Tomashevsky –
Dr. Sc., Professor,
Head of Department System engineering
Yuri Gagarin State Technical University

Статья поступила в редакцию 10.04.15, принята к опубликованию 15.11.15

УДК 536.3:66.041:621.18

О.Ю. Кулешов, Е.И. Муслимов, В.М. Седелкин

**УТОЧНЕНИЕ ЗОНАЛЬНОГО МЕТОДА И МОДЕЛИ
РАДИАЦИОННЫХ СВОЙСТВ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ
ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ РАСЧЕТОВ ОГNETEХНИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**

Предложены модификации зонального метода и модели радиационных свойств продуктов сгорания, используемые в расчетах теплообмена в огнетехнических установках, таких как промышленные печи и котлы. Их отличительными особенностями являются отказ от приближения оптически тонкой среды для объемных зон расчетной области и корректировка параметров модели спектра излучения продуктов сгорания по экспериментальным значениям интегральной степени черноты однородных газов.

Огнетехнические установки, теплообмен, зональный метод, продукты сгорания, радиационные свойства, модель спектра излучения

O.Yu. Kuleshov, E.I. Muslimov, V.M. Sedelkin

**REFINEMENT OF ZONING METHOD AND MODELS
OF RADIATIVE PROPERTIES OF COMBUSTION PRODUCTS
FOR HEAT CALCULATION IN FIRE-ENGINEERING UNITS**

Modifications of the zoning method and models of radiative properties of combustion products, used for heat transfer calculations in fire-engineering units, such as industrial furnaces and boilers, are proposed. They are based on cancellation from the optically thin medium approximation for the volume zones of the calculation area, and correction of radiation characteristics of combustion products by the empirical values of total emissivity of uniform gases.

Fire-engineering units, heat transfer, zoning method, combustion products, radiative properties, radiation spectrum model

Прикладной зональный метод является классическим численным методом расчета сложного теплообмена в топках огнетехнических установок, таких как промышленные печи и котельные агрегаты. В современных своих вариантах зональный метод в сочетании с вероятностно-статистическим моделированием излучения имеет определенные преимущества перед другими численными методами расчета. Современная теория зонального метода развита в работах в основном российских ученых, которые обобщены в монографиях и обзорных статьях [1-3] и др.

Зональный метод расчета сложного теплообмена в печах и котельных агрегатах основан на разбиении расчетной области на однородные объемные и поверхностные зоны (в соответствии с особенностями топочных процессов) и записи системы нелинейных алгебраических уравнений зональных тепловых балансов, коэффициенты в которых учитывают механизмы теплопереноса на основе моделирования соответствующих процессов.

Описание лучистого переноса в зональном методе (в топках печей и котлов – это до 95% от суммарного теплообмена) основано на методологии оптико-геометрических характеристик в излучающе-поглощающей среде, главные из которых – обобщенные угловые коэффициенты излучения.

Классический зональный метод использует ряд упрощающих положений, которые несколько ограничивают область его применения для расчетов реальных огнетехнических установок и снижают точность решений, а именно приближение оптически тонкой среды, что корректно только для небольших размеров объемных зон с малой оптической толщиной, и упрощенные модели спектра излучения газов (продуктов сгорания).

В силу специфики определения оптико-геометрических характеристик излучения зональный метод использует спектральные модели широких прямоугольных полос с фиксированной шириной в интервалах длин волн излучения газообразных продуктов сгорания [1]. Эффективные средние коэффициенты поглощения для прямоугольных полос зависят от параметров среды и косвенно учитывают эффекты изменения характеристик полос реального спектра излучения продуктов сгорания. Тем не менее в отсутствие точного описания механизмов излучения в спектральных полосах необходимо корректировать параметры модели спектра в соответствии с экспериментальными интегральными степенями черноты компонентов продуктов сгорания, являющимися легко определяемыми и наиболее достоверными.

Таким образом, уточнение зонального метода в части повышения его физической обоснованности и корректности используемых выражений для расчетов реальных огнетехнических установок является весьма актуальной задачей.

Рассмотрим постановку задачи теплопереноса в рамках зонального метода.

Система уравнений тепловых балансов зон расчетной области в общем виде записывается как

$$\sum_{i=1}^N P_{ij} T_i^4 + \sum_{i=1}^M \Omega_{ij} T_i + C_j = 0, \quad j = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

где N – общее число зон в расчетной области (зональной геометрической модели топочной камеры); M – число зон, непосредственно контактирующих с j -й зоной; T_i – абсолютная температура i -й зоны; P_{ij} – коэффициенты радиационного обмена между зонами i и j ; Ω_{ij} – коэффициент конвективно-турбулентного

обмена между зонами i и j ; $C_j = f(Q_j)$ – свободный член уравнения, включающий внутренний тепловой источник (сток) в j -й зоне; i, j -зоны – источник и приемник теплоты, соответственно.

Обычно при расчете реальных огнетехнических установок (печей и котлов) используется смешанная постановка задачи, когда на одной части граничных поверхностных зон задается температура (например, на экранных поверхностях нагрева), а на другой – тепловой поток (например, через ограждения топки).

Для описания лучистого переноса в данной работе используется резольвентный зональный подход, основанный на последовательном определении оптико-геометрических характеристик излучения, которые являются коэффициентами излучения с зоны i на зону j : 1) спектральные первичные обобщенные угловые коэффициенты (ОУК) ψ_{ij} , которые учитывают только поглощение (ослабление) разделяющей среды и в многозонной расчетной области (в общем случае трехмерной) вычисляются с использованием метода статистических испытаний Монте-Карло; 2) спектральные разрешающие обобщенные угловые коэффициенты (РОУК) Ψ_{ij} , которые дополнительно учитывают многократное диффузное отражение и изотропное рассеяние излучения в системе и вычисляются на базе ОУК путем решения системы зональных уравнений баланса лучистой энергии; 3) интегральные по спектру коэффициенты радиационного обмена (КРО) P_{ij} , которые вычисляются на базе спектральных РОУК путем суммирования по полосам спектра и включают дополнительные переменные из известного выражения для поглощенного лучистого потока.

Выражение для КРО в уравнениях (1) имеет вид

$$P_{ij} = \begin{cases} 4V_i \sigma_0 \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \chi_{i,k} \Psi_{ij,k}^*, & i \in [1, N']; \\ \varepsilon_i F_i \sigma_0 \sum_{k=0}^Z b_{i,k} \Psi_{ij,k}^*, & i \in [N'+1, N]; \end{cases} \quad (2)$$

где N' – число объемных зон в расчетной области; $(N-N')$ – число поверхностных зон в расчетной области; F_i – площадь поверхностной зоны; V_i – объем газовой зоны; σ_0 – постоянная Стефана-Больцмана; Z – число рассматриваемых полос спектра излучения газов; $b_{i,k}$ – доля излучения абсолютно черного тела в k -й полосе спектра при температуре i -й зоны; $\chi_{i,k}$ – коэффициент поглощения газов в k -й полосе спектра для i -й зоны; ε_i – степень черноты i -й поверхностной зоны – источника излучения; $\Psi_{ij,k}^*$ – приведенные РОУК между зонами i и j в k -й полосе спектра, $\Psi_{ij,k}^* = \Psi_{ij,k}$ при $j \in [1, N']$, $\Psi_{ij,k}^* = \varepsilon_j \Psi_{ij,k}$ при $j \in [N'+1, N]$; ε_j – степень черноты j -й поверхностной зоны – приемника излучения.

Степень черноты (излучательная способность) объемных (газовых) зон в общем случае определяется по закону Бугера

$$\varepsilon_i^{об} = 1 - \exp(-l_i \chi_i), \quad (3)$$

где l_i – длина пути излучения в зоне i ; $(l\chi)_i$ – оптическая толщина газового слоя.

Однако в рамках классического зонального метода в выражении (2) эта величина записывается в приближении оптически тонкой среды [1].

Для повышения точности и универсальности математического описания без изменения методологии зонального подхода введем поправочный коэффициент для степени черноты объемных зон $K_{\varepsilon,i}$, учитывающий ее нелинейность:

$$\varepsilon_i^{об} = l_i \chi_i K_{\varepsilon,i} = 4 \frac{V_i}{F_i^{об}} \chi_i K_{\varepsilon,i}, \quad (4)$$

где $l_i = 4V_i / F_i^{об}$ – среднегеометрическая длина пути луча в объемной i -й зоне; V_i и $F_i^{об}$ – объем зоны и площадь ограничивающих плоскостей для газовой зоны i , соответственно; $K_{\varepsilon,i}$ – поправочный коэффициент для степени черноты объемной зоны i .

При этом поправочный коэффициент для степени черноты может быть как спектральной величиной (для отдельной k -й полосы спектра) $K_{\varepsilon,i,k}$, так и интегральной по спектру величиной $K_{\varepsilon,i}$.

Тогда выражение КРО для объемных зон-источников можно записать с учетом (2) и (4) в виде

$$P_{ij} = \frac{4V_i}{F_i^{ob}} \sigma_0 \sum_{k=0}^Z \chi_{i,k} K_{\varepsilon,i,k} b_{i,k} \Psi_{ij,k}^* F_i^{ob}, i \in [1, N']. \quad (5)$$

Коэффициент КРО для зоны-источника i и зоны-приемника j представляет собой сумму (по полосам спектра) произведений РОУК в k -й полосе $b_{i,k} \Psi_{ij,k}$ и соответствующей спектральной степени черноты $\varepsilon_{i,k}$ газового объема для объемной зоны-источника. Таким образом, КРО для объемной зоны-источника (5) включают излучательную способность среды, а также поглощательную способность (опосредованно через РОУК) с учетом спектра излучения.

Поправочный коэффициент $K_{\varepsilon,i}$ в (4), (5) определим, аппроксимируя экспоненциальное выражение для степени черноты i -й объемной зоны (3) степенным выражением

$$\varepsilon_i^{ob} \approx \frac{C(l_i \chi_i)^n}{1 + C(l_i \chi_i)^n}, \quad (6)$$

где $C = 1,717$; $n = 1,3$; индексы спектральных величин опущены для простоты записи.

Приближенное выражение (6) аппроксимирует исходное выражение (3) с высокой точностью (погрешность менее 3%) в интервале значений $l_i \chi_i = [0, 1]$, который соответствует возможным значениям оптической толщины объемных зон геометрических моделей различных огнетехнических установок.

Преобразуем выражение (6) к виду

$$\varepsilon_i^{ob} \approx l_i \chi_i \cdot \frac{(l_i \chi_i)^{n-1}}{C_1 + (l_i \chi_i)^n}. \quad (7)$$

Сравнивая (7) с (4), получим выражение для поправочного коэффициента

$$K_{\varepsilon,i} = \frac{(l_i \chi_i)^{n-1}}{C_1 + (l_i \chi_i)^n} = \frac{(l_i \chi_i)^{0,3}}{0,582 + (l_i \chi_i)^{1,3}}. \quad (8)$$

Для корректировки параметров спектральной модели по экспериментальным интегральным степеням черноты объемных зон проведем дальнейшие преобразования выражения (5) для КРО. Для этого введем в него относительные величины спектральных и интегральных характеристик излучения.

Умножим и разделим правую часть уравнения (5) на комплекс $\bar{\chi}_i K_{\varepsilon,i}$, где $\bar{\chi}_i = \sum_{i=0}^Z b_{i,k} \chi_{i,k}$ – средний коэффициент поглощения среды в ИК-области спектра. С учетом (4) в результате преобразований выражение (5) примет вид

$$P_{ij} = \sigma_0 \varepsilon_i^{ob} \sum_{k=0}^Z \delta(\chi_{i,k}) \delta(K_{\varepsilon,i,k}) b_{i,k} \Psi_{ij,k}^* F_i^{ob}, i = [1, N'], \quad (9)$$

где ε_i^{ob} – интегральная по спектру степень черноты i -й объемной зоны, которую будем принимать по экспериментальным данным для соответствующего однородного слоя ε_i^{ca} продуктов сгорания, $\varepsilon_i^{ob} = \varepsilon_i^{ca} f(l_i/1,8)$; $\delta(\chi_{i,k}) = \chi_{i,k} / \bar{\chi}_i$ – относительный коэффициент поглощения в k -й полосе спектра, причем $0 < \delta(\chi_{i,k}) < 1$, $\sum_{k=0}^Z \delta(\chi_{i,k}) b_{i,k} = 1$; $\delta(K_{\varepsilon,i,k}) = K_{\varepsilon,i,k} / K_{\varepsilon,i}$ – относительный поправочный коэффициент для степени черноты, который вычисляется для каждой спектральной полосы при средней длине излучения в i -й зоне.

Выражение (9) для коэффициентов КРО объемной зоны-источника, являющихся окончательными оптико-геометрическими характеристиками зонального метода, записано с учетом корректировки спектральной модели излучения по интегральной степени черноты газового объема, определенной на основе экспериментальных данных.

На основании сравнения выражений (5) и (9) можно записать уточненную спектральную степень черноты (излучательную способность) среды в k -й полосе спектра для условий в i -й объемной зоне:

$$\varepsilon_{i,k}^{ob} = \varepsilon_i^{ob} \delta(\chi_{i,k}) \delta(K_{\varepsilon,i,k}). \quad (10)$$

Для расчета поглотительной способности среды найдем значения уточненных спектральных коэффициентов поглощения в полосах спектра, для чего приравняем правые части выражений (3) и (10)

$$1 - \exp(-\chi_{i,k} l_i) = \varepsilon_i^{ob} \delta(\chi_{i,k}) \delta(K_{\varepsilon,i,k}),$$

откуда получим

$$\chi_{i,k} = -\ln \left[1 - \varepsilon_i^{ob} \delta(\chi_{i,k}) \delta(K_{\varepsilon,i,k}) \right] / l_i, \quad (11)$$

где l_i – среднегеометрическая длина пути луча в i -й объемной зоне.

Выражение (11) может быть использовано для корректировки абсолютных значений спектральных коэффициентов поглощения газовой среды на основании эмпирических данных по интегральной степени черноты газового объема.

В общем случае газообразных продуктов сгорания с частицами сажи коэффициент поглощения вычисляется как сумма соответствующих коэффициентов:

$$\chi = \chi_g + \chi_c.$$

Интегральную по спектру степень черноты объемных зон, заполненных газообразными продуктами сгорания и частицами, можно записать с учетом их взаимного влияния:

$$\varepsilon_i^{ob} = 1 - (1 - \varepsilon_g)(1 - \varepsilon_c),$$

где ε_g – степень черноты изотермического объема газообразных продуктов сгорания; ε_c – степень черноты объема равномерно распределенных частиц с определенной концентрацией.

По спектральным коэффициентам поглощения и интегральным степеням черноты газообразной и дисперсной фаз продуктов сгорания имеются обширные экспериментальные данные, которые обобщены в виде аналитических зависимостей от состава и параметров среды и приведены в [1, 4-7]. Эти зависимости могут быть использованы для настройки эффективной спектральной модели излучения продуктов сгорания в топочных многозонных системах.

Предложенная уточненная математическая модель и методика расчета теплообмена и радиационных свойств продуктов сгорания в многозонных системах апробирована на примере экспериментальной экранированной топочной камеры трубчатой печи, по которой имеются подробные опытные данные [7].

Конструктивная схема топочной камеры представлена на рис. 1. Размеры поперечного сечения

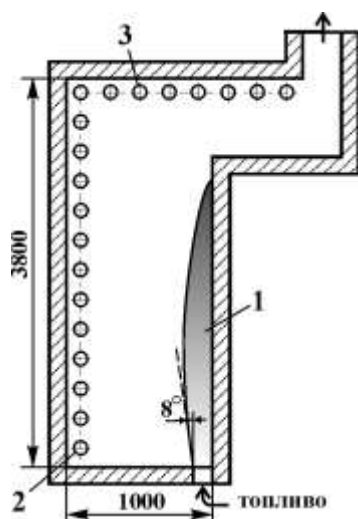


Рис 1. Схема топочной камеры:
1 – настильный факел;
2, 3 – фронтальный и сводовый экраны

топки 1×1 м. На фронтальной стене и на своде расположены трубные экраны, в эксперименте используемые как водяные калориметры. В качестве топлива использовался природный газ, сжигаемый в настильном диффузионном светящемся факеле. Сжигание газа осуществляется с помощью подошелевой горелки, расположенной по всей ширине настильной стенки и дающей плоский факел.

Исходные данные для моделирования теплообмена приняты для следующего режима работы: нагрузка по введенному теплу $B_m \times Q_p = 483$ кВт; коэффициент избытка воздуха в топке $\alpha_m = 1,09$; средняя температура поверхности нагрева $T_{n.n.} = 303$ К.

Трехмерная зональная расчетная область представляла собой $1/2$ топочной камеры (по глубине расчетной области) и состояла из 70 зон, из которых 11 – зоны поверхности нагрева. В плоскости симметрии располагалась зеркальная поверхность.

В качестве базовой была принята девятиполосная модель спектра излучения газообразных продуктов сгорания с прямоугольным контуром полос [1]. Для определения интегральных по спектру экспериментальных значений степеней черноты однородных слоев компонентов продуктов сгорания использовались аппроксимации [1, 7].

При диффузионном сжигании газа в настильном факеле возникают условия для пиролиза углеводородов с образованием сажи. Частицы сажи активно испускают и поглощают излучение в сплошном спектре (но в зависимости от длины волны), поэтому излучательная и поглощательная способности светящегося газового факела значительно выше, чем у несветящегося. Рассеянием излучения на частицах сажи можно пренебречь в связи с их малыми размерами по сравнению с длиной волны падающего излучения.

Концентрация, интегральные по спектру коэффициент поглощения и степень черноты частиц сажи в газовом факеле рассчитывались по полуэмпирическим соотношениям в зависимости от характеристик факельного горения [7]. Усредненная ширина негорящего ядра факела, где концентрируется сажа, принималась равной $\delta = 0,2$ м. Средняя длина пути луча в плоском слое при этом составляет $l = 1,8 \cdot \delta = 0,36$ м. Даже при такой небольшой толщине степень черноты ядра факела достигает значения $\varepsilon_{\phi} = 0,3$.

Зональные расчеты теплообмена проводились по традиционной и уточненной методике. Результаты расчетов результирующего теплопереноса к экранной поверхности нагрева (фронтальный и сводовый экраны вместе) представлены на рис. 2.

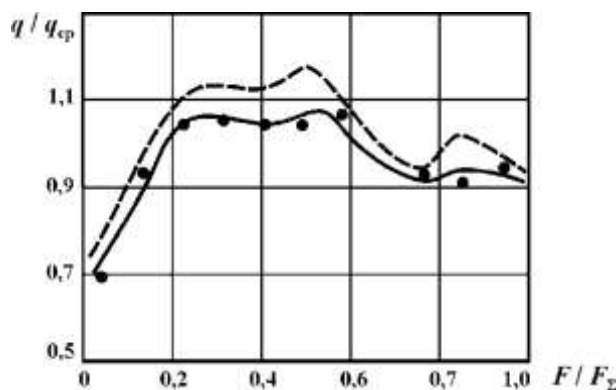


Рис. 2. Относительная теплонапряженность экранной поверхности нагрева:
 — — — традиционная методика; — — — уточненная методика; • — эксперимент [7]

Расчетные профили относительной теплонапряженности поверхности нагрева качественно совпадают с экспериментальными данными. Традиционная методика расчета дает несколько завышенные значения плотности тепловых потоков, при этом максимальная погрешность наблюдается в области их наибольших значений и составляет 15%. Это объясняется некоторой потерей точности для оптически плотных сред, более заметной при больших тепловых потоках. Уточненная методика дает более высокую точность расчета тепловых потоков. Наибольшее отклонение от экспериментальных данных здесь не превышает 5%, что находится в пределах точности самого эксперимента.

Таким образом, уточненная математическая модель и методика расчета теплообмена и радиационных свойств продуктов сгорания в топочных многозонных системах является более корректной, а полученные решения более точными за счет отказа от приближения оптически тонкой среды для объемных зон расчетной области и корректировки спектральных параметров модели излучения по экспериментальным значениям интегральной степени черноты газовой среды, являющимся наиболее достоверными. Наряду с этим методика сохраняет общие принципы зонального математического описания лучистого переноса и не приводит к существенному изменению детально разработанных и обоснованных процедур алгоритма зонального расчета. Все это повышает точность и универсальность зонального метода для расчета реальных огнетехнических установок, таких как промышленные печи и котельные агрегаты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н. Теплообмен излучением. М: Энергоатомиздат, 1991. 432 с.
2. Бухмиров В.В., Солнышкова Ю.С. Зональные методы расчета радиационного и сложного теплообмена. Иваново: Изд-во ИГЭУ, 2012. 95 с.
3. Крупенников С.А. Зональный метод расчета радиационного и сложного теплообмена: основные положения и способы численной реализации // Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2006. № 3. С. 59-62.

4. Viskanta R. Radiative Transfer in Combustion Systems: Fundamentals and Applications. New York: Begell House, 2005. 460 p.

5. Handbook of infrared radiation from combustion gases / C.B. Ludwig, W. Malkmus, J.E. Reardon, J.A.L. Thomson. Washington, NASA 8p-3080, 1973. 486 p.

6. Яндер Х., Вангер Г. Дж. Образование ионов, кластеров, нанотрубок и частиц сажи в углеводородном пламени // Физика горения и взрыва. 2006. Т. 42. № 1. С. 81-88.

7. Седелкин В.М. Исследование и разработка методов расчета теплообмена в трубчатых печах газовой и нефтехимической промышленности: дис. ... д-ра техн. наук. Саратов, 1982. 577 с.

Кулешов Олег Юрьевич –
доктор технических наук, профессор
кафедры «Промышленная теплотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Муслимов Евгений Ильдусович –
аспирант кафедры
«Промышленная теплотехника»
Саратовского государственного технического
университета имени Гагарина Ю.А.

Седелкин Валентин Михайлович –
доктор технических наук, профессор кафедры
«Машины и аппараты нефтегазовых,
химических и пищевых производств»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Oleg Yu. Kuleshov –
Dr. Sc., Professor
Department of Industrial
Heat Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Evgeny I. Muslimov –
Postgraduate of Department
of Industrial Heat Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Valentin M. Sedelkin –
Dr. Sc., Professor
Department of Machines and Apparatus for Oil-Gas,
Chemical and Food Industries, Engels State
Technological Institute (branch)
of Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.07.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.365

К.Н. Огурцов, Т.Ю. Дунаева

**ПОВЫШЕНИЕ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ СВЧ ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ
УСТАНОВОК С КАМЕРАМИ ЛУЧЕВОГО ТИПА ПУТЕМ УПРАВЛЕНИЯ
ИСТОЧНИКАМИ ВНУТРЕННЕГО ТЕПЛА В ОБЪЕКТЕ**

Представлены способы повышения энергетической эффективности СВЧ электротермических установок с камерами лучевого типа путем повышения равномерности нагрева и управления внутренними источниками тепла в объекте.

Энергетическая эффективность, СВЧ электротермическая установка, камера лучевого типа, внутренние источники тепла, математическое моделирование

K.N. Ogurtsov, T.Yu. Dunaeva

**INCREASING ENERGY EFFICIENCY OF MICROWAVE ELECTROTHERMAL
UNITS WITH BEAM-TYPE CAMERAS BY CONTROLLING
INTERNAL HEAT SOURCES IN OBJECTS**

The paper presents ways to improve energy efficiency of microwave electrothermal appliances with beam-type cameras by improving uniformity of heating and controlling internal heat sources in objects.

Energy efficiency, microwave electro thermal appliance, beam-type camera, internal heating sources, mathematical simulation

Актуальной проблемой промышленного производства в настоящее время является повышение энергетической эффективности термообработки диэлектриков. Существующие традиционные методы термообработки диэлектриков являются достаточно энергозатратными. Доказано, что в некоторых отраслях промышленности СВЧ диэлектрический нагрев успешно конкурирует с традиционными видами энергоподвода, позволяя значительно снизить энергопотребление и улучшить качество выпускаемой продукции, повышая тем самым ее конкурентоспособность [1, 2]. Основным преимуществом СВЧ нагрева диэлектриков перед альтернативными способами энергоподвода, позволяющим значительно сократить энергозатраты, является достаточно быстрый равномерный нагрев диэлектриков за счет наличия внутренних источников тепла непосредственно в нагреваемом объекте. Так, например, в СВЧ установках с КБВ на нерегулярном волноводе равномерность распределения внутренних источников тепла обеспечивается подбором геометрии камеры. В КСВ применяют диссекторы и вращение обрабатываемого объекта, а также регулирование влажности воздуха в рабочей камере. В камерах лучевого типа улучшения равномерности термообработки объекта можно достичь, используя многогенераторные камеры, а также специальные отражающие поверхности [3]. Равномерность термообработки, как правило, оценивается в процентном соотношении и достигает, например, 5% в КБВ. Одним из основных требований технологического процесса является не только высокая равномерность распределения температуры в нагреваемом объекте, но и строгое соблюдение темпов нагрева/остывания, а также точность поддержания температуры в объекте. Основным способом решения данной проблемы в СВЧ электротермических установках является двухпозиционное регулирование, при котором количество энергии, подводимой к нагреваемому объекту, регулируется путем изменения скважности работы магнетрона. Другой способ регулирования подачи СВЧ мощности в рабочую камеру – использование магнетрона с регулируемым током анода.

Как известно, при СВЧ термообработке количество выделяемой энергии в глубине нагреваемого объекта (при условии, что размеры объекта соизмеримы с длиной волны) зачастую больше, чем на поверхности. В таких случаях можно говорить о недостаточном нагреве поверхности объекта. Это снижает равномерность нагрева объекта и повышает энергетические затраты на технологический процесс. Решить эту проблему можно, управляя распределением внутренних источников тепла в нагреваемом объекте.

Рассмотрим эту проблему на примере нагрева плоского объекта в поле рупорного излучателя (рис. 1), расположенного в КЛТ. Математическая постановка этой задачи подробно рассмотрена в [3, 4]. На некотором расстоянии от объекта располагается металлическая стенка. В результате отражений от границ воздух – среда и металл – воздух образуется стоячая волна, распределение напряженности которой в зависимости от расстояния от излучателя показано на рис. 2.

В диэлектрике с потерями при этом возникают внутренние источники тепла, мощность которых определяется по

$$q_v = 0,5 \omega \varepsilon_0 \varepsilon' \operatorname{tg} \delta |\dot{E}|^2 ; \quad (1)$$

при этом распределение мощности источников тепла по толщине нагреваемого объекта имеет характер, показанный на рис. 3.

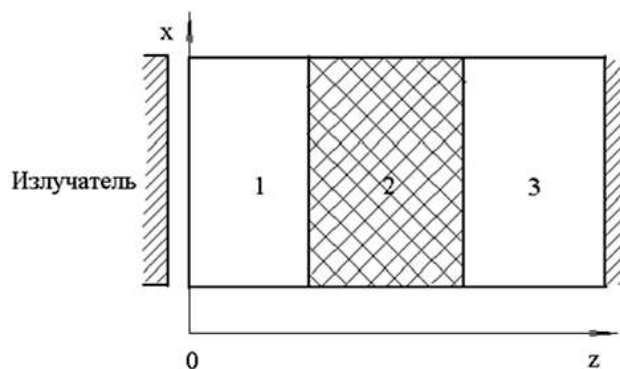


Рис. 1. Распространение электромагнитной волны в многослойной среде: 1, 3 – воздух; 2 – обрабатываемый объект

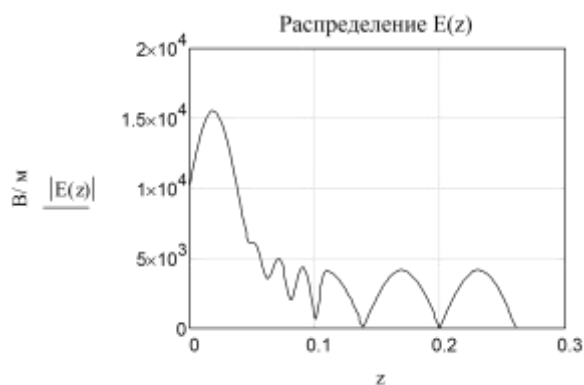


Рис. 2. Распределение напряженности электромагнитного поля внутри объекта

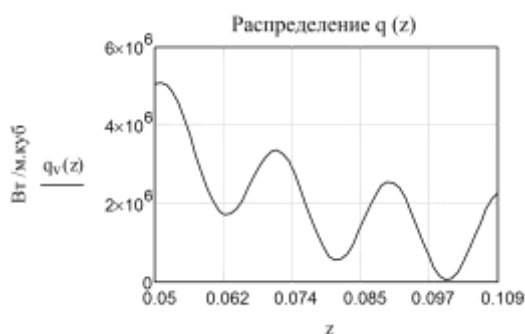


Рис. 3. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине диэлектрика

Изменяя расстояние от нагреваемого объекта до металлической отражающей стенки можно менять распределение внутренних источников тепла, а следовательно, увеличить равномерность нагрева. Диапазон изменения тепловыделения при этом будет равен половине длины волны. Наибольшая разница в распределении внутренних источников тепла будет наблюдаться при расстояниях от отражателя, кратных $\frac{\lambda}{4}$, где λ – длина волны в пространстве между диэлектриком и отражателем. На

рис. 4 представлено распределение внутренних источников тепла при расстоянии до отражателя на $\frac{\lambda}{4}$ больше, чем на рис. 3.

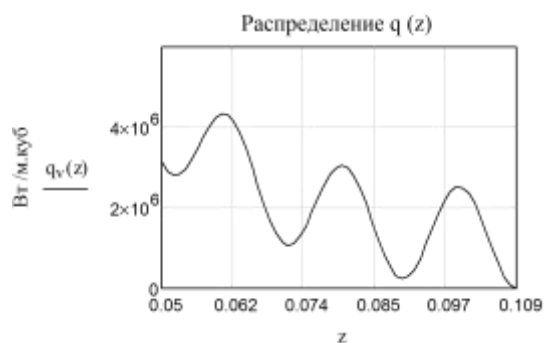


Рис. 4. Распределение мощности внутренних источников тепла по толщине диэлектрика при увеличенном расстоянии до отражателя на $\frac{\lambda}{4}$

Таким образом, при конструировании СВЧ электротермических установок лучевого типа возможно осуществить управление внутренними источниками тепловыделения. На рис. 4 представлен вариант конструкции рабочей камеры периодического действия с плавной регулировкой расстояния до металлического отражателя. В качестве механизма перемещения объекта в данном случае используется гидропривод.

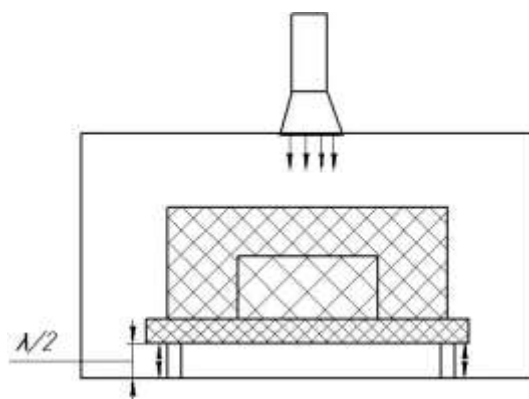


Рис. 4. Камера лучевого типа с изменяющимся расстоянием до отражающей поверхности (периодический режим работы)

При конструировании рабочей камеры лучевого типа, работающей в методическом режиме, можно использовать несколько излучающих систем с разными расстояниями от объекта до отражателя (рис. 5).

Для обеспечения симметрии теплового распределения СВЧ энергия подается к объекту с двух сторон, отражатели расположены на разных расстояниях от нагреваемого объекта на расстоянии $\frac{\lambda}{4}$ друг от друга.

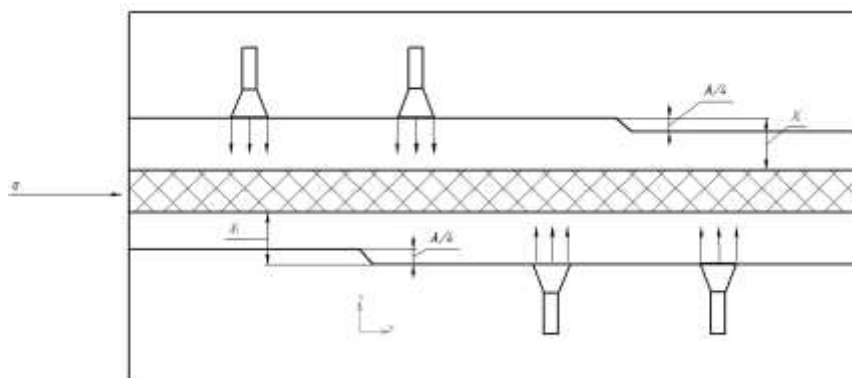


Рис. 5. Камера лучевого типа с четырьмя излучающими антеннами и разными расстояниями от обрабатываемого объекта до отражающей поверхности (методический режим работы)

При разработке рабочих камер лучевого типа с регулируемыми источниками тепловыделения в первую очередь необходимо рассчитать начальное расстояние от объекта до отражающей плоскости. На наш взгляд, это расстояние должно быть выбрано таким образом, чтоб максимум тепловыделения приходился на поверхностные слои диэлектрика. Это позволит скомпенсировать тепловые потери в окружающую среду и, в конечном счете, увеличить равномерность нагрева. При этом это расстояние следует минимизировать для уменьшения металлоемкости конструкции и размеров рабочей камеры.

Вывод: повышения энергетической эффективности термообработки диэлектриков в СВЧ электромагнитном поле возможно достичь путем увеличения равномерности тепловыделения. Для этого предлагается в установках с камерами лучевого типа предусматривать возможность плавного регулирования расстояния от объекта до отражающей стенки, а также от излучателей до объекта.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огурцов К.Н., Дунаева Т.Ю. Использование СВЧ диэлектрического нагрева для высокотемпературной обработки материалов [Электронный ресурс] // Материалы XV Междунар. зимней школы-семинара по электронике сверхвысоких частот и радиофизике: тез. лекций и докл. г. Саратов, 6-11 февр. 2012 г. Саратов: СГУ, 2012.

2. Дунаева Т.Ю., Архангельский Ю.С. Технико-экономическое сравнение СВЧ-и тепловых сушилок зерна // Радиотехника и связь: сб. науч. тр. Саратов: СГТУ, 2008. С. 274-278.
3. Архангельский Ю.С., Огурцов К.Н., Гришина Е.М. Камеры лучевого типа СВЧ электротехнологических установок. Саратов: Изд. дом «Полиграфия Поволжья», 2010. 229 с.
4. Огурцов К.Н. СВЧ рабочие камеры для высокотемпературного нагрева диэлектриков // Вопросы электротехнологии. 2013. № 1. С. 40-45.

Огурцов Константин Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Constantin N. Ogurtsov – Ph.D., Associate Professor
Department of Automated Electrical Technology Devices and Systems
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Дунаева Татьяна Юрьевна – кандидат технических наук, доцент кафедры «Автоматизированные электротехнологические установки и системы» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Tatyana Yu. Dunaeva – Ph.D., Associate Professor
Department of Automated Electrical Technology Devices and Systems
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.05.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 541.13

С.С. Попова, Х.Х. Альвиев, Е.С. Гусева, И.П. Макеева

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВНЕДРЕНИЯ ЛАНТАНА И ЛИТИЯ В ОКСИДИРОВАННЫЙ ТИТАНОВЫЙ ЭЛЕКТРОД ИЗ АПРОТОННЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ РАСТВОРОВ ИХ СОЛЕЙ

Шпинель $Li_4Ti_5O_{12}$ с технической точки зрения является очень перспективным анодным материалом для литий-ионных аккумуляторов большой мощности нового поколения. Стабильность и превосходная обратимость цикла, высокая емкость (175 мАч/г), отсутствие деформационных изменений в процессе циклирования, относительно плоская характеристика литирования при напряжении 1,55 В (относительно Li/Li^+), большие мировые запасы оксида титана объясняют высокий интерес к $Li_4Ti_5O_{12}$ в качестве анодного материала. В связи с этим настоящая работа посвящена исследованию электрохимического поведения оксидированного титанового электрода в апротонных органических растворах солей лантана и лития методом электрохимического внедрения.

Оксидированный титан, лантан, литий, анодные материалы

S.S. Popova, H.H. Alviev, E.S. Guseva, I.P. Makeeva

ELECTROCHEMICAL INTRODUCTION OF OXIDIZED TITANIUM IN APROTIC ORGANIC SALT SOLUTIONS OF LANTHANUM AND LITHIUM

The spine $Li_4Ti_5O_{12}$ from the technical point of view is an important anode-material for the lithium-ion battery of high power new generation. Stability and excellent reversibility of the cycle, its high- capacity (175 mAh/g), lack of deformation process changes during the cycling changes, relatively deformed during cycling, relatively flat voltage character at 1.55 V (in rela-

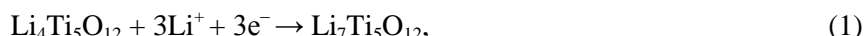
tion to Li/Li^+), and large world reserves of oxide titanium explain the high interest in $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ as the anode material. The given work investigates the possibility of modifying the oxidized titanium electrode in aprotic organic salt solutions of lanthanum and lithium using the electrochemical method.

Oxidized titanium, lanthanum, lithium, anode materials

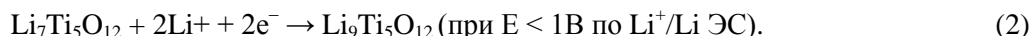
Введение

Известно, что титан способен образовывать двойные оксиды типа Li_2TiO_3 , $\text{Li}_2\text{Ti}_2\text{O}_5$, Ln_2TiO_5 со структурой каменной соли и статистическим распределением катионов [1]. Двойной оксид $2\text{Li}_2\text{O} \cdot 5\text{TiO}_2$ имеет структуру шпинели, в решетке которой $4/3$ мест катионов занимают ионы Li^+ , а $5/3$ – ионы Ti^{4+} . Аналогичным строением обладают оксиды РЗЭ со щелочными металлами Me_2LnO_3 (Me: Li, Na). Возможно образование различных модификаций путем катодного внедрения чужеродных частиц. Стабильность таких модифицированных литием оксидов титана очень высока, а состав TiO_y по кислороду может колебаться в пределах $1 < y < 2,5$. TiO_y относится к полупроводникам n -типа с практически постоянным потенциалом плоских зон и максимумом концентрации доноров $\sim 3\%$ Ti^+ . Монооксид титана TiO_y обладает широкой областью гомогенности (от $\text{TiO}_{0,70}$ до $\text{TiO}_{1,25}$) и содержит одновременно по 10-15 ат.% структурных вакансий в подрешетках Ti и O [2]. Реальную его структуру можно записать в виде $\text{Ti}_x^{\blacksquare} \text{O}_z^{\square} \text{O}_{1-z} \equiv \text{TiO}_y$, где $y = z/x$, \square и \blacksquare – структурные вакансии в O и Ti-подрешетках. Монооксид $\text{TiO}_{1,00}$ содержит в подрешетках Ti и O по 16,7 ат.% вакансий и при температурах 700-800 К может диспропорционировать с образованием Ti_2O ($\text{TiO}_{0,50}$) или Ti_3O_2 ($\text{TiO}_{0,67}$). При $t^\circ > 700$ К в TiO_y образуются сверхструктуры. Появление различного рода дефектов вызывает увеличение подвижности ионов Ti^+ и O^+ в структуре TiO_y [3]. Вследствие того, что плотность заряда на литии мала, литий, отдавая свой электрон, остается на поверхности металла в виде Li^+ ; кислород, напротив, стремится войти внутрь. Таким образом, образование поверхностных полиядерных комплексов на оксидах металлов должно протекать с меньшими энергетическими затратами, так как в состав их могут включаться атомы кислорода поверхностных слоев оксида. Пленочные нанодисперсные электроды на основе оксидов титана, стабильные во многих биологически активных средах, при средней толщине пленок TiO_2 500-1000 нм и размере наночастиц TiO_2 2,9-4,0 нм показали себя эффективными сенсорами кислорода. Согласно данным РФЭС, поверхность наночастиц, сформированная в основном из Ti^{3+} и Ti^{4+} , соответствует фазе протонированного оксида $\text{Ti}_x^{3+}\text{Ti}_{1-x}^{4+}\text{O}_{2-x}(\text{OH})_x$, для которой $x = 0,093$, что соответствует составу $\text{TiO}_{1,01}(\text{OH})_{0,09}$.

Шпинель $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ относится к перспективным анодным материалам. При заряде [2] на таком аноде протекает реакция



в которой три иона Ti^{4+} из пяти меняют свою валентность от (4+) до (3+). Это соответствует теоретической удельной емкости 175 мАч/г (в диапазоне потенциалов от 3 до 1 В относительно лития). Возможна и дальнейшая интеркаляция ионов Li^+ :



При этом удельная теоретическая емкость должна увеличиться до 293 мАч/г. Структура $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ относится к кубическому типу с пространственной группой $\text{Fd}3\text{m}$, где 75% ионов лития расположены в тетраэдрических 8a зонах, а 25% ионов лития и титана Ti^{4+} распределены случайным образом в октаэдрических 16d зонах; все ионы кислорода занимают 32d зоны [4]. Ионы легирующего металла (III) вместе с Ti^{4+} занимают октаэдрические 16d зоны [5].

Гранулированный титанат лития состава $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, полученный путем распылительной сушки при 800°C из суспензии диоксида титана TiO_2 в растворе карбоната лития Li_2CO_3 с последующей твердофазной реакцией [5], был успешно использован в гибридном конденсаторе с угольным катодом. Введение гранулированного $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в состав анода позволило увеличить ёмкость конденсатора в $\sim 2,5$ раза. Согласно данным рентгеновской дифрактометрии, параметр ячейки $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ составляет 8,358 Å. Пористая структура гранул $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ облегчает проникновение электролита и позволяет увеличить площадь рабочей поверхности анода, контактирующей с электролитом, а протекание реакции на аноде по механизму интеркалирования ионов Li^+ [1] обеспечивает высокую сохранность заряда: емкость на первом цикле (в диапазоне 1,5-2,5 В) составляет 260 Ф, и к 100 циклу – 259 Ф.

Авторы [6] предлагают синтезировать $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ по методу выпаривания жидкой фазы (ВЖФ), используя смесь $\text{LiOH}\cdot\text{H}_2\text{O}$ и бутилтитаната $\text{C}_{16}\text{H}_{36}\text{O}_4\text{Ti}$ в стехиометрическом соотношении путем покапельного добавления бидистиллированной воды при магнитном перемешивании с подогревом и последующего выпаривания жидкой фазы при 80° в течение 5 ч, высушивания при 100°C , измельчения и спекания в муфельной печи ($600\text{--}750^\circ\text{C}$) в течение 20 ч с последующим охлаждением до комнатной температуры. Температура спекания играет важную роль: она способствует образованию хорошо развитой структуры кристаллов. При этом наблюдается тенденция морфологической эволюции агломерированных зерен в пластинчатую форму. Наличие мелких зерен облегчает транспорт как электронов, так и ионов Li^+ и способствует увеличению емкости и стабильности электрических характеристик в процессе циклирования. В диапазоне температур спекания $600\text{--}750^\circ\text{C}$ лучшие характеристики получены при температуре 650°C : при токовой нагрузке 30, 60, 90 и 120 мА/г значения емкости при разряде /заряде составили соответственно: 177,15/163,01; 167,17/162,64; 156/147,44 и 147,15/143,06 мАч/г. С усилением поляризации горизонтальная разрядная характеристика анода снижается и, начиная с нагрузки 60 мА/г устанавливается в области 1,33 В. Это объясняется снижением количества примесей и хорошо развитой кристаллической структурой. Кроме того, улучшению электрохимических свойств порошка $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ способствует остаточное содержание анатаза TiO_2 .

Шпинель $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ с технической точки зрения является очень важным анодным материалом для литий-ионных аккумуляторов большой мощности нового поколения. Стабильность и превосходная обратимость цикла, высокая емкость (175 мАч/г), отсутствие деформационных изменений в процессе циклирования, относительно плоская характеристика литирования при напряжении 1,55 В (относительно Li/Li^+), большие мировые запасы оксида титана объясняют высокий интерес к $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в качестве анодного материала [7]. Однако коммерческому использованию $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в качестве анодного материала препятствует его низкая электронная проводимость. Эффективным способом повышения электропроводности $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ является ионное легирование, в частности легирование катионами металлов (K^+ , Ag^+ , Sr^{2+} , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Zn^{2+} , Al^{3+} , Ni^{2+} , Ga^{3+} , Cr^{3+} , Co^{3+} , La^{3+} , Mo^{4+} , Mn^{4+} и т.д.), анионами F^- , Br^- . Последние достижения в этом направлении рассмотрены в [7]. Ионное легирование анодного материала на основе $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ облегчает частичный переход ионов Ti^{4+} в трехвалентное состояние (Ti^{3+}). В результате происходит компенсация зарядов и образование окислительно-восстановительной пары $\text{Ti}^{3+}/\text{Ti}^{4+}$, что, в свою очередь, приводит к повышению концентрации электронов.

Повышению электронной проводимости способствует внедрение катионов K^+ , Mg^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , Zr^{2+} , Sn^{2+} в зону лития посредством твердофазной реакции, а образующиеся фазы $\text{Li}_{3,96}\text{K}_{0,04}\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, $\text{Li}_{3,9}\text{Ca}_{0,1}\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, $\text{Li}_{3,9}\text{Sn}_{0,1}\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, $\text{Li}_{4-x}\text{Mg}_x\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ ($x = 0,05; 0,1; 0,15; 0,2$) обеспечивают достижение более высоких рабочих характеристик модифицированного $\text{Li}_{4-x}\text{M}_x\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ анода.

Аналогично легирование зоны титана небольшими количествами ионов металлов переходных рядов (Cr^{3+} , Co^{3+} , Ni^{2+} , La^{3+} , Mo^{4+} , Mn^{4+} и др.) также приводит к улучшению рабочих характеристик вследствие повышения электронной проводимости благодаря образованию шпинелей типа $\text{Li}_{3,97}\text{M}_{0,1}\text{Ti}_{4,94}\text{O}_{12}$ ($\text{M}=\text{Ni}, \text{Co}$) и $\text{Li}_{(4-x/3)}\text{Ti}_{(5-2x/3)}\text{O}_{12}$ ($x = 0,1; 0,3; 0,6; 0,9; 1,5$); $\text{Li}_4\text{La}_x\text{Ti}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($0 \leq x \leq 0,2$), $\text{Li}_4\text{Mo}_x\text{Ti}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0,5\text{--}1,5$), $\text{Li}_4\text{Mn}_x\text{Ti}_{5-x}\text{O}_{12}$ ($x = 0,01; 0,05; 0,10$). Среди образцов, легированных марганцем, образец состава $\text{Li}_4\text{Ti}_{4,9}\text{Mn}_{0,1}\text{O}_4$ обеспечивает наиболее высокую емкость (305 мАч/г), стабильность цикла заряда-разряда и проводимость носителя заряда [7].

Аналогичные эффекты можно наблюдать и при легировании кислородной зоны, например, ионами Al^{3+} и F^- , когда в результате твердофазной реакции образуется фаза $\text{Li}_4\text{Al}_x\text{Ti}_{(5-x)}\text{F}_y\text{O}_{12-y}$. Эффект совместного легирования требует своего дальнейшего изучения.

Таким образом, легирование $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ катионами и анионами следует отнести к числу наиболее эффективных способов повышения его электронной проводимости и соответственно его электрохимической активности.

Во всех исследованиях для ионного легирования $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ авторами использован химический золь-гель метод твердофазной реакции [5-9].

Целью настоящей работы было исследование возможности модифицирования оксидированного титанового электрода в апротонных органических растворах солей лантана и лития методом электрохимического внедрения [10, 11].

В качестве рабочих электродов в работе использовали пластины из Ti (ГОСТ 16071-72) с площадью рабочей поверхности $2,3 \text{ см}^2$. Перед каждым опытом поверхность электродов полировали влажным стеклянным порошком, промывали бидистиллированной водой и сушили в вакуумном сушильном шкафу. Непосредственно перед экспериментом электроды ополаскивали в рабочем растворе. Титановую основу предварительно анодно оксидировали в растворе серной кислоты H_2SO_4 200 г/л в течение 10...90 мин при 20°C и плотности тока 100 мА/см^2 . Противозэлектродами при оксидировании служили пластины из свинца ($S = 10 \text{ см}^2$). Толщину оксидной пленки определяли микроструктурным анализом. При заданных условиях она колебалась от ~ 7 до 60 мкм . Далее в предварительно подготовленные матрицы на основе титана электрохимически внедряли в течение 1 часа лантан из $0,03 \text{ М}$ раствора диметоксибензоата лантана в диметилформамиде (ДМФ) при потенциалах от $-1,7 \text{ В}$ до $-2,7 \text{ В}$. Затем сформированный на поверхности $\text{Ti}_{\text{окс}}$ электрода слой сплава $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ обрабатывали при $E_{\text{кп}} = -2,9 \text{ В}$ в течение 1 часа в 1 М LiClO_4 в смеси пропиленкарбоната (ПК) и диметоксиэтана (ДМЭ) при соотношении (1:1 по объему). Наличие La и Li в оксидированном титане определяли методом ВИМС. При катодном внедрении лантана и лития в качестве противозэлектродов использовали пластины из титана ($S = 10 \text{ см}^2$). Электродом сравнения служил неводный хлорсеребряный электрод (н.х.с.э.), изготовленный на основе стандартного хлорсеребряного электрода (х.с.э.) марки ЭВЛ-1 в растворе 1 М LaCl_3 в ДМФ или соответственно в 1 М LiClO_4 в смеси ПК+ДМЭ (1:1), в которые для элиминирования диффузионного потенциала вводили кристаллики LiCl. Величина потенциала н.х.с.э. при 20°C составляет $\approx -0,06 \text{ В}$ относительно стандартного водного х.с.э., $\approx 0,163 \text{ В}$ относительно водородного, $\approx 3,05 \text{ В}$ относительно литиевого электрода сравнения в рабочем растворе электролита. При измерениях в растворах на основе ДМФ применяли промежуточный сосуд с рабочим электролитом.

Электрохимические исследования были проведены при 20°C в гальваностатическом, потенциостатическом и потенциодинамическом режимах с помощью потенциостата П-5848 в комплекте с самопишущим потенциометром КСП-4, Н-307/1 или осциллографом. Металлографический анализ проводили на микроскопе EPIGNOST-21 фирмы «Цейсс» в отраженном свете при увеличении 500 крат.

Обработка $\text{Ti}_{\text{окс}}$ -электрода в растворе диметоксибензоата лантана даже малыми плотностями катодного тока сопровождается сильным поляризующим эффектом (рис. 1): при $i_k = 4 \text{ мА/см}^2$ потенциал электрода в течение 1-2 с смещается практически на 2 В; увеличение i_k до 20 мА/см^2 вызывает смещение потенциала до $\sim -2,7 \text{ В}$. Поляризационное сопротивление $R_{\text{ом}}$ снижается при этом от ~ 500 до $\sim 100 \text{ Ом}$.

Влияние формирующегося слоя La_yTiO_2 на последующее поведение $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электрода в растворе LiClO_4 неоднозначно (рис. 2, 3): задержка потенциала фиксируется в более широком интервале от $-1,0$ до -5 В ; возрастает время установления стационарного состояния; с увеличением $i_k(\text{Li})$ четко прослеживается появление двух задержек на E, t -кривых, отвечающих значениям $E(\text{Li})$ $-(1,5 \pm 0,1) \text{ В}$ и $-(3,0 \pm 0,5) \text{ В}$, а кривые $E-i(\text{Li})$ характеризуются появлением максимума в области $i(\text{Li}) = 1,2 \text{ мА/см}^2$ для $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электродов, если предварительная обработка в растворе соли La велась при $i(\text{La}) = 12 \text{ мА/см}^2$ и выше. Полученные данные однозначно указывают на изменение фазового состава поверхностных слоев уже на первых секундах поляризации $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ в растворе LiClO_4 .

Бестоковый потенциал $E_{\text{б/т}} \text{ Ti}_{\text{окс}}$ в растворе соли La составляет $-(0,28 \pm 0,02) \text{ В}$, а для $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ смещается до $-(0,41 \pm 0,04) \text{ В}$; соответственно $\text{LiLaTi}_{\text{окс}}$ в растворе LiClO_4 показывает $E_{\text{б/т}}$ $-(0,48 \pm 0,03) \text{ В}$. Таким образом, во всех случаях сохраняется определяющее влияние оксидного слоя на поведение Ti электрода. Снятые до и после катодного внедрения лантана поляризационные кривые $i-E$ на $\text{Ti}_{\text{окс}}$ (рис. 4, кривая 1) и соответственно $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электродах (рис. 4, кривая 2) показывают, что в интервале потенциалов от $-0,5$ до $-4,5 \text{ В}$ изменение скорости процесса с изменением потенциала $\Delta i/\Delta E$ практически постоянно в диапазоне от $-2,0$ до $-4,0 \text{ В}$ но для $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электрода в исследованных условиях i примерно в 3 раза ниже, а наблюдаемый в области $-3,0 \dots -3,5 \text{ В}$ излом на i, E -кривых становится менее четко выраженным (рис. 3). Для I участка величина ΔE практически постоянна и составляет $\sim 2,5 \text{ В}$ при десятикратном изменении тока, но для II участка при переходе от $\text{Ti}_{\text{окс}}$ к $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ величина $\Delta E_{\text{II}}/\Delta i_{\text{г}}$ уменьшается от 3,6 до 2,8 В.

Таким образом, при потенциалах отрицательнее $-3,0 \text{ В}$, по-видимому, ослабевают влияние оксидной пленки, хотя процесс внедрения лантана и протекает с более низкой скоростью. Это согласуется с предположением о преобладающем влиянии твердофазной диффузии внедряющихся ионов La^{3+} на поверхности электрода.

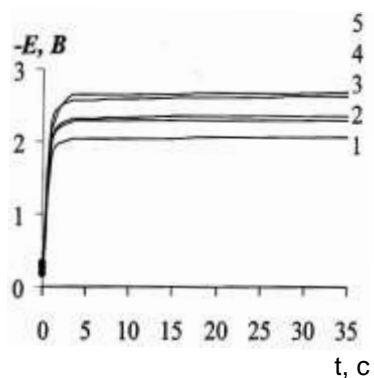


Рис. 1. Ход катодных E, t -кривых $Ti_{окс}$ в 0,03 М растворе $(CH_3OC_6H_4COO)_3La$ при различных $i_k(La)$, mA/cm^2 : 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16; 5 – 20

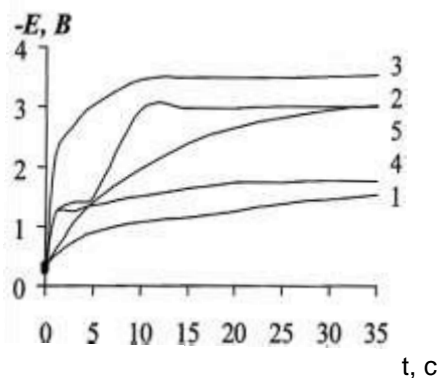


Рис. 2. Влияние плотности тока $i_k(La)$ предварительной катодной обработки $Ti_{окс}$ в 0,03 М растворе $(CH_3OC_6H_4COO)_3La$ на ход катодных E, t -кривых внедрения лития $LaTi_{окс}$ -электрод при плотности тока $i(Li)$ $1,2 mA/cm^2$ в 0,8 М растворе $LiClO_4$ в ПК+ДМЭ (1:1); E, t -кривые 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют $i_k(La)$, mA/cm^2 : 1 – 4; 2 – 8; 3 – 12; 4 – 16; 5 – 20

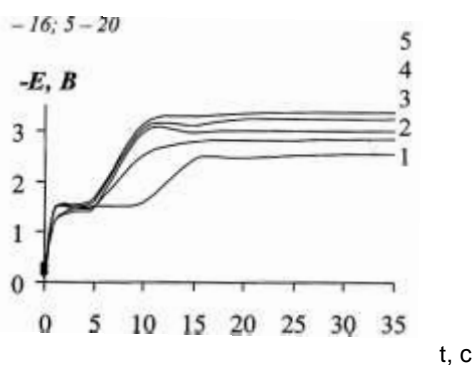


Рис. 3. Ход катодных E, t -кривых $LaTi_{окс}$ в 0,08 М растворе $LiClO_4$ в ПК+ДМЭ (1:1) при различных $i(Li)$, mA/cm^2 : 1 – 0,4; 2 – 0,8; 3 – 1,2; 4 – 1,6; 5 – 2,0; $i(La) = 20 mA/cm^2$

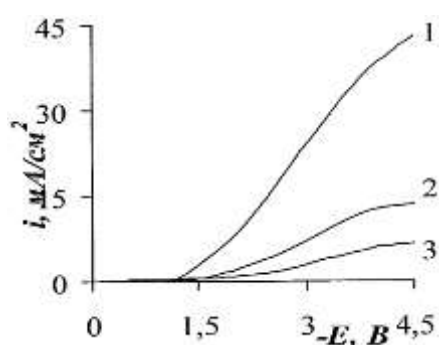


Рис. 4. Поляризационные кривые $Ti_{окс}$ (1), $LaTi_{окс}$ (2) в 0,03 моль/л растворе $(CH_3OC_6H_4COO)_3La$ в ДМФ и $LiLaTi_{окс}$ (3) в 0,08 М растворе $LiClO_4$ в ПК+ДМЭ (1:1)

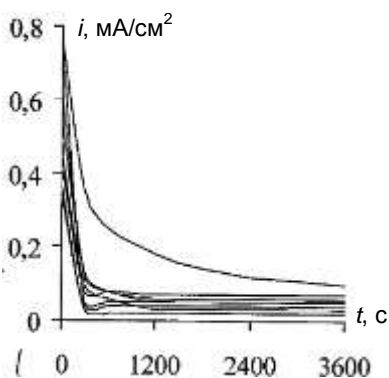


Рис. 5. Потенциостатические кривые i, t -катодного внедрения лантана в анодно оксидированный титановый электрод из 0,5 М раствора сульфанилата лантана при различных потенциалах $-E_{ст}$, В: 1 – -1,7; 2 – -1,8; 3 – -2,0; 4 – -2,1; 5 – -2,2; 6 – -2,3; 7 – -2,6; 8 – 2,8

Как видно из табл. 1, по мере смещения потенциала в отрицательную сторону до $-2,1$ В происходит резкое снижение стационарной плотности тока катодного внедрения лантана. Это может быть связано с насыщением поверхностной оксидной пленки на Ti-электроде внедрившимся лантаном, согласно уравнению



и затруднением диффузии ионов лантана в глубь электрода к межфазной границе Ti/оксид, где происходят собственно акт катодного внедрения лантана в титан и образование сплава La_xTi (рис. 5):



Накопление лантана непосредственно в титановой основе становится возможным, по видимому, только при потенциалах отрицательнее $-2,3$ В. Результаты анализа i, t -кривых (рис. 5) в координатах $i - 1/\sqrt{t}$ согласуются с представлением о протекании на электроде двух процессов.

Для первого зависимость $k_e - E$ подчиняется параболическому закону, для второго – линейному. Таким образом, внедрение лантана в оксидный слой по реакции (1) лимитируется стадией диффузии, а для реакции (2) замедленной является химическое взаимодействие внедрившихся атомов лантана с металлом электрода.

Таблица 1

Диффузионно-кинетические характеристики $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электрода: константа внедрения k_e лантана и произведение концентрации c^0 внедрившегося лантана на его коэффициент диффузии D в степени $1/2$ – при различных потенциалах катодной обработки оксидированного титана в $0,03$ моль/л $(\text{CH}_3\text{OC}_6\text{H}_4\text{COO})_3\text{La}$ в течение 1 ч, время оксидирования $t_{\text{окс}} = 15$ мин

$E_{\text{кп}}, \text{В}$	-1,7	-1,8	-2,0	-2,1	-2,2	-2,3	-2,7	-2,6
$k_e \cdot 10^{-3}, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{см}^{-2}$	0,20	0,26	0,18	0,21	0,09	0,12	0,25	0,33
$c^0 \cdot \sqrt{D} \cdot 10^9, \text{моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$	1,22	1,59	1,10	1,28	0,55	0,73	1,53	2,01

Таблица 2

Влияние времени предварительного оксидирования ($t_{\text{окс}}$) Ti-матрицы на диффузионно-кинетические характеристики $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электродов: константа внедрения k_e лантана и произведение концентрации c^0 внедрившегося лантана и его коэффициент диффузии D в степени $1/2$ – в растворе $0,03$ моль/л диметоксибензоата лантана в ДМФ при потенциале катодной обработки $-2,7$ В и времени 1 ч

Электрод	$\text{LaTi}_{\text{окс}}$			
	5	10	60	90
$E_{\text{кп}}, \text{В}$	5	10	60	90
$k_e \cdot 10^{-3}, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{см}^{-2}$	4,54	5,26	4,16	3,54
$c^0 \cdot \sqrt{D} \cdot 10^9, \text{моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$	8,35	9,68	7,65	6,51

Таблица 3

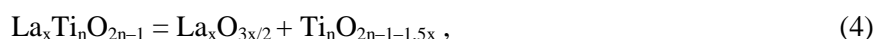
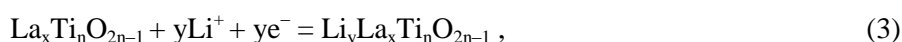
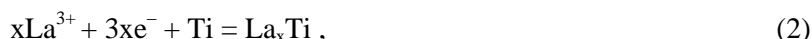
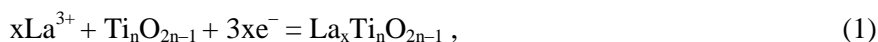
Влияние времени предварительного оксидирования ($t_{\text{окс}}$) Ti-матрицы на диффузионно-кинетические характеристики $\text{LiLaTi}_{\text{окс}}$ -электродов: константа внедрения k_e лития в $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электрод и произведение концентрации c^0 внедрившегося лития на его коэффициент диффузии D в степени $1/2$ – в 1 моль/л растворе LiClO_4 при потенциале катодной обработки $-2,9$ В и времени 1 ч

Электрод	$\text{LiLaTi}_{\text{окс}}$			
	5	10	60	90
$E_{\text{кп}}, \text{В}$	5	10	60	90
$k_e \cdot 10^{-3}, \text{А} \cdot \text{с}^{1/2} \cdot \text{см}^{-2}$	1,78	1,97	2,66	5,33
$c^0 \cdot \sqrt{D} \cdot 10^9, \text{моль} \cdot \text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1/2}$	2,74	3,44	4,89	9,81

Структурные изменения (рис. 3), вызванные фазовыми превращениями вследствие протекания реакций (1), (2), оказывают сильное влияние на кинетику последующего внедрения лития (табл. 3). Снижение диффузионно-кинетических характеристик процесса внедрения лития согласуется с представлением о вакансионном механизме процесса и связано с уменьшением количества свободных вакансий вследствие заполнения части их лантаном на предыдущем этапе катодной обработки.

Заполнение поверхностных вакансий лантаном, как и следовало ожидать, при наличии оксидного слоя затрудняет последующее внедрение лития: плотность тока в исследуемом диапазоне потенциалов (от $-0,5$ до $-4,5$ В) падает на $\text{LiLaTi}_{\text{окс}}$ -электроде в растворе LiClO_4 в ~ 2 раза по сравнению с $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ в растворе диметоксибензоата лантана. Однако излом по-прежнему имеет место, а величина $\Delta E_1/\Delta i$ и $\Delta E_{1V}/\Delta i$ соответственно возрастает до 3,1 и 3,6 В. Таким образом, снижение концентрации свободных вакансий, участвующих в электрохимической стадии внедрения, приводит к уменьшению скорости суммарного процесса, и, следовательно, не только концентрация вакансий и их взаимодействие с внедряющимися атомами металла (La, Li) на внутренней границе Тi/оксид, но и степень дефектности внешней поверхности оксидного слоя на границе с раствором оказывает сильное влияние на кинетику процесса внедрения.

Появление двух задержек потенциала на E,t -кривых $\text{LaTi}_{\text{окс}}$ -электрода в растворе LiClO_4 связано с протеканием реакций образования двойных оксидов титана и лантана типа



Образующийся по реакции двойной оксид представляет собой твердый раствор, компоненты которого способны вступать в реакцию интеркалирования, например, по уравнениям (3), (4) и далее, например, по уравнению (6)-(7).

ЛИТЕРАТУРА

1. Реми Г. Курс неорганической химии. М.: Мир, 1974. Т. 2. 774 с.
2. Валеева А.А., Ремпель А.А., Гусев А.И. Электролитические и магнитные свойства кубического монооксида титана с двойной дефектностью // Доклады АН. 2008. Т. 382. № 3. С. 320-324.
3. Modification of oxide films by ion implantation: TiO_2 , – films modified by Ti^+ and O^+ example / J.W. Schultze, L. Elfenthala, K. Leitner, O. Meyer // Electrochem. Acta. 1998. Vol. 33. № 7. P. 911-925.
4. Кирьянов Б.В. Изучение электрохимического поведения $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ в расширенном диапазоне потенциалов циклирования // Современные методы в теоретической и экспериментальной электрохимии: материалы III Междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГХТУ, 2011. С. 87.
5. Ли Б., Йу Дж.Р. Синтез $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ и его применение в асимметричных гибридных конденсаторах // Электрон. Матер. Письмо. 2013. Т. 9. № 6. С. 871-873.
6. Легкий синтез и свойства $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$, используемого в качестве анодного материала для литий-ионных аккумуляторов / Л.-Л. Се, Ю.-Д. Сю, Ц.-Ц. Сяо-ю Цао, Б. Ван, С.-Я. Ян, Л.-Б. Чу // Электрохимия: Междунар. журнал. 2013. Вып. 8. С. 1701-1712.
7. Чжан Ч., Ли Х. Последние разработки в области легированных анодных материалов из $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ для повышения рабочих характеристик литий-ионных аккумуляторов // Электрохимия: Междунар. журнал. 2013. Вып. 8. С. 6449-6456.
8. Нao Y.J. Effects of dopant on the electrochemical properties of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ anode material // Ionics. 2007. Vol. 13. P. 369.
9. Electrochemical properties of $\text{Li}_4\text{Ti}_{5-2x}\text{Ni}_x\text{Mn}_x\text{O}_{12}$ compounds synthesized by sol-gel process // Power Sources. 2012. Vol. 214. P. 220.
10. Kabanov B.N., Astakhov J.J., Kiseleva J.G. Formation of crystalline intermetallic compounds and solid solution in electrochemical incorporation of metals into cathodes // Electrochem. Acta, 1979. Vol. 24. № 2. P. 167-171.
11. Попова С.С. Фазы внедрения в электрохимии и электрохимической технологии. Саратов: СГТУ, 1993. 78 с.

Попова Светлана Степановна –
доктор химических наук, профессор кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Альвиев Хожбауди Ханзатович –
аспирант кафедры «Технология
электрохимических производств» Энгельсского
технологического института (филиала)
Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Гусева Екатерина Станиславовна –
кандидат химических наук, докторант кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.,
научный сотрудник

Макеева Ирина Петровна –
кандидат химических наук,
научный сотрудник кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana S. Popova –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Hogbaudi H. Alviiev –
Postgraduate
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Ekaterina S. Guseva –
Ph. D., Doctoral candidate
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Irina P. Makeeva –
Ph. D., Research Fellow
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.15, принята к опубликованию 10.11.15

УКД 541.13

С.С. Попова, Е.С. Гусева, Р.К. Францев, А.Р. Жускеев

ЗАКОНОМЕРНОСТИ КИНЕТИКИ ИНТЕРКАЛИРОВАНИЯ РЗЭ, МАГНИЯ И ЛИТИЯ В АЛЮМИНИЕВЫЙ ЭЛЕКТРОД, ПРЕДВАРИТЕЛЬНО ПОДВЕРГНУТЫЙ ПАРОТЕРМИЧЕСКОМУ ОКСИДИРОВАНИЮ

Одним из перспективных методов получения защитных покрытий на металлических изделиях является паротермическое оксидирование, особенностью которого является формирование оксидного покрытия на стадии обезжиривания поверхности металла перед экспериментом за счет протекающего процесса коррозии. Метод не требует дорогостоящих материалов и оборудования и обеспечивает экологическую чистоту процесса. Настоящее исследование посвящено изучению закономерностей катодного внедрения редкоземельных элементов, магния и лития в алюминиевый электрод, подвергнутый предварительной обработке паровоздушной смесью по методу паротермического оксидирования. Установлено, что при температурах 200-300 °С обработка паровоздушной смесью способствует повышению электрохимической активности $Al_{окс}$, $M_1Al_{окс}$, $M_2Al_{окс}$, $M_1M_2Al_{окс}$, $LiM_1M_2Al_{окс}$ ($M_1 = La, Pr$; $M_2 = Mg$) в апротонных органических растворах солей лития.

РЗЭ, магний, литий, алюминиевый электрод, паротермическая обработка

S.S. Popova, E.S. Guseva, R.K. Frantsev, A.R. Zhuskeev

**KINETICS OF REE, MAGNESIUM AND LITHIUM INTERCALATION
INTO THE ALUMINUM ELECTRODE SUBJECTED TO STEAM
GENERATING THERMAL OXIDATION**

One of the promising methods for producing protective coatings over metal articles is steam thermal oxidizing, characterized for the protective layer formed at the stage of degreasing the metal surface due to corrosion process. This method does not require any expensive materials or equipment, and provides ecological purity for the process. The given study is devoted to finding the regularities relating the cathode introduction of rare earth elements, magnesium and lithium into aluminum electrodes subjected to pre-treatment by the method of steam generating thermal oxidation. It is determined that under temperatures at 200-300 °C, using vapor-air mixtures for treatment purposes improves electrochemical behavior of Al_{ox} , M_1Al_{ox} , M_2Al_{ox} , $M_1M_2Al_{ox}$, $LiM_1M_2Al_{ox}$ ($M_1 = La, Pr$; $M_2 = Mg$) in aprotic organic solutions of lithium salts.

Rare earth elements, magnesium, lithium, aluminum electrode, steam thermal oxidizing

Введение

Коррозия металлов вследствие химического или электрохимического взаимодействия с окружающей средой имеет место везде, где используются металлические изделия и конструкции. В мире ежегодно теряются миллионы тонн металла в результате коррозии, что наносит значительный экономический ущерб. Борьба с коррозией металлических изделий – одна из самых актуальных проблем, стоящих перед наукой и техникой. Среди перспективных направлений решения данной проблемы следует особо выделить нанесение оксидных покрытий путем обработки в паровоздушной среде.

В отличие от традиционных способов нанесения оксидных покрытий, характеризующихся невысокой механической прочностью вследствие наводороживания, высокой трудоемкостью, вредными условиями труда, не соответствующими современным требованиям по экологической чистоте, паротермическое оксидирование позволяет не только успешно решать перечисленные проблемы, но и сохранить число стадий в технологическом цикле благодаря тому, что оксидное покрытие формируется уже на стадии обезжиривания поверхности металла за счет протекающего процесса коррозии. При этом метод не требует дорогостоящих материалов и оборудования [1].

Целью настоящего исследования было установление закономерностей катодного внедрения РЗЭ (лантан, празеодим), магния и лития в алюминиевый электрод, подвергнутый предварительной обработке паровоздушной смесью по методу паротермического оксидирования. Время обработки Al-электрода паровоздушной смесью составляло 5, 15, 30 и 60 минут. Температура варьировалась в пределах от 500 до 650 °C с интервалом варьирования 50 °C.

Исследование поверхности с помощью оптического микроскопа EPIGNOST (увеличение $\times 500$) показало (рис. 1), что с увеличением длительности обработки имеет место структурирование образующегося двуслойного покрытия. Шарообразные кристаллы наружного слоя разрастаются в более крупные образования. С увеличением температуры паровоздушной смеси (рис. 1, фото 4) происходит разрыхление наружного слоя. Изменение состояния образующегося оксидного покрытия неизбежно должно было отразиться на кинетике последующего процесса катодного внедрения катионов раствора в электрод: $i-t$ кривые характеризуются появлением максимума плотности тока и тем раньше, чем выше была температура (рис. 2) и время паротермической обработки (рис. 3), причем в максимуме плотность тока в 4-8 раз превышает достигаемую в стационарном состоянии. Установленные закономерности указывают на формирование оксидного слоя различной структуры и на возможность управлять процессом катодного внедрения катионов раствора в электрод путем изменения режима паротермического оксидирования на начальном этапе подготовки поверхности электрода к эксперименту. При этом формирование твердого раствора кислородсодержащих частиц в поверхностном слое Al-электрода происходит тем раньше и сопровождается тем более резким спадом тока ($t \leq 10$ с, рис. 2, 3), чем ниже температура термообработки и больше ее длительность.

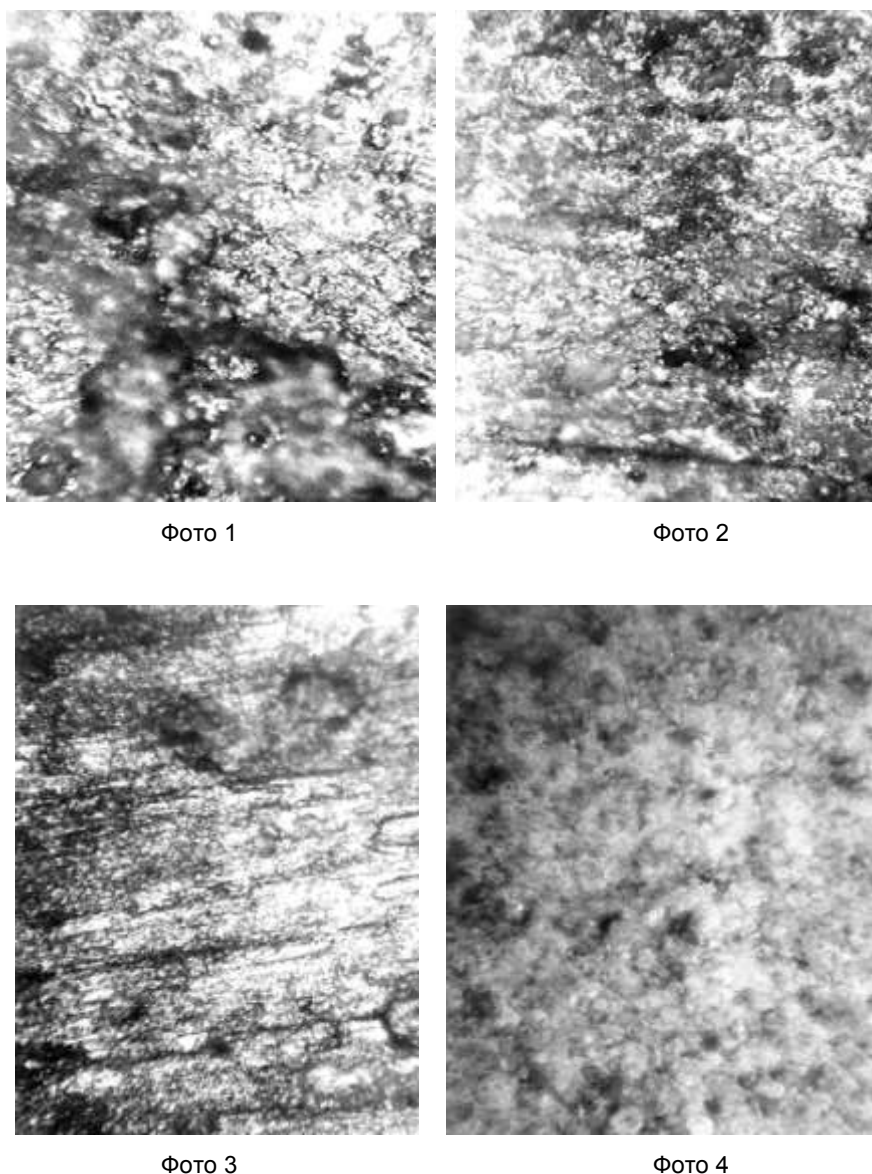
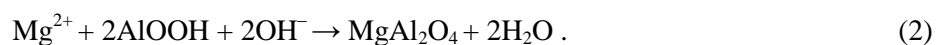


Рис. 1. Оксидирование Al электрода, обработанного паровоздушной смесью при 550°C в течение 1 – 20; 2 – 30; 3 – 45 и 4 – 60 мин и при температуре 650°C в течение часа

Снятие катодно-анодных импульсных гальваностатических кривых (рис. 4) на модифицированном магнием оксидированном $Mg_xAl_{окс}$ электроде показало, что в катодной области потенциалов (отрицательнее $E_p = -1,7$ В) смена механизма процесса происходит только отрицательнее -2 В, когда становится возможным внедрение магния непосредственно в структуру алюминия на внутренней границе металл (алюминий) – оксид:



Процесс модифицирования самого оксидного слоя, граничащего с раствором, можно представить уравнением



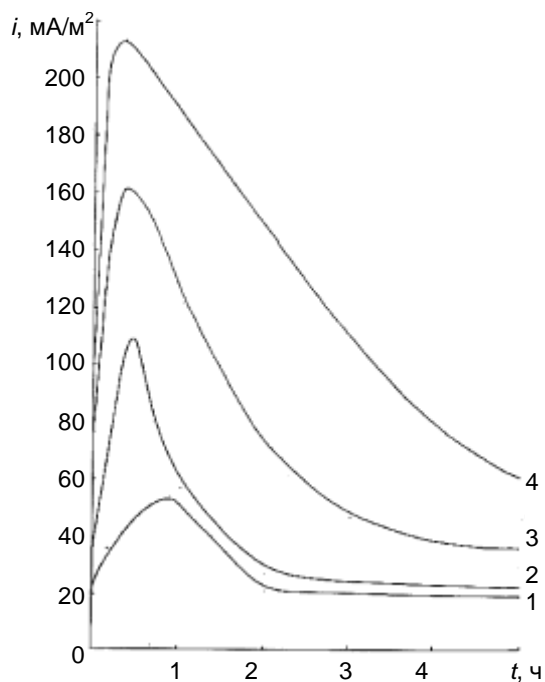


Рис. 2. Кривые для $\text{Al}_{\text{окс}}/\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ 1 моль/л в ДМФ при $-2,3$ В после оксидирования паротермическим способом в течение 30 мин при температурах: 1 – 500; 2 – 550; 3 – 600; 4 – 650°C

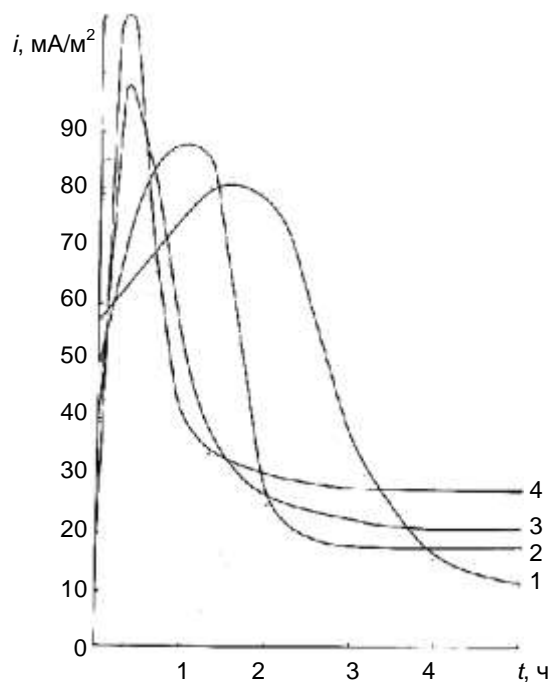


Рис. 3. Кривые $i-t$ для окс. $\text{Al}/\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ 1 моль/л в ДМФ при $-2,3$ В после оксидирования паротермическим способом в при 550°C в течение, мин: 1 – 5; 2 – 15; 3 – 30; 4 – 60

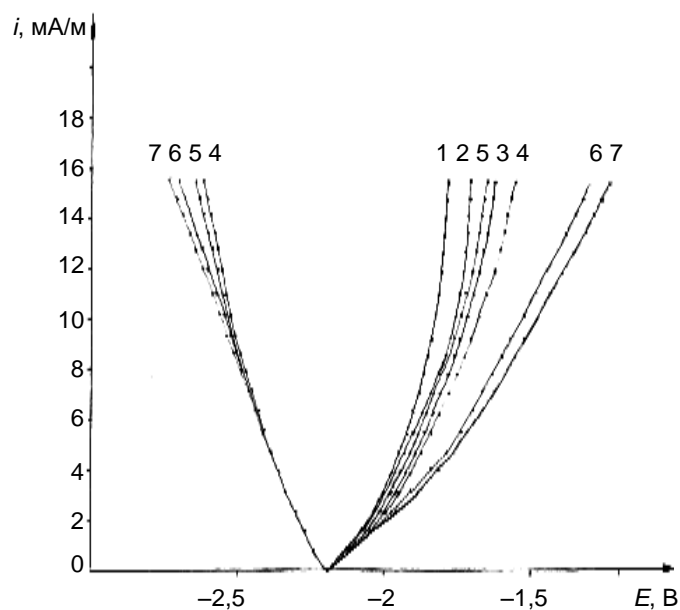


Рис. 4. Катодно-анодные гальваностатические поляризационные кривые в 1 М растворе $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ в ДМФ. Время предварительной катодной обработки 5 часов, потенциал $-2,3$ В. Al предварительно оксидирован паротермическим способом при температурах ($^\circ\text{C}$) в течение, мин: 1 – 5(500); 2 – 15(550); 3 – 30(550); 4 – 60(550); 5 – 30(500); 6 – 0(600); 7 – 30(650)

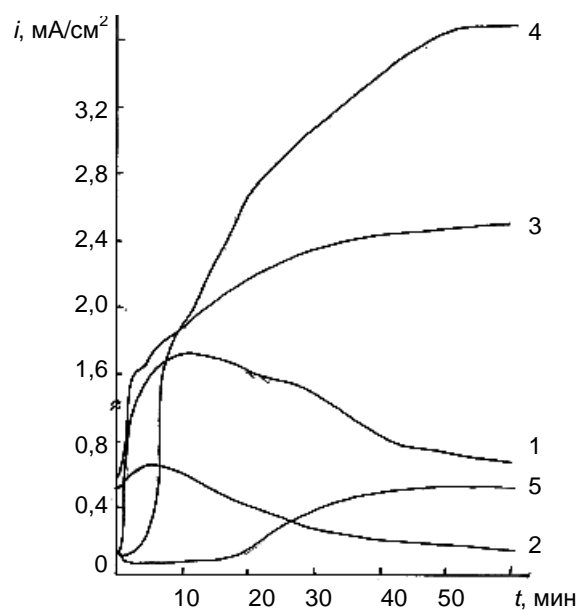


Рис. 5. Влияние термообработки на ход i, t -кривых внедрения Mg в $\text{Al}_{\text{окс}}/\text{Pt}$ электрод из раствора $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ 1 моль/л в ДМФ: 1 – б/термообр.; 2 – 100; 3 – 200; 4 – 300; 5 – 400°C ($E_k = -2,3$ В отн. невод. ХСЭ)

Согласно [2], можно предположить, что в начальный период окисления образуется пленка, состоящая из молекул оксида $\text{Al}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{AlO}(\text{OH})$. Одновременно в растущем оксидном слое накапливается отрицательный объемный заряд. По окончании процесса роста слоя оксида объемный заряд q локализуется в слое оксида, отделяющем электрод от внешней границы с раствором (рис. 5 а). Это приводит к усилению поля в слое x_1 заряда, граничащем с Al основой (рис. 5, б), и его ослаблению в слое x_2 заряда, граничащем с раствором электролита:

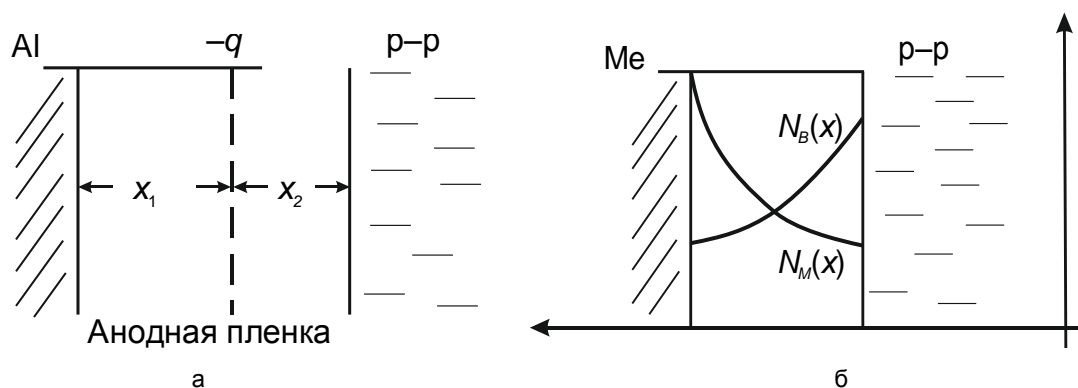


Рис. 5. Схема распределения объемного заряда x в растущем слое оксида

Формирование отрицательного объемного заряда приводит к изменению механизма роста оксидного слоя и усилению неоднородности его состава. Рост, ограниченный объемным зарядом, происходит на границе x_1/x_2 и характеризуется образованием промежуточного слоя Δx путем рекомбинации ионов Al^{3+} и O^{2-} в молекулы оксида [3]. Природа ловушечных центров, ответственных за накопление объемного заряда, различна в различных слоях оксида. Наиболее глубокие ловушки (до 1,4 эВ) локализованы в переходной области Δx в окрестности плоскости q (рис. 5 б) [4, 5]. Перенос катионов через внутренний барьерный слой оксида происходит по механизму прыжковой миграции ионов в сильном поле. В результате в металлической подрешетке оксида возникает распределение концентраций катионов металла и вакансий. Сильное электрическое поле, изменяя на много порядков коэффициенты переноса катионов, влияет на распределение компонентов в оксидном слое и степень его дефектности. На границе с оксидным слоем частицы металла переходят в оксид и в металле возникают поверхностные вакансии, которые занимают внедряющиеся ионы кислорода, образуя новые ячейки оксида.

Сопоставление емкости LaAl-электрода по лантану и литию (рис. 6), внедренных в электрод из растворов соответственно LaCl_3 и LiClO_4 в ДМФ до и после оксидирования (550°C , 30 мин), и последующей термообработки (600°C), и найденных путем экстраполяции годографов импеданса $1/\omega C-R$ электродов LaAl и LiAl на ось R значений сопротивления границы раздела фаз электрод/раствор электролита показало, что сопротивление межфазной границы электрод/электролит составляет соответственно 110 и 50 Ом·см²; для электродов LiLaAl оно снижается до 29 ± 2 Ом·см² (см. таблицу), а емкость LaAl-электрода линейно растет по мере роста длительности поляризации и не зависит от времени предобработки Al в растворе соли лантана (1M LaCl_3 в ДМФ): $t_{kn} = 1,3$ и 6 ч; величина $(\Delta Q/\Delta t) -2,1$ В составляет $\sim 0,007$ мКл/с (рис. 6).

При этом сопротивление межфазной границы электрод/раствор мало зависит от времени внедрения в заданном потенциостатическом режиме ($E_k = -2,9$ В относительно неводного ХСЭ) и снижается в ряду: $\text{LiLaAl} < \text{LiAl} < \text{LaAl}$ (табл. 1).

На оксидированном электроде величина $\Delta Q/\Delta t$ резко возрастает, достигая 0,090 Кл/с. Активирующее влияние кислорода усиливается для $\text{MgLaAl}_{\text{окс}}$ -электрода. После обработки $\text{Al}_{\text{окс}}$ -электрода в растворах $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ ($t_{kn} = 5$ ч) и LaCl_3 ($t_{kn} = 3$ ч) в ДМФ микрофотографии поверхности модифицированного $\text{Mg-La-Al}_{\text{окс}}$ -электрода позволили зафиксировать появление частиц сферической формы, образующих цепи. При длительном оксидировании формируется слоистая структура. Образование слоистой многослойной цепочечной структуры из сферических частиц позволяет объяснить возрастание более чем на порядок емкости $\text{MgLaAl}_{\text{окс}}$ -электрода. Обнаруженный синергетический эффект связан с наноструктурированием поверхности на этапе внедрения лантана.

Значения сопротивления R_3 границы раздела фаз электрод/раствор электролита для LiAl, LaAl, LiLaAl электродов в апротонных органических растворах солей LaCl_3 (ДМФ) и LiClO_4 (ПК+ДМЭ) при 20°C

Соединение	$\tau_{\text{кп}}, \text{с}$	$R_{\text{эл}}, \text{Ом}$
LiAl/p-p LiClO_4	3600	50
LiAl	10800	50
LiAl	21600	50
LaAl/ p-p LaCl_3	3600	110
LaAl	10800	120
LaAl	21600	123
LaLiAl/p-p LiClO_4	3600	27
LaLiAl	10800	28
LaLiAl	21600	32

Аналогичный эффект имеет место и при внедрении лития в Al-электрод, модифицированный магнием ($E_{\text{кн}} = -2,3 \text{ В}$; $t_{\text{к}} = 1 \text{ ч}$; электролит 1М $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ в диметилформамиде).

Аналогичные данные по влиянию температуры термообработки (диапазон 200-400°C) представлены на рис. 7 для процесса внедрения магния в $\text{PrAl}_{\text{окс}}$ электрод из 1М раствора $\text{Mg}(\text{ClO}_4)_2$ в ДМФ при $E_{\text{к}} = -2,3 \text{ В}$ и соответственно для процесса внедрения лития в $\text{MgPrAl}_{\text{окс}}$ электрод из 1М раствора LiClO_4 в ПК+ДМЭ (1:1) при $E_{\text{к}} = -2,7 \text{ В}$. В обоих случаях плотность тока внедрения катионов (Mg^{2+} , Li^+) возрастает после термообработки в 2-5 раз и максимальна в случае температуры термообработки $\text{Al}_{\text{окс}}$ электрода 300°C.

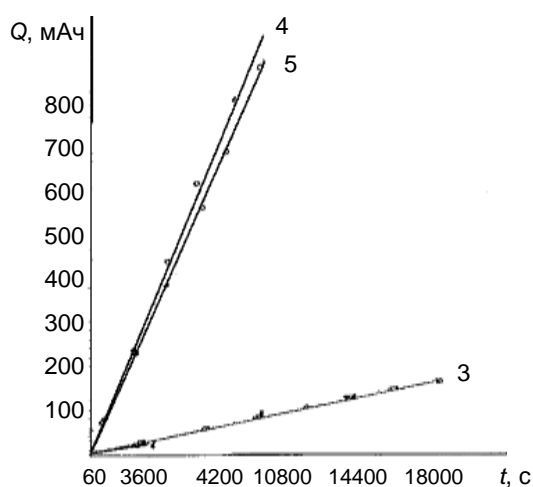


Рис. 6. Зависимость емкости LaAl-электрода Q от времени t катодной поляризации Al при 20°C, $E = -2,1 \text{ В}$ в растворе $\text{LaCl}_3 - 0,1 \text{ моль/л}$ в ДМФА: 1 – 1 ч; 2 – 3 ч; 3 – 6 ч; 4 – после оксидирования при 550°C (30 мин); 5 – последующей термообработки при (900°C)

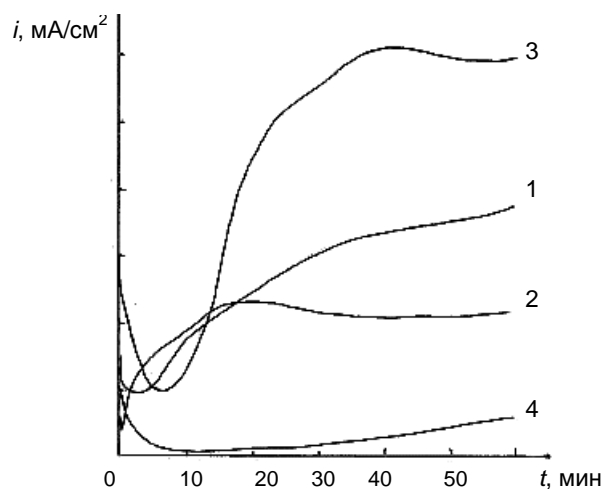


Рис. 7. Влияние термообработки: 1 – б/т; 2 – 200 °C; 3 – 300 °C; 4 – 400°C на ход i, t -кривых внедрения лития в $\text{Al}_{\text{окс}}\text{-Pr-Mg}$ -электрод из раствора LiClO_4 1 моль/л в ПК+ДМЭ (1:1); $E_{\text{к}} = -2,7 \text{ В}$ отн. невод. ХСЭ

Согласно [2], перенос катионов через внутренний барьерный слой происходит по механизму прыжковой миграции ионов в сильном поле, в результате которой в металлической подрешетке оксида возникает распределение концентрации катионов металла и вакансий. Сильное электрическое поле изменяет на много порядков коэффициенты переноса катионов и влияет на их распределение. Возникающие поверхностные вакансии занимают внедряющиеся катионы раствора (Mg^{2+} , La^{3+} , Li^+). Это согласуется с результатами измерения бестокового потенциала $\text{LnAl}_{\text{окс}}$ -

электродов. В частности, при катодной поляризации $Al_{окс}$ в водном растворе $LaCl_3$ 1 моль/л в потенциостатическом режиме в области потенциалов от $-1,6$ В до $-2,6$ В: по мере смещения потенциала поляризации в отрицательную сторону фиксируемых на бестоковых хронопотенциограммах $\Delta E_{кр}$ в момент отключения поляризации, возрастает от сотых долей до 1 В, а $E_{\delta/m(смац)}$ смещается от $-(1,14 \pm 0,04)$ В до $-(1,35 \pm 0,05)$ В.

Таким образом, предварительная термообработка алюминия паровоздушной смесью позволяет значительно повысить электрохимическую активность $Al_{окс}$, $M_1Al_{окс}$ (M_1 : La, Pr и др. РЗЭ), $M_2Al_{окс}$ (M_2 : Mg) и $M_1M_2Al_{окс}$ и $LiM_1M_2Al_{окс}$ в апротонных органических растворах солей лития, а также упростить технологию изготовления электродов подобного типа и повысить ее экологичность и экономическую эффективность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гладкова Е.Н. Теоретические основы и технология паротермического оксидирования. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1973. 103 с.
2. Зудова Л.А., Зудов А.И., Судакова Г.П. Состав, механизм роста и объемный заряд анодных пленок алюминия // Электрохимия. 1986. № 8. С. 123.
3. Файнштейн А.И., Кальницкий А.Г. Изменение поверхностного потенциала некоторых металлов при окислении на воздухе // Измерительная техника. 1980. № 5. 1. С. 56.
4. Колотыркин Я.М., Алексеев Ю.В. Теория самосогласования кинетики процессов со структурой электрического поля и характеристиками переходных слоев в системе пассивный металл – электролит // Защита металлов. 1997. Т. 33. № 1. С. 5-18.
5. К теории пассивности металлов с катионной проводимостью в пассивирующем слое. Учет сильного электрического поля // Электрохимия. 1994. Т. № 4. С. 473.

Попова Светлана Степановна –
доктор химических наук, профессор кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиала) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Svetlana S. Popova –
Dr. Sc., Professor
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State Technological Institute
(branch) of Yuri Gagarin State Technical University
of Saratov

Гусева Екатерина Станиславовна –
кандидат химических наук, докторант кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Ekaterina S. Guseva –
Ph. D., Doctoral candidate
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels State
Technological Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Францев Роман Константинович –
кандидат химических наук, кафедра
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Roman K. Frantsev –
Ph.D.,
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Жускеев Артем Романович –
аспирант кафедры
«Технология электрохимических производств»
Энгельсского технологического института
(филиал) Саратовского государственного
технического университета имени Гагарина Ю.А.

Artem R. Zhuskeev –
Postgraduate,
Department of Electrochemical Production
Technology, Engels Technological
Institute (branch) of
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.03.15, принята к опубликованию 10.11.15

Б.А. Семенов, Н.А. Озеров

ПОЛУЭМПИРИЧЕСКАЯ МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЛОКАЛЬНОГО ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПЛОСКОЙ СТЕНКИ НОРМАЛЬНО НАПРАВЛЕННОЙ ДВУМЕРНОЙ ТУРБУЛЕНТНОЙ ВОЗДУШНОЙ СТРУЕЙ

Обосновывается метод математической обработки экспериментальных данных о локальной интенсивности конвективного теплообмена при охлаждении плоской стенки нормально направленной двумерной (плоской) воздушной струей, позволивший создать математическую модель и обобщить массивы экспериментальных данных разных авторов в виде единой нормализованной функции, адекватно описывающей процесс в зоне торможения струи и в области развития пристенных течений.

Воздушная струя, плоская стенка, теплоотдача, интенсивность, экспериментальные данные, математическая модель

B.A. Semyonov, N.A. Ozerov

A SEMI-EMPIRICAL MATHEMATICAL MODEL FOR THE LOCAL HEAT TRANSFER AT COOLING FLAT WALLS BY TWO-DIMENSIONAL TURBULENT IMPINGING AIRJETS

The paper deals with a method for mathematical processing of experimental data on local intensity of convective heat transfer at cooling flat walls by impinging a two-dimensional air jet, which allows us to create a mathematical model and synthesize the amount of experimental data provided by different authors in the form of a single normalized function, which adequately describes the processes in the area of the airflow stagnation and wall-bounded flows.

Air jet, flat wall, heat transfer, intensity, experimental data, mathematical model

Введение. Способ продления эксплуатационного ресурса стекловаренных печей путем интенсивного охлаждения локальных зон наружной поверхности корродирующих огнеупорных стен нормально направленными плоскими воздушными струями считается одним из наиболее эффективных и широко используется в современной стекольной промышленности. Использование воздушного обдува способствует существенному продлению кампании стекловаренных печей, так как при этом снижается скорость высокотемпературных коррозионных процессов в огнеупорах за счет интенсивного отвода теплоты от зоны коррозии. Однако интенсификация теплоотвода в данном случае связана с увеличением скорости и расхода охлаждающего воздуха в сечении сопел, что может приводить к значительному росту эксплуатационных издержек производства за счет увеличения электропотребления нагнетателей системы обдува.

Для расчетного обоснования оптимальных условий и параметров струйного охлаждения необходимы адекватные математические модели локального теплообмена на обдуваемых поверхностях и основанные на них методики инженерного расчета. Однако анализ отечественной и зарубежной научной литературы показывает, что полученные разными авторами результаты аналитических и экспериментальных исследований аэродинамики и теплообмена при взаимодействии импактных струй с плоскими поверхностями существенно различаются между собой. Удовлетворительное совпадение теоретических зависимостей с экспериментальными данными наблюдается только в отдельных частных случаях: как правило, при небольших числах Рейнольдса $Re < 3 \cdot 10^4$, расположении сопла на значительном удалении от обдуваемой поверхности $z/B > 14$ [5], а также в области развитого пристенного течения, которая расположена далеко за пределами зоны торможения (стогнации) [1, 3, 5]. В то же время наибольший практический интерес представляет получение расчетных зависимостей, отражающих закономерности изменения интенсивности локального теплообмена в непосредственной близости к точке растекания струи, то есть как раз в зоне торможения струи и прима-

кающей к ней области, с которой начинается развитие пристенных течений, так как именно в этих местах интенсивность теплообмена максимальна.

Поэтому математическое моделирование теплообмена на поверхностях, охлаждаемых импактными воздушными струями, и получение адекватных зависимостей, необходимых для разработки инженерных методик расчета струйного охлаждения, представляется весьма актуальной научно-технической задачей, решение которой может быть полезным не только для стекольной, но и для многих других отраслей современного производства.

Для решения данной задачи в настоящей работе предложен метод, который позволил обобщить многочисленные экспериментальные данные разных авторов и создать на их основе полуэмпирическую математическую модель в виде единой нормализованной функции, адекватно описывающей процесс конвективного теплообмена как в зоне торможения струи, показанной на рис. 1, так и в примыкающей к ней области начала развития пристенного течения.

Общие положения. Согласно схеме рис. 1, при натекании нормально направленной воздушной струи на плоскую поверхность эта струя разделяется на две симметричные (относительно оси сопла) части, образуя продольные токи воздуха, омывающие поверхность стенки в двух противоположных направлениях.

Начальной точкой области теплообмена является центр зоны торможения струи (зоны стагнации), то есть точка с координатой $x = 0,0$, в которой происходит разделение потока на две части, а конечными точками являются нижняя и верхняя границы зоны обдува: $-x_s = -S/2$; $x_s = +S/2$. Полная ширина двухсторонней зоны теплообмена определяется разностью соответствующих значений x_s по оси ординат и составляет S , м.

Согласно [1], распределение локальных чисел Нуссельта по обдуваемой поверхности за пределами области торможения описывается следующим полуэмпирическим критериальным уравнением, полученным на основе теоретического решения [2]:

$$\text{Nu}_x = 0,0678 \cdot \text{Re}_B^{0,8} \cdot \text{Pr}^{0,4} (z/B)^{-0,6} \cdot (x/z)^{-0,37} \quad \text{при } x/z \leq 3, \quad (1)$$

где x – текущая координата, м, отсчитанная от центральной точки в направлении движения одной из частей разделенного потока вдоль обдуваемой поверхности; B – ширина плоского сопла, м; z – расстояние между соплом и обдуваемой поверхностью (экраном), м; Pr – число Прандтля при температуре струи на выходе из сопла; Re_B и Nu_x – соответственно число Рейнольдса по параметрам струи на выходе из сопла и локальное число Нуссельта в точке с текущей координатой x , рассчитываемые как

$$\text{Re}_B = U_0 \cdot B / \nu; \quad \text{Nu}_x = \alpha_x \cdot B / \lambda, \quad (2)$$

где U_0 – скорость истекающей воздушной струи в сечении сопла, м/с; ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с; α_x – локальный коэффициент конвективной теплоотдачи, Вт/(м²·°C), в точке x ; λ – теплопроводность воздуха при начальной температуре истечения, Вт/(м·°C).

Однако известно, что данное уравнение справедливо только для точек, расположенных на значительном удалении от оси удара струи в области развитого пристенного течения и совершенно не пригодно для адекватного описания локального теплообмена в наиболее интересной для практических целей зоне торможения струи, которая характеризуется максимальной интенсивностью теплоотдачи [3].

Предварительный анализ показывает, что при различных условиях обдува относительный размер зоны неадекватности уравнения (1) может находиться в пределах $0 < x_s / B \leq 6,0$. В то же время средний размер обдуваемых критических зон варочного бассейна стекловаренных печей по результатам натурных наблюдений составляет примерно $S = 0,1$ м [4], что при размерах сопел $B = 0,014 \div 0,005$ м ограничивает интересующую нас зону теплообмена относительными координатами $3,6 \leq x_s / B \leq 10$.

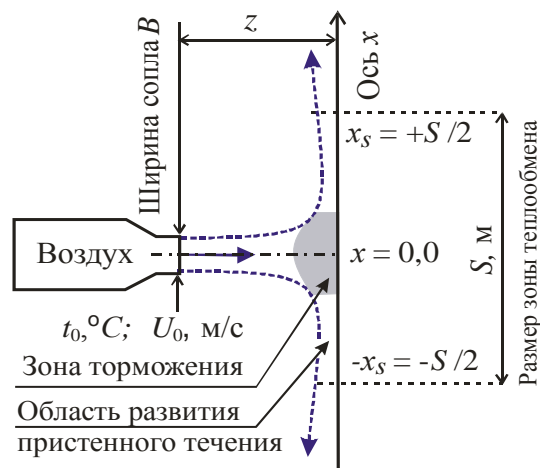


Рис. 1. Схема импактной струи, натекающей на плоскую стенку

Представленные цифры свидетельствуют о том, что размер наиболее важной с практической точки зрения критической зоны обдуваемых поверхностей стен варочного бассейна, требующей интенсивного теплоотвода, в большинстве случаев попадает в зону неадекватности уравнения (1). В связи с этим задача получения пригодного для инженерных расчетов адекватного математического описания локального теплообмена как в самой зоне торможения струи, так и в непосредственно прилегающей к ней последующей области развивающегося продольного течения, является особенно актуальной для стекольной промышленности. Попытка обоснованного решения данной задачи предлагается в настоящей работе.

Обоснование структуры математической модели. Известно, что максимальное значение локального числа Nu_0 имеет место в центре торможения струи, то есть в точке $x = 0$, с которой начинается растекание разделенной воздушной струи по поверхности. Согласно [1], при $z/B \geq 10$ это значение количественно определяется следующим полуэмпирическим критериальным уравнением:

$$Nu_0 = 1,42 \cdot Re_B^{0,58} \cdot Pr^{0,43} \cdot (z/B)^{-0,62} . \quad (3)$$

Разделив почленно выражение (1) на (3), получим уравнение асимптотической функции, к которой должна приближаться кривая реального распределения относительной интенсивности локального теплообмена Nu_x/Nu_0 по обдуваемой поверхности при $x/z \rightarrow \infty$, то есть по мере удаления от центральной точки области торможения:

$$Y = Nu_x/Nu_0 = 0,04775 \cdot Re_B^{0,22} \cdot Pr^{-0,03} \cdot (z/B)^{0,02} (x/z)^{-0,37} , \quad (4)$$

где Y – нормализованная асимптотическая функция, изменяющаяся в диапазоне от 0 до 1 и определяемая отношением

$$Y = Nu_x/Nu_0 . \quad (5)$$

Анализ уравнения (4) показывает, что число Прандтля и относительное расстояние между соплом и обдуваемой поверхностью, z/B , входящие в правую часть полученного уравнения в очень малых степенях, не могут оказывать существенного влияния на значение функции Y . Поэтому без особого ущерба для точности в данном случае можно принять допущение о том, что $Pr^{-0,03} = 1$ и $(z/B)^{0,02} = 1$, а незначительную погрешность, возникающую при варьировании этих факторов, условно отнести к категории случайной погрешности эксперимента.

Определение числовых коэффициентов. С учетом принятого допущения уравнение нормализованной асимптотической функции (4) было представлено в более простом виде:

$$Y = C \cdot k_z \cdot Re_B^{0,22} (x/z)^{-n} , \quad (6)$$

где C и n – соответственно коэффициент и показатель степени, определяемые экспериментально; k_z – дополнительный коэффициент, учитывающий экспериментально установленную поправку на влияние близости экрана при $z/B < 10$.

Фактические значения коэффициентов C , k_z и показателя степени n были определены нами на основе совместной математической обработки 299 элементов объединенного массива экспериментальных данных [1, 5, 6] с использованием принципа минимизации квадратов отклонений экспериментальных точек от расчетной кривой. Для этого была реализована стандартная процедура поиска минимума функции четырех переменных численным методом покоординатного спуска (метод Гаусса – Зайделя). Варьируемыми факторами при этом были три неизвестных параметра C , k_z , n , входящих в уравнение (6). Четвертой переменной была координата точки перегиба графика распределения локальной интенсивности теплообмена в нормализованных координатах, понятие о которой вводится ниже при описании процедуры нормализации координат.

В результате были получены следующие числовые значения: $C = 0,0476$ и $n = 0,3735$. Было получено также значение коэффициента $k_z = 1,086$ при $z/B = 8$, которое количественно подтвердило необходимость учета влияния близости экрана при относительных расстояниях между соплом и обдуваемой поверхностью $z/B < 10$. При относительных расстояниях $z/B \geq 10$, влияние близости экрана на характер распределения показателей интенсивности теплообмена по обдуваемой поверхности экспериментального подтвердилось, и поэтому при $z/B \geq 10$ было получено значение $k_z = 1$.

Обоснование процедуры нормализации координат. Впервые метод нормализации координат был обоснован нами и использован в [7], применительно к получению математического описания

процесса теплообмена в центре удара струи. Для реализации этого метода в условиях данной задачи введем обозначения:

$$X = x/z; \quad (7)$$

$$A = C \cdot k_z \cdot \text{Re}_B^{0,22}. \quad (8)$$

С учетом этих обозначений выражение нормализованной асимптотической функции (6) примет вид, наиболее удобный для математического анализа

$$Y = A \cdot X^{-n}. \quad (9)$$

Введем начальное условие: при $X = 0 \rightarrow Y = 1$. Это условие, по сути, является уравнением второй асимптоты, к которой должна стремиться реальная функция Y при $X \rightarrow 0$, то есть по мере приближения к точке разделения струи, натекающей на препятствие. Решив уравнение (9) при $Y = 1$, получим выражение, определяющее безразмерную координату точки условного пересечения двух указанных асимптот

$$X_0 = A^{1/n} = (C \cdot k_z \cdot \text{Re}^{0,22})^{1/n}. \quad (10)$$

С учетом вышеизложенного весь диапазон варьирования значений $0 < X < \infty$ можно представить состоящим из двух частей, в каждой из которых функция Y может упрощенно описываться соответствующей асимптотической функцией (11) или (12):

$$\text{– при } 0 < X < X_0 \quad \rightarrow \quad Y = 1; \quad (11)$$

$$\text{– при } X_0 < X < \infty \quad \rightarrow \quad Y = A \cdot X^{-n}. \quad (12)$$

Однако анализ экспериментальных данных [1, 5 и 6] показывает, что реальная функция распределения имеет более сложный характер, который графически интерпретируется непрерывной кривой с перегибом в некоторой точке X_0^* , координата которой, также найденная из условия минимизации квадратов отклонений совместно с коэффициентами C , k_z и n , соответствует значению

$$X_0^* = 1,8545 \cdot X_0. \quad (13)$$

Для количественного определения значения функции Y^* в точке перегиба с координатой X_0^* выполним преобразование уравнения (9), которое с учетом числового значения $n = 0,3735$ представим в виде

$$Y = A \cdot X_0^{-n} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{-n} = A \cdot \left(A^{1/n}\right)^{-n} \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{-n} = \left(\frac{X}{X_0}\right)^{-0,3735}. \quad (14)$$

Подставив в (14) значение $X = X_0^*$, определяемое условием (13), найдем значение функции Y^* , соответствующее точке перегиба кривой фактического распределения локальных чисел Нуссельта по обдуваемой поверхности

$$Y^* = 1,8545^{-0,3735} = 0,794. \quad (15)$$

Далее, продифференцировав (14), найдем значение первой производной функции Y в точке перегиба как

$$\frac{dY}{d(X/X_0)} = -0,3735 \cdot \left(\frac{X}{X_0}\right)^{-1,3735} = -0,3735 \cdot 1,9^{-1,3735} = -0,1599. \quad (16)$$

Для математического описания реального распределения относительных значений локальных чисел Нуссельта по обдуваемой поверхности на начальном участке (в непосредственной близости от центральной точки области торможения) используем подходящую по характеру аппроксимирующую функцию вида

$$Y = 1 - k \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right)^m, \text{ при } 0 < X < X_0^*, \quad (17)$$

где k и m – постоянные коэффициенты, числовые значения которых определим следующим образом.

Первая производная функции (17) будет иметь вид

$$Y' = \frac{dY}{d(X/X_0)} = -k \cdot m \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right)^{m-1}. \quad (18)$$

Подставив в выражения (17) и (18) значение функции $Y^* = 0,794$ и ее производной $Y' = -0,1599$ в точке перегиба с относительной координатой $X_0^*/X_0 = 1,8545$, получим следующую систему уравнений для определения двух неизвестных коэффициентов k и m аппроксимирующей функции (17):

$$\begin{cases} 1 - k \cdot 1,8545^m = 0,794 & \rightarrow & k \cdot 1,8545^m = 0,206 \\ k \cdot m \cdot 1,8545^{m-1} = 0,1599 & \rightarrow & 1,8545^{-1} \cdot m \cdot k \cdot 1,8545^m = 0,1599 \end{cases} \quad (19)$$

В результате решения этой системы были получены числовые значения: $m = 1,4396$; $k = 0,08467$, с учетом которых безразмерная функция (17) приобрела следующий конкретный вид, характеризующий распределение локальных чисел Нуссельта на начальном участке растекания плоской импактной струи вблизи центра зоны торможения:

$$Y_1 = 1 - 0,08467 \cdot \left(\frac{X}{X_0} \right)^{1,4396}, \text{ при } 0 < X/X_0 < 1,8545. \quad (20)$$

По мере удаления от центра торможения, после выхода растекающейся струи за пределы начального участка, то есть при $X/X_0 \geq 1,8545$, безразмерная функция распределения локальных чисел Нуссельта (20) плавно переходит в сопряженную кривую, описываемую уравнением (14), которое имеет вид

$$Y_2 = \left(\frac{X}{X_0} \right)^{-0,3735}, \text{ при } X/X_0 \geq 1,8545. \quad (21)$$

С учетом вышеизложенного было выдвинуто предположение о том, что совместное использование двух представленных выше безразмерных аппроксимирующих функций (20) и (21) позволит математически описать сложный многофакторный процесс локальной теплоотдачи, происходящий на плоской поверхности, обдуваемой нормально направленной воздушной струей, при помощи простой однофакторной сопряженной функции $Y_{1,2}$, график которой показан на рис. 2.

Из рис. 2 видно, что график функции $Y_{1,2} = f(X/X_0)$, построенный в нормализованных координатах, состоит из двух ветвей, обозначенных символами Y_1 и Y_2 , которые являются графиками соответствующих частных зависимостей (20) и (21), справедливых в пределах указанных областей обдуваемой поверхности и сопряженных в точке перегиба с координатой $X_0^* = 1,8545$.

Суть процедуры нормализации координат, использованной при построении графика рис. 2, заключается в переходе на иной масштаб измерения текущей координаты обдуваемой поверхности, связанном с заменой натурального линейного размера x , измеряемого метрами длины, формальным безразмерным параметром X/X_0 . При этом определяемая выражением (10) величина X_0 , являющаяся безразмерной координатой точки пересечения асимптот, принимается в качестве новой единицы измерения.

Полезный эффект от реализации описанной процедуры заключается в том, что предлагаемый метод позволяет получить однозначную картину подобия распределений локальных чисел Нуссельта по обдуваемой поверхности при различных значениях Re_B , Pr и z/B , которая хорошо иллюстрируется показанным на рис. 3 графиком распределения экспериментальных точек в нормализованной системе координат.

График, представленный на рис. 3, наглядно демонстрирует тесную корреляцию экспериментальных точек вокруг расчетной кривой однофакторной сопряженной нормализованной функции $Y_{1,2}$. Поэтому полученную функцию $Y_{1,2}$ удобно использовать в качестве обобщенной математической модели процесса теплообмена при струйном обдуве плоских поверхностей нормально направленной воздушной струей.

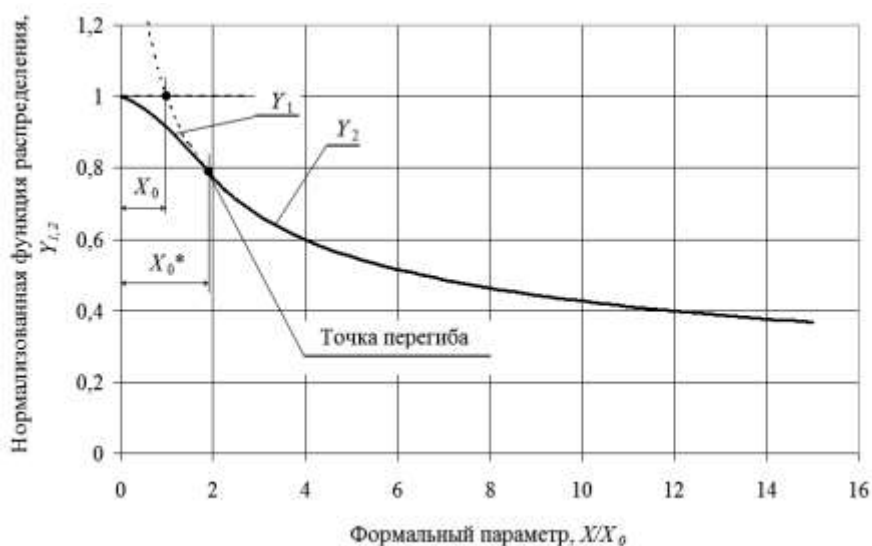


Рис. 2. Обобщенная функция распределения локальных чисел Нуссельта по обдуваемой поверхности в нормализованных координатах

Таким образом, можно констатировать, что предложенная методика нормализации координат позволила при различных условиях обдува, характеризуемых вариациями трех определяющих факторов, получить математическое описание исследуемого процесса на основе двух простейших сопряженных однофакторных зависимостей между безразмерными комплексами, образованными из этих факторов.

Вышеизложенное убедительно доказывает правомерность и подтверждает эффективность использования предложенного метода нормализации координат для построения аппроксимационных математических моделей локального теплообмена при струйном обдуве.

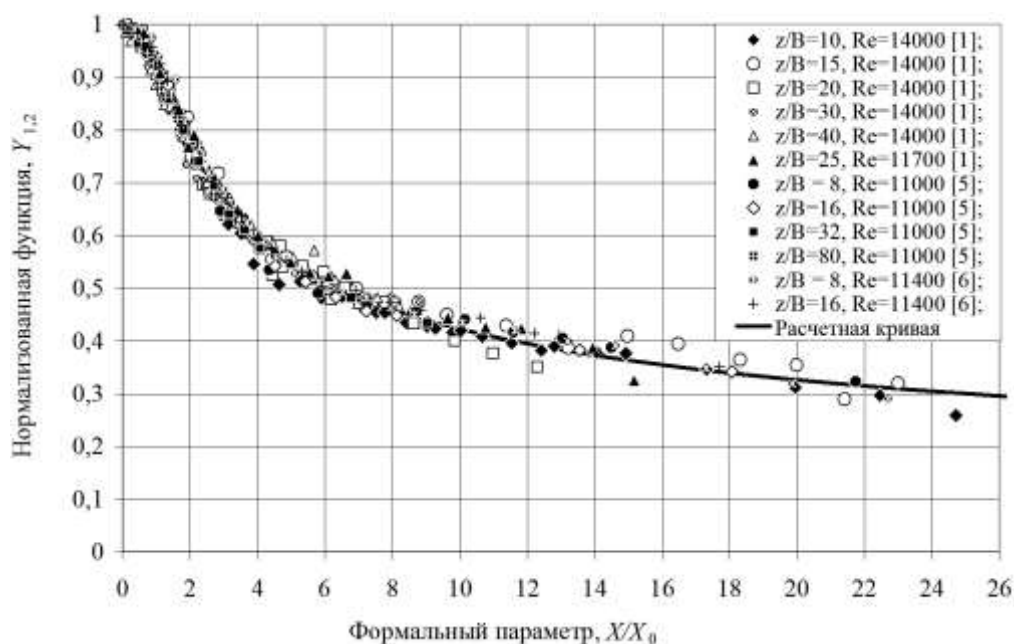


Рис. 3. Фактическое распределение экспериментальных данных [1, 5, 6] в нормализованных координатах

Дополнительно следует пояснить, что данные, использованные для построения экспериментальных точек на рис. 3, были получены авторами работ [1, 5, 6] принципиально различными спосо-

бами. В частности, экспериментальные данные [5] и [6] являются результатами непосредственного измерения локальных коэффициентов теплоотдачи на обдуваемой плоской поверхности при значении $Pr = 0,7$. Данные же [1] получены на основе серии опытов по сублимации нафталина, нанесенного на плоскую пластину, обдуваемую нормально направленной плоской воздушной струей. Поэтому в оригинале экспериментальные данные [1] представлены значениями локальных чисел Шервуда Sh , полученными при варьируемых параметрах Re_B , x/B и z/B и постоянном числе Шмидта $Sc = 2,5$. При этом правомерность использования данных [1], полученных в опытах по массообмену, для математического описания локального теплообмена обосновывается существующей аналогией между процессами тепло- и массообмена.

Оценка адекватности математической модели. Для формального подтверждения адекватности полученной сопряженной функции $Y_{1,2}$ были рассчитаны расхождения ΔY между расчетной кривой, показанной на рис. 3, и фактическими данными по всем 299 элементам объединенного массива данных, которые показаны точками на том же графике. По этим расхождениям были определены точечные статистические оценки:

- математическое ожидание погрешности аппроксимирования $\Delta Y_{cp} = -1,58 \cdot 10^{-5}$;
- среднеквадратичное отклонение отдельных погрешностей $\Delta S_Y = 1,91 \cdot 10^{-2}$;
- среднеквадратичное отклонение математического ожидания $\Delta S_{Ycp} = 1,1 \cdot 10^{-3}$.



Рис. 4. Гистограмма распределения погрешностей

Далее была построена десятиразрядная гистограмма распределения погрешностей, показанная на рис. 4, и реализована стандартная процедура проверки статистической гипотезы о нормальном распределении по критерию Пирсона. В связи с тем, что полученное фактическое значение критерия Пирсона $\chi^2 = 7,2$ меньше табличного ($\chi^2_{таб} = 14,067$ при 95-процентном уровне доверительной вероятности), можно считать, что отклонение отдельных погрешностей от математического ожидания в пределах данной выборки носит случайный характер и вполне согласуется с законом нормального распределения Гаусса.

С использованием полученных статистических оценок было рассчитано фактическое значение критерия Стьюдента, как $t = |\Delta Y_{cp} / \Delta S_{Ycp}| = 0,0143$.

Так как полученное фактическое значение критерия Стьюдента меньше табличной величины (которая в данном случае с 95% доверительной вероятностью равна 1,96), адекватность полученной нормализованной функции $Y_{1,2}$ может считаться статистически подтвержденным фактом в пределах исследованных диапазонов варьирования параметров:

$$11000 \leq Re_B \leq 14000;$$

$$8 \leq z/B \leq 80;$$

$$0 \leq x/B \leq 40;$$

$$0,7 \leq Pr (Sc) \leq 2,5.$$

Полученная математическая модель позволяет легко находить локальные значения коэффициентов теплоотдачи, а также чисел Шервуда, Sh_x , или Нуссельта, Nu_x , в любой точке обдуваемой поверхности с координатой, x/B , м, при известной ширине плоского сопла, B , м, расположенного на расстоянии z , м, от поверхности, и числе Re_B , рассчитанном по (2).

Для этого следует определить $X=x/z$ и вычислить X_0 по выражению (10) с учетом значений $C = 0,0476$, $n = 0,3735$ и $k_z = 1$ при $z/B \geq 10$ (или $k_z = 1,086$ при $z/B = 8$). Затем, используя формальный параметр X/X_0 , следует найти значение безразмерной функции $Y_{1,2}$ по графику рис. 2 или по одной из

формул (20) или (21) с учетом диапазонов их применимости, после чего локальные значения коэффициентов теплоотдачи α , Вт/(м²·°C), а также чисел Нуссельта или Шервуда могут быть определены как произведения

$$\alpha_x = \alpha_0 \cdot Y_{1,2}; \quad Nu_x = Nu_0 \cdot Y_{1,2}; \quad Sh_x = Sh_0 \cdot Y_{1,2}, \quad (22)$$

где α_0 , Nu_0 и Sh_0 – базовые значения коэффициента теплоотдачи, Вт/(м²·°C), числа Нуссельта или Шервуда в центре удара струи, которые могут приниматься по экспериментальным данным или при их отсутствии рассчитываться по методике [7].

Результаты многовариантных расчетов распределения локальных показателей интенсивности процессов тепло- и массообмена по обдуваемой плоской поверхности, выполненных по изложенной методике с использованием нормализованной функции и выражений (22) при значениях α_0 , (Sh_0), z/B , Re_B , Pr (Sc), соответствующих условиям опытов по тепло- и массообмену [5] и [1], представлены в виде графиков на рис. 5, 6. Для сравнения на этих же графиках точками показаны непосредственные данные экспериментов [5] и [1].

Сопоставление расчетных кривых, показанных на рис. 5 и рис. 6, с соответствующими экспериментальными точками наглядно демонстрирует хорошее количественное совпадение результатов.

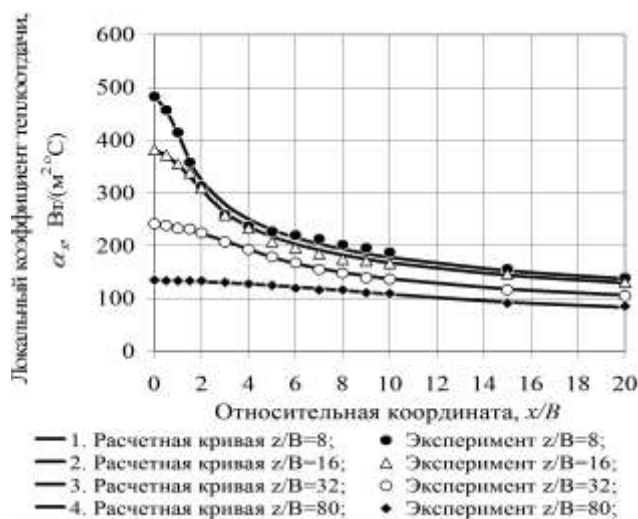


Рис. 5. Сравнение расчетного распределения локальных коэффициентов теплоотдачи с экспериментальными данными [5] при $Re_B = 11000$, $Pr = 0,7$

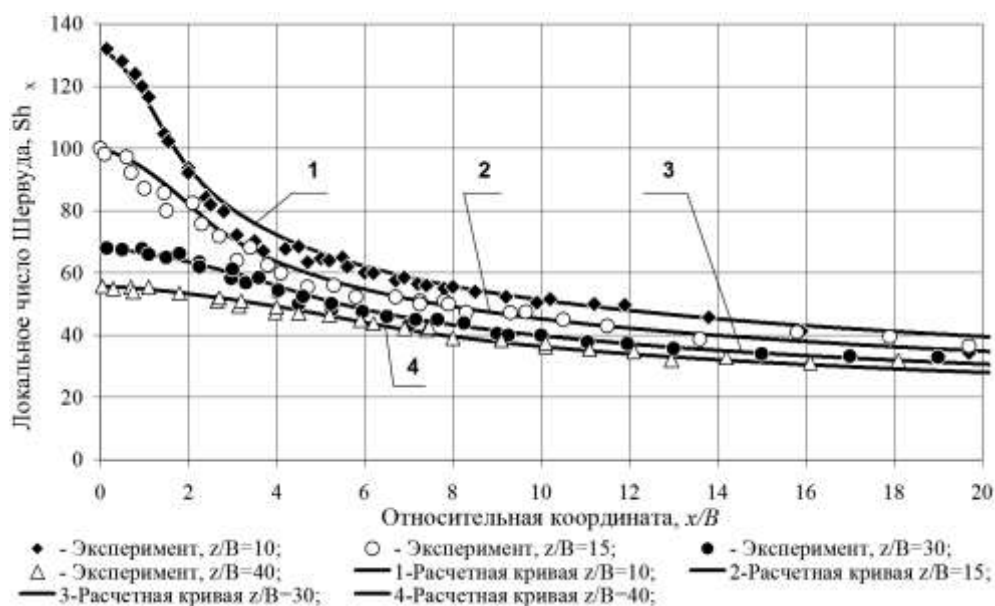


Рис. 6. Сравнение расчетного распределения локальных чисел Sh_x по обдуваемой поверхности с экспериментальными данными [1] при $Re_B = 14000$, $Sc = 2,5$

Представленные графики еще раз подтверждают правомерность использования полученной безразмерной нормализованной функции распределения локальных показателей интенсивности тепло- и массообменных процессов по обдуваемой плоской поверхности в качестве единой математической модели, адекватно описывающей эти процессы в указанных диапазонах варьирования параметров как в непосредственной близости к центру торможения, так и в последующей начальной области пристенного течения.

Представленные графики свидетельствуют также о надежности результатов инженерного расчета, который может выполняться по разработанной методике применительно к любым случаям охлаждения плоских поверхностей нормально направленной плоской воздушной струей с погрешностью, не превышающей $\pm 6\%$.

Заключение. Обоснован метод математической обработки экспериментальных данных, основанный на принципе нормализации координат, практическая реализация которого позволила обобщить массивы экспериментальных данных разных авторов и получить адекватную математическую модель для количественного описания распределения относительных показателей интенсивности локального тепло- и массообмена по плоской поверхности, обдуваемой плоской воздушной струей, направленной по нормали к обдуваемой поверхности.

В отличие от известных зависимостей, используемых в инженерных расчетах, полученная математическая модель хорошо согласуется с экспериментальными данными не только в области развитого пристенного течения, но и в наиболее интересной для практики зоне торможения струи и прилегающей к ней начальной области пристенного течения.

В результате статистического анализа подтверждено, что распределение отклонений всех 299 экспериментальных точек от расчетной кривой хорошо согласуется с нормальным законом распределения Гаусса, центр распределения погрешности отклоняется от нулевого значения не более чем на 0,11%, а максимальная погрешность математической модели при этом не превышает 6%, что позволяет рекомендовать ее для инженерных расчетов в исследованных диапазонах варьирования параметров.

Работа выполнена в рамках государственного задания при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ.

Work carried out in the framework of the state task with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation.

ЛИТЕРАТУРА

1. Kumada M., Mabuchi J. Studies on the heat transfer of impinging jet (1st Rep.) // Bull JSME. 1970. 13. № 55. P. 77-85.
2. Meyers G.E., Schauer J.J., Eustis R.H. Heat Transfer to Plane Turbulent Wall Jets // Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME. Ser. C. Vol. 85. № 3 (1963-8). P. 209-214.
3. Дыбан Е.П., Мазур А.И. Конвективный теплообмен при струйном обтекании тел. Киев: Наукова думка, 1982. 303 с.
4. Озеров Н.А. Продление эксплуатационного ресурса стекловаренных печей на основе интенсификации теплообмена в системе регулируемого охлаждения огнеупорных стен варочного бассейна: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.04. Саратов, 2013. 20 с.
5. Gardon R., Akfirat J.C. Heat transfer characteristics of impinging two-dimensional air jets // Journal of Heat Transfer, Transactions of the ASME. February 1966. P. 101-108.
6. Cadek F.F. A Fundamental Investigation of Jet Impingement Heat Transfer // Thesis Univ. Cincinnati, 1968. P. 40.
7. Семенов Б.А., Озеров Н.А. Локальный теплообмен в центре удара плоской воздушной струи, растекающейся по плоской поверхности // Вестник СГТУ. 2014. № 2 (75). С. 148-156.

Семенов Борис Александрович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Boris A. Semyonov – Dr.Sc., Professor
Head: Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Озеров Никита Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Nikita A. Ozerov – Ph.D., Associate Professor
Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 10.03.15, принята к опубликованию 10.11.15

В.Ф. Симонов, А.А. Селиванов, А.Н. Мракин, А.А. Морев

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КИНЕТИЧЕСКИХ КОНСТАНТ ВЫДЕЛЕНИЯ ГАЗОВЫХ ПРОДУКТОВ ПРИ ТЕРМОДЕСТРУКЦИИ СЕРНИСТОГО ГОРЮЧЕГО СЛАНЦА

Рассматриваются вопросы определения кинетических констант (энергии активации и предэкспоненциального множителя), характеризующих процесс выделения газовых продуктов при полукоксовании сернистого горючего сланца в установках с твердым (зольным) теплоносителем.

Горючий сланец, зольный теплоноситель, энергия активации, полукоксование, газ

V.F. Simonov, A.A. Selivanov, A.N. Mrakin, A.A. Morev

KINETIC PARAMETERS OF GAS EVOLUTION DURING SULFUR OIL SHALE PYROLYSIS

The paper deals with determination of kinetic constants (activation of energy and pre-exponential factor) characterizing the process of extracting gas products at sulfur oil shale semi-coking in plants with a solid (ash) coolant.

Oil shale, ash coolant, activation energy, semi-coking, gas

Краткий обзор работ по изучению кинетики термического разложения органического вещества горючих сланцев, проведенный в [1], показывает, что создание математической модели, позволяющей на основе химического состава горючего сланца и его строения предсказать протекание процесса термолиза и определить состав продуктов, является в настоящее время одной из основных проблем в исследовании термодеструкции топлив.

Для создания математической модели процесса термического разложения сернистого сланца (полукоксования) по законам формальной химической кинетики необходимо: 1) задать систему кинетических параметров, описывающих кинетику выхода суммарных летучих продуктов полукоксования сланца; 2) определить исходный состав функциональных групп в сланце; 3) найти зависимость температуры сланцевых частиц от времени.

К настоящему времени нет достаточно строгой теории, которая позволила бы на основе химического состава горючих сланцев и их структуры предсказать протекание процесса термолиза и определить состав его продуктов. Поэтому в большинстве случаев термолиз каждого конкретного сланца изучается экспериментально, выясняется влияние параметров процесса на состав и выход его продуктов. Затем с помощью теории дается качественная интерпретация полученных результатов и строится более или менее адекватная модель процесса.

Вместе с тем общепризнанно, что структура макромолекулы органического вещества сланца в значительной степени зависит от содержания серы, азота, кислорода и их соотношений. Именно эти элементы чаще всего формируют боковые радикалы водородно-углеродной основы макромолекулы и определяют состав продуктов первичного термического разложения. Как правило, органические вещества сланцев различных месторождений по этим показателям сильно различаются.

В данной работе кинетические параметры модели подбирались таким образом, чтобы дать количественную интерпретацию имеющихся экспериментальных данных по полукоксованию сернистого горючего сланца. Значения этих параметров не связаны со строением сланца, их элементарным составом и не могут быть использованы для моделирования термолиза сланцев различных месторождений.

Технологическая эффективность последующего процесса каталитического преобразования парогазовой смеси (ПГС) определяется во многом качественными и расходными характеристиками доставляемых в этот процесс парогазовых продуктов полукоксования сернистого сланца. Имеющийся экспериментальный материал по полукоксованию сернистого сланца в УТТ носит разовый случай-

ный характер и не может быть использован для глубокого анализа влияния исходного материала на показатели термокаталитического преобразования. В связи с этим нами предпринята попытка на первом этапе работы описать процесс полукоксования сернистого сланца в УТТ на основе соотношений формальной химической кинетики. В основу описания положен экспериментальный материал, представленный в [2].

Опыты проводились на стендовой установке с твердым теплоносителем пропускной способностью 15 кг/ч сланца. Эта установка моделирует контур полукоксования промышленного процесса.

В табл. 1 на основе [2] представлены основные результаты экспериментального полукоксования.

Таблица 1

Результаты балансовых опытов по полукоксованию сланца и выход продуктов термолитиза

Показатель, ед. изм.	Номер опыта	
	1	2
Температура в технологической топке, °С	640	680
Температура теплоносителя, °С	618	652
Соотношение теплоноситель/сланец	3,5	2,75
Выход продуктов, % на сухой сланец		
– смола	20,62	18,60
– газ	7,9	9,1
– пирогенная вода	6,06	5,34
– всего летучих	34,58	33,04
– коксозольный остаток	65,42	66,96
– органическое вещество в коксозольном остатке	6,82	8,36

В связи с небольшим объемом экспериментального материала ЭНИН им. Г.М. Кржижановского использовались также данные по полукоксованию Коцебинского сланца в псевдоожиженном слое [3]. В табл. 2 представлена характеристика сланца Коцебинского месторождения по [3] и Перелюб-Благодатовского месторождения – по [2], а в табл. 3 – основные результаты эксперимента.

В табл. 4 приведены условия проведения процесса полукоксования в псевдоожиженном слое по данным [3].

Таблица 2

Характеристика проб сланца

Показатель, ед. изм.	Месторождение	
	Коцебинское	Перелюб-Благодатовское
Влажность, %	7,39	8,93
Зольность на сухую массу, %	58,14	47,1
Углекислота карбонатная, %	14,6	11,3
Условная органическая масса (по разности), %	27,26	41,4
Сера общая, %	5,09	5,23
Высшая теплота сгорания, МДж/кг	6,16	13,50
Выход смолы по Фишеру, %	11,2	19,4

Таблица 3

Результаты балансовых опытов по полукоксованию сланца (без учета теплоносителя)

Расходные составляющие материального баланса, кг/ 100 кг сухого сланца	Температура парогазовой смеси в реакторе полукоксования, °С		
	515	575	595
Полукок	70,0	67,7	63,0
Унос	2,8	2,4	3,1
Летучие	19,46	21,72	23,2
– смола (сырая)	5,5	5,05	4,7
– пирогенная вода	10,9	12,9	14,1
– сланцевый бензин	0,96	1,08	1,22
– высококипящая смола	1,0	0,69	0,48
– газ полукоксования	1,1	2,0	2,7

Условия проведения опытов полукоксования сланца в псевдооживленном слое

Показатель, ед. изм.	Номер опыта		
	4	5	6
Расход сухого сланца, кг/ч	3,74	3,59	4,01
Время полукоксования, мин.	14,25	15,5	8,9
Температура парогазовой смеси в реакторе полукоксования, °С	515	575	595

В соответствии с положениями химической кинетики скорость образования суммарных летучих продуктов при полукоксовании сланца может быть записана в виде

$$\frac{dg_i}{d\tau_i} = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot \left(g_0 - \sum_{i=0}^{i-1} g_i \right), \quad (1)$$

где dg_i – количество образующихся летучих продуктов за время $d\tau_i$ на i -м участке расчета от начала разложения, кг/100 кг сухого сланца; K_0 – предэкспоненциальный множитель, 1/ч; E – энергия активации, кДж/кг·моль; R – универсальная газовая постоянная, кДж/кг·моль·К; T – температура термического разложения (средняя по массе подвергающихся полукоксованию частиц сланца), К; g_0 – начальное содержание условного органического вещества в сухом сланце, кг / 100 кг сухого сланца.

Уравнение (1) может быть преобразовано в более простой вид при переходе от бесконечно малых расчетных участков по времени к конечным значениям $\Delta\tau$:

$$\frac{g}{\Delta\tau} = K_0 \cdot e^{-\frac{E}{RT}} \cdot (g_0 - g). \quad (2)$$

Последнее выражение (2) удобно для выявления характера зависимости (1) и обработки для этих целей экспериментальных данных. Из (2) получаем

$$\ln \frac{g}{\Delta\tau} = \ln K_0 - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T} + \ln(g_0 - g), \quad (3)$$

$$\ln \frac{g}{\Delta\tau} - \ln(g_0 - g) = \ln K_0 - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T}, \quad (4)$$

$$\ln \left(\frac{g}{\Delta\tau} \cdot \frac{1}{g_0 - g} \right) = \ln K_0 - \frac{E}{R} \cdot \frac{1}{T}. \quad (5)$$

Привлечение имеющихся экспериментальных материалов по полукоксованию сернистого сланца в УТТ и наших данных позволило получить следующие описания кинетических зависимостей, представленных на рис. 1.

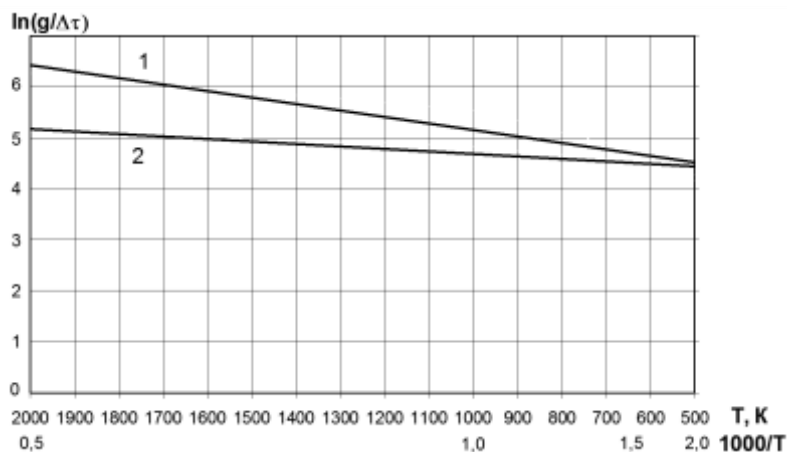


Рис. 1. Результаты обработки экспериментальных данных [2, 3] в кинетических координатах: 1 – при $K_0 = 55,7$ 1/ч и $E = 1400$ кДж/кг·моль·К; 2 – при $K_0 = 17,46$ 1/ч и $E = 560$ кДж/кг·моль·К

По результатам обработки рис. 1 получены следующие уравнения: для линии 1 – $\frac{g}{\Delta\tau} = 55,7 \cdot e^{-\frac{1400}{RT}} \cdot (g_0 - g)$; для линии 2 – $\frac{g}{\Delta\tau} = 17,46 \cdot e^{-\frac{560}{RT}} \cdot (g_0 - g)$.

При $g_0 = 41,4$ кг / 100 кг сухого сланца, $T = 765$ и $\tau = 0,33$ ч (условия полукоксования сланца в УТТ) имеем $g = 31,0$ или $g = 30,5$ в зависимости от принятого расчетного уравнения и значения кинетических констант (фактическое значение $g_{\text{экс}} = 30,22$). Таким образом погрешность описания по выходу летучих с использованием линии 2 составляет менее 1%, соответствующее уравнение принимается для дальнейшего использования.

Полученное описание процесса термического разложения горючего сланца необходимо трансформировать с целью определения кинетики выделения отдельных компонентов летучих продуктов. К сожалению, экспериментальных данных такого содержания по сернистым горючим сланцам Поволжья нет. В связи с этим нами использованы на первом этапе исследования данные по выходу отдельных компонентов газа для прибалтийских сланцев [4] в зависимости от температуры (см. табл. 5) и в графической форме представлены на рис. 2.

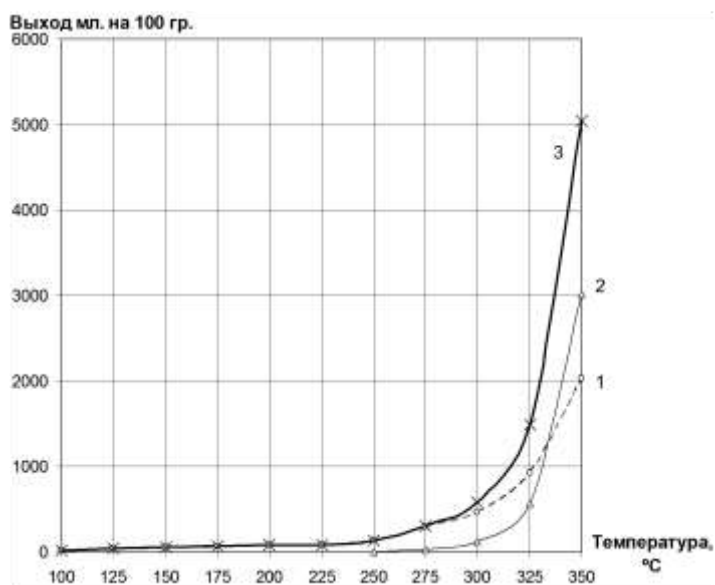


Рис. 2. Выход компонентов газа и суммарного полукоксового газа, мл/100 г органического вещества: 1 – $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$; 2 – $\text{C}_n\text{H}_m + \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2$; 3 – общее количество газа (нарастающий итог)

Таблица 5

Количество газа, выделившееся на 100 г органического вещества сланца при атмосферном давлении, мл (продолжительность интервала $\tau > 50$ ч)

Температурный интервал, °C	Компоненты				Общее количество газа	Общее количество газа (нарастающий итог)
	$\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{S}$		$\text{C}_n\text{H}_m + \text{CH}_4 + \text{CO} + \text{H}_2$			
	в интервале температур	нарастающий итог	в интервале температур	нарастающий итог		
до 100	19				19	
100-125	20	39			20	39
125-150	13	52			13	52
150-175	11	63			11	63
175-200	12	75			12	75
200-225	6	81			6	81
225-250	46	127	6		52	133
250-275	159	286	17	23	176	309
275-300	180	466	93	116	273	582
300-325	457	923	454	570	911	1493
325-350	1106	2029	2446	3016	3552	5045
350-375	339	2368	2197	5213	2536	7581
375-400	81	2449	1930	7143	2011	9592
400-425	18	2467	252	7395	270	9862

По данным рис. 2 и табл. 4 можно заключить:

Основная часть компонентов газа (CO_2 , H_2S) и водяных паров выделяется из органического вещества сланца при температуре до 350°C . При дальнейшем увеличении температуры и времени полукоксования выход этих компонентов в абсолютном выражении может быть принят постоянным.

Выделение CH_4 и H_2 ощутимо продолжается до 400°C , и темпы прироста их абсолютного выхода при дальнейшем увеличении температуры и времени разложения сопоставимы с общим выходом летучих продуктов.

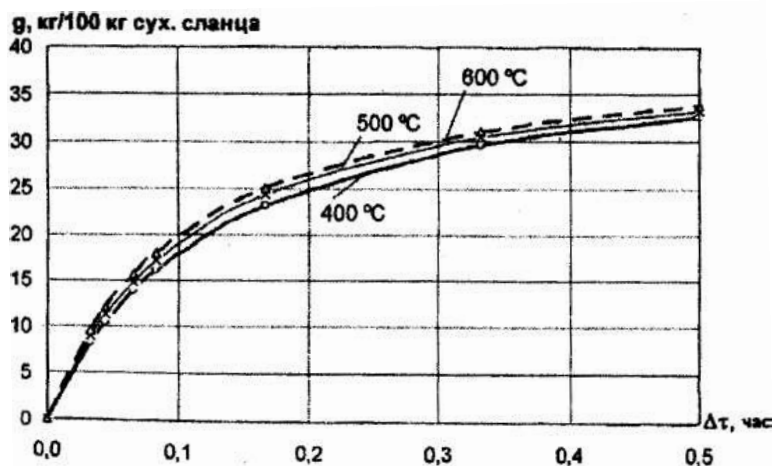


Рис. 3. Выход летучих продуктов полукоксования, определенный при $K_0 = 17,45$ 1/час и $E = 560$ кДж/кг·моль·К и экспериментальные значения по [2, 3]

Для уточнения количественных характеристик этих процессов произведен расчет по уравнению для линии 2 на рис. 1 выхода летучих при переменных значениях температур нагрева сланца. В первом приближении принято линейное изменение средних сланцевых кусков на начальном участке обработки в барабанном реакторе УТТ (скорость нагрева 80 К/мин и будет уточнена при последующем развитии работы). Результаты представлены на рис. 3 и сопоставлены с выходом летучих продуктов в УТТ по данным ЭНИН им. Г.М. Кржижановского.

Выводы

1. На основе опубликованных экспериментальных данных разработано математическое описание процесса полукоксования сернистого горючего сланца на основе соотношений формальной химической кинетики.
2. Предложено разделять суммарный выход летучих веществ на три группы компонентов: газы дезоксидации, оксид углерода и углеводородные газы, смола полукоксования.
3. Сопоставление расчетных и экспериментальных данных по выходу летучих веществ показало удовлетворительную сходимость.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства Республики Татарстан в рамках научного проекта №15-48-02313 «р_поволжье_a».

ЛИТЕРАТУРА

1. Термическая переработка сланца – кукурсита / под ред. М.Я. Губергрица. Таллин: Валгус, 1966. 365 с.
2. Определение основных технологических параметров термической переработки сланца Перелюб-Благодатовского месторождения на стендовой установке с твердым теплоносителем (УТТ) / Е.И. Казаков, В.И. Мамай, В.А. Мишанин, Ю.В. Спирин, Г.П. Стельмах // Исследования в области комплексного энерготехнологического использования топлива: межвуз. науч. сб. Саратов: СГВ, 1982. С. 101-105.

3. Симонов В.Ф., Прелатов В.Г. Исследования термической переработки сернистого сланца в псевдооживленном слое // Комплексное использование тепла и топлива в промышленности: межвуз. науч. сб. Саратов: СГТУ, 2000. С. 21-25.

4. Фомина А.С., Побуль Л.Я., Дегтерева З.А. Природа керогена прибалтийского горючего сланца-кукерсита и его химические сырьевые качества. Таллин: АН Эстонской ССР, 1965. 215 с.

Симонов Вениамин Федорович – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Veniamin F. Simonov – Dr. Sc., Professor
Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Селиванов Алексей Александрович – ассистент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksey A. Selivanov – Assistant Lecturer
Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Мракин Антон Николаевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Anton N. Mrakin – Ph.D., Associate Professor
Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Морев Александр Александрович – кандидат технических наук, ассистент кафедры «Промышленная теплотехника» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr A. Morev – Ph.D., Assistant Lecturer
Department of Industrial Thermal Engineering,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.04.15, принята к опубликованию 10.11.15

УДК 621.6.036

А.П. Усачев, А.В. Рулев, Е.Ю. Усачева

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ УСЛОВИЙ В ИСПАРИТЕЛЕ И КОНДЕНСАТОРЕ ТЕПЛОНАСОСНЫХ СУШИЛОК, РАБОТАЮЩИХ НА НЕАЗЕОТРОПНЫХ УГЛЕВОДОРОДНЫХ СМЕСЯХ

Предложена конструкция теплонасосной воздушной сушилки, использующей в качестве рабочего агента неазеотропную смесь предельных углеводородов состава 40 мол. % R290 и 60 мол. % R601a и реализующей принцип противоточного теплообменника с переменной температурой как рабочего, так и сушильного агентов. Для определения температурных условий кипения и конденсации неазеотропной смеси R290 и R601a в испарителе и конденсаторе тепловых насосов получены расчетные формулы, согласно которым построена диаграмма «температура – состав» указанной смеси при давлениях 0,4 и 0,6 МПа и различных концентрациях R290 в смеси.

Температурные условия, теплонасосная сушилка, испаритель, конденсатор, неазеотропная углеводородная смесь, рабочий и сушильный агенты, осушка воздуха

A.P. Usachev, A.V. Rulev, E.Yu. Usacheva

A STUDY OF TEMPERATURE CONDITIONS IN EVAPORATORS AND CONDENSERS OF HEAT PUMP DRYERS OPERATING ON NON-AZEOTROPIC HYDROCARBON MIXTURES

The proposed design of heat pump air dryers that uses for the working agent a non-azeotropic mixture of saturated hydrocarbon composition of 40 mol. % R290 and 60 mol. % R601a, and implements the principle of counter flow heat exchanger with the temperature variable for both production and drying agents. To determine the temperature under the boiling and condensation non-azeotropic mixtures of R290 and R601a in the evaporator and condenser heat pumps formulas, which helped in constructing the "temperature-composition" diagram for the given mixture at 0.4 and 0.6 MPa pressures and different R290 concentrations in the mixture.

Temperature conditions, a study of heat pump dryer, evaporator, condenser, non-azeotropic hydrocarbon mixture, working and drying agents, dehydration of the air

Значительный расход энергетических и материальных ресурсов строительных и сельскохозяйственных предприятий приходится на сушку древесины, керамических изделий, травянистых кормов, зерна и ряда других материалов.

Анализ работ [1-4] показывает, что наиболее эффективная и качественная сушка указанной продукции может быть обеспечена с помощью тепловых насосов.

В целях повышения энергоэффективности процессов сушки предложена схема теплонасосной сушилки, реализующей цикл с переменными температурами. Схема теплонасосной сушилки с приводом от газового двигателя внутреннего сгорания показана на рис. 1. Такой тип привода дан только в качестве примера. Выбор типа привода имеет важное значение и осуществляется в каждом конкретном случае индивидуально.

В предлагаемой конструкции теплонасосной сушилки нагрев воздуха до 70°C (343 К) осуществляется в устройстве с полной рециркуляцией воздушного сушильного агента (рис. 1), использующего в качестве рабочего агента неазеотропную смесь углеводородов, реализующих цикл с переменной температурой как рабочих, так и сушильных агентов.

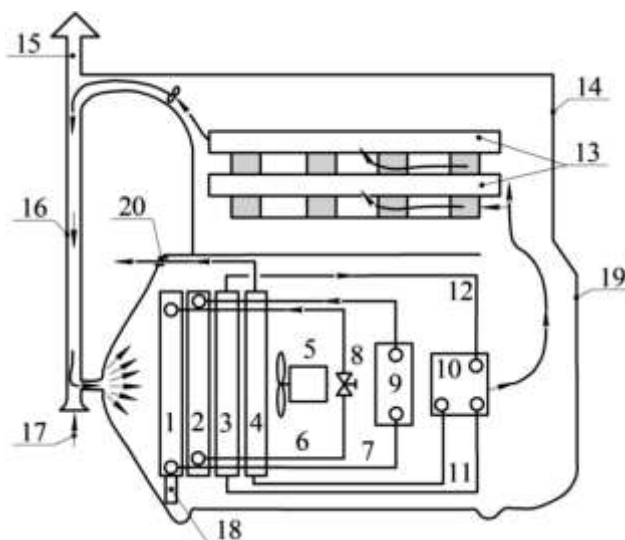


Рис. 1. Схема теплонасосной сушилки, работающей на неазеотропной смеси углеводородов, с приводом от газового двигателя внутреннего сгорания:
 1 и 2 – испаритель и конденсатор ТНУ; 3, 4 – теплообменники системы охлаждения двигателя и дымовых газов; 5 – вентилятор; 6, 7, 11, 12 – трубопроводная обвязка оборудования;
 8 – дросселирующий вентиль; 9 – компрессор; 10 – двигатель внутреннего сгорания;
 13 – высушиваемый материал; 14 – сушильная камера; 15, 17 – каналы для выброса и забора воздуха; 16 – рециркуляционный канал; 18 – сливной патрубок образовавшегося в испарителе конденсата; 19 – корпус теплового насоса; 20 – выход охлажденных дымовых газов

Наибольшая энергетическая и экономическая эффективность тепловых насосов, работающих на рабочих агентах и реализующих цикл с переменными температурами, достигается при осушке уходящего из сушилки воздуха с высокой относительной влажностью (30 и более %). Средний срок окупаемости таких устройств согласно [1, 5, 6] составляет 3-4 года.

По сравнению с сушилками, использующими рециркуляцию или теплообменники-рекуператоры [7], такие схемы обеспечивают следующие преимущества: 1) значительно увеличивается количество теплоты конденсации водяных паров за счет более глубокой осушки воздуха; 2) уменьшается средний температурный напор между воздухом в сушилках и окружающей средой за счет подбора смесей рабочих агентов с переменными температурами кипения и конденсации и организацией, таким образом, принципа противоточного теплообменника.

Рабочие вещества, используемые в теплонасосных сушилках, не должны разрушать озоновый слой атмосферы, оказывать негативное влияние на потепление климата; должны быть экономичными, энергоэффективными и иметь температурные условия кипения и конденсации, наиболее приемлемые для процессов сушки древесины, травы, зерна и аналогичных материалов. В наибольшей степени этим требованиям соответствуют сжиженные углеводородные смеси, состоящие из 40 мол.% R290 (пропана) и 60 мол.% R601a (изопентана). По степени активности разрушения озонового слоя Земли R290 и R601a считаются полностью озонобезопасными. Данные газы не вызывают парникового эффекта и не оказывают негативного влияния на потепление климата. Низкокипящий компонент R290 имеет температуру кипения при атмосферном давлении $t = \text{минус } 40^\circ\text{C}$, а высококипящий компонент R601a – температуру $t = \text{плюс } 27,85^\circ\text{C}$.

Низкотемпературные сушилки (рис. 1) представляют собой камеру 14, внутри которой высушиваемый материал 13 укладывается таким образом, чтобы обеспечить доступ теплого сухого воздуха ко всем частям высушиваемого материала. Иногда высушиваемая продукция передвигается с помощью ленточного транспортера. В ряде случаев используются сушка во вращающемся барабане или реализуется принцип кипящего слоя.

Начальная влажность воздуха, подаваемого в сушилку, составляет 8-10 масс.%. Циркулируя через слои высушиваемой продукции с помощью осевых вентиляторов, воздух постепенно остывает и повышает свою влажность до 70-80%.

Отработанный влажный воздух через рециркуляционный канал 16 поступает в корпус 19 теплового насоса. Выходящий из канала 16 сушилки воздух с температурой 62°C (435 К) и относительной влажностью 45% сначала охлаждается до температуры 38°C (311К) в испарителе 1. При этом он увеличивает свою влажность до 100% и выделяет скрытую теплоту конденсации водяных паров. Образовавшийся конденсат удаляется через сливной патрубок 18 в систему водоотведения. Затем воздух нагревается в конденсаторе 2, увеличивая свою температуру до 70°C (343 К). Работу газомоторного теплового насоса можно понять непосредственно из схемы (см. рис. 1).

Процессы кипения и конденсации неазеотропных смесей происходят при переменных температурах. Это обстоятельство позволяет использовать их при нагревании и охлаждении окружающих сред с ограниченной теплоемкостью типа вода – воздух. При этом значительно уменьшаются необратимые потери в процессах теплообмена и достигается увеличение конечной температуры окружающей среды, особенно при использовании испарителя 1 и конденсатора 2 с противоточным течением через них неазеотропной смеси и сушильного агента.

При оценке тепловой эффективности тепловых насосов, работающих на насыщенных неазеотропных смесях, первостепенным вопросом является определение температурных условий в процессе их кипения и конденсации в испарителе 1 и конденсаторе 2. Поскольку смеси R290 и R601a отвечают условиям идеальных растворов, молярное содержание R290 в жидкой ($\psi_{1ж}$) и в паровой ($\psi_{1п}$) фазах находятся на основе законов Рауля и Дальтона [8]. С целью удобства и простоты записи в формулах (1)-(10) введем следующие обозначения компонентов: R290 – 1; R601a – 2. Например, давление насыщенных паров P_{R290} будет обозначено как P_1 , а P_{R601a} будет обозначено как P_2 . Тогда молярное содержание R290 в жидкой ($\psi_{1ж}$) и в паровой ($\psi_{1п}$) фазах, согласно законам Рауля и Дальтона, будет записано следующим образом:

$$\psi_{1ж} = \frac{(P_c - P_2)}{(P_1 - P_2)}; \quad (1)$$

$$\Psi_{1n} = \frac{P_1(P_c - P_2)}{P_c(P_1 - P_2)}, \quad (2)$$

где P_c – абсолютное общее давление смеси, Па·10⁵; P_1, P_2 – давление насыщенных паров R290 (пропана) и R601a (изопентана), Па·10⁵.

Давление насыщенных паров этих углеводородов определяется как функция от температуры по формуле Антуана [9]:

$$P_1 = 10^{A_1 - \frac{B_1}{C_1 + t}}, \quad (3)$$

$$P_2 = 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}}, \quad (4)$$

где P – абсолютное давление, Па·10⁵; A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 – коэффициенты, характерные для предельных углеводородов R290 и R601a, в определенных пределах температуры; t – температура кипения индивидуального углеводорода (R290 и R601a), °C.

На основании наиболее точных экспериментальных данных по давлению насыщенных паров R290 и R601a в [10] подобраны коэффициенты A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2 , приведенные в формулах (3) и (4). Подставляя формулы (3) и (4) для подсчета давления насыщенных паров R290 и R601a в выражения (1) и (2), получим

$$\Psi_{1ж} = \frac{\left(P_c - 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}} \right)}{\left(10^{A_1 - \frac{B_1}{C_1 + t}} - 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}} \right)}; \quad (5)$$

$$\Psi_{1n} = \frac{10^{A_1 - \frac{B_1}{C_1 + t}} \left(P_c - 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}} \right)}{P_c \left(10^{A_1 - \frac{B_1}{C_1 + t}} - 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}} \right)}. \quad (6)$$

По формулам (5) и (6) построена диаграмма «температура – состав» (рис. 2) кривых кипения и конденсации смеси R290 и R601a при давлениях 0,4 и 0,6 МПа и различных концентрациях R290 в смеси.

Процесс кипения и конденсации смеси в трубных змеевиках испарителя 1 и конденсатора 2 теплового насоса происходит при неизменном составе. На диаграмме «температура – состав» (рис. 2) процесс кипения смеси, содержащей 40 мол. % R290 при давлении $P_c = 0,4$ МПа изобразится вертикальным отрезком 1-2. При этом температура смеси (с) в испарителе (и) повысится от начальной (н) $t_{сн}^u = 26^\circ\text{C}$ (температура насыщенной жидкости) до конечной (к) $t_{ск}^u = 58^\circ\text{C}$ (температура насыщенного пара).

Процесс конденсации смеси, содержащей 40 мол. % R290 при давлении $P_c = 0,6$ Мпа, изобразится вертикальным отрезком 3-4. При этом температура смеси в конденсаторе (кд) понизится с начальной (н) $t_{сн}^{кд} = 74^\circ\text{C}$ (температура насыщенного пара) до конечной (к) $t_{ск}^{кд} = 42^\circ\text{C}$ (температура насыщенной жидкости).

При оценке энергетической эффективности исследуемых теплонасосных сушилок важно знать характер изменения температуры кипения t в зависимости от относительного количества выкипевшей смеси, то есть степени сухости пара X . Изменение содержания R290 в жидкой и паровой фазах в испарителе и конденсаторе теплового насоса в зависимости от относительного количества X выкипевшей или сконденсировавшейся смеси заданного исходного химического состава ψ [8] определяется, согласно первому закону Коновалова, по формуле

$$X = \frac{\psi - \psi_{1ж}}{\psi_{1н} - \psi_{1ж}}, \quad (7)$$

где ψ – содержание R290 в исходной жидкости, с которым она попадает в испаритель и конденсатор теплового насоса, мол %; $\psi_{1ж}$, $\psi_{1н}$ – равновесные содержания R290 в жидкой и паровой фазах, мол %.

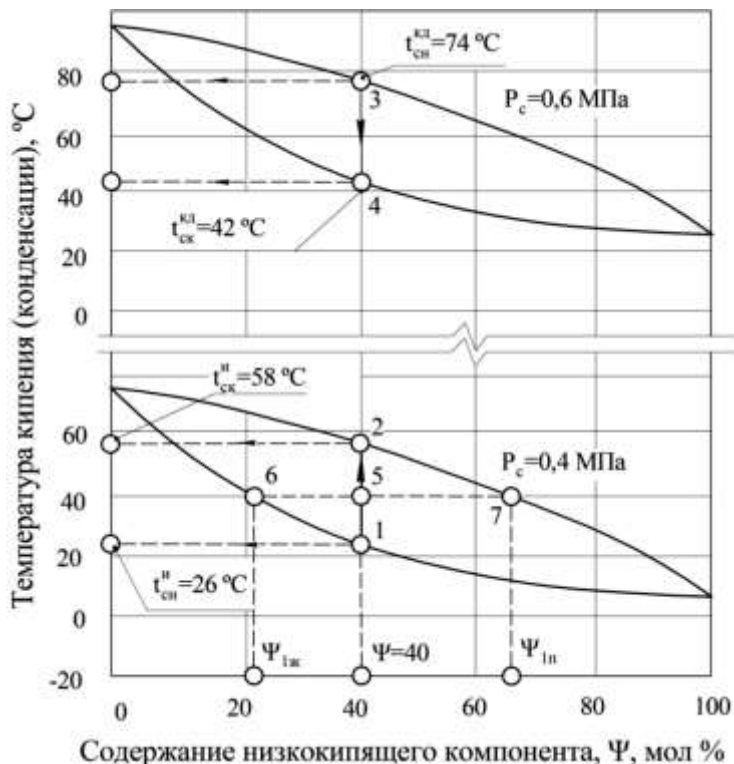


Рис. 2. Равновесные кривые кипения и конденсации неазеотропных смесей R290-R601a

На диаграмме «температура – состав» (рис. 2) приведено содержание R290 в жидкой $\psi_{1ж}$ (точка 6) и паровой $\psi_{1н}$ (точка 7) фазах для смеси исходного заданного состава ψ (точка 5). Из диаграммы видно, что от начала процесса испарения (точка 1) и до его конца (точка 2) содержание R290 в жидкой $\psi_{1ж}$ (точка 6) и паровой $\psi_{1н}$ (точка 7) фазах будет непрерывно меняться. Это обстоятельство обуславливает нелинейную зависимость ψ от X .

Подставляя в (7) значения $\psi_{1ж}$ и $\psi_{1н}$, определяемые по формулам (5), (6), и проводя необходимые преобразования, получим характер изменения температуры кипения t в зависимости от относительного количества выкипевшей смеси X :

$$X = P_{с.м} \left(\frac{\psi}{\beta} + \frac{1-\psi}{\xi} \right), \quad (8)$$

где

$$\beta = \left(P_x - 10^{A_2 - \frac{B_2}{C_2 + t}} \right); \quad (9)$$

$$\xi = \left(P_c - 10^{A_1 - \frac{B_1}{C_1 + t}} \right). \quad (10)$$

Нахождение t при заданных X осуществляется по формуле (8) методом подбора.

Характер изменения температуры в зависимости от степени сухости X для смеси с содержанием R290, равным $\psi = 40$ мол %, при абсолютных давлениях $P_c = 0,4$ МПа и $P_c = 0,6$ МПа показан на графике (рис. 3). Из графика следует выраженная нелинейная зависимость t от X .

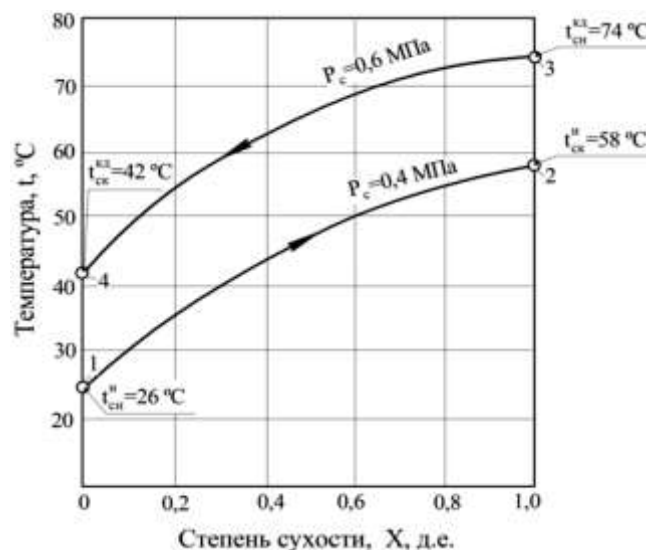


Рис. 3. Характер изменения температуры выкипающей или сконденсировавшейся смеси в зависимости от степени сухости при абсолютных давлениях 0,4 МПа и 0,6 МПа

Дополнительный анализ показывает, что характер изменения температуры смеси сильно зависит от ее исходного состава, с которым она попадает в испаритель и конденсатор. Температурные интервалы полного выкипания (конденсации) для смесей различного состава неодинаковы и увеличиваются по мере приближения к составу $\Psi = 50$ мол %.

Характер изменения температуры сконденсировавшейся (выкипевшей) смеси, зависящий от степени сухости X , обуславливает, в свою очередь, характер изменения температуры нагреваемого или охлаждаемого сушильного агента.

Выводы:

1. Предложена схема теплонасосной воздушной сушилки, использующей в качестве рабочего агента неазеотропную смесь предельных углеводородов состава 40 мол. % R290 и 60 мол. % R601a и реализующей принцип противоточного теплообменника с переменной температурой как рабочего, так и сушильного агентов. Применение предложенной схемы обеспечивает увеличение теплоты конденсации водяных паров за счет более глубокой осушки воздуха, уменьшение среднего температурного напора между воздухом и неазеотропной смесью в испарителе и конденсаторе с переменными температурами кипения и конденсации. В конечном итоге значительно увеличивается коэффициент преобразования теплонасосной воздушной сушилки и расход энергии на привод компрессора.

2. Получены формулы (5) и (6) по определению температурных условий кипения и конденсации неазеотропной смеси R290 и R601a в испарителе и конденсаторе тепловых насосов. По формулам (5) и (6) построена диаграмма «температура – состав» кривых кипения и конденсации смеси R290 и R601a при давлениях 0,4 и 0,6 МПа и различных концентрациях R290 в смеси.

3. Предложены зависимости (8)-(10) по вычислению значений температуры насыщенной смеси R290 и R601a заданного химического состава ψ в испарителе и конденсаторе теплового насоса, в зависимости от относительного количества выкипевшей или сконденсировавшейся смеси, то есть степени сухости пара X .

ЛИТЕРАТУРА

1. Рей Д., Макмайкл Д. Тепловые насосы: пер. с англ. М.: Энергоиздат, 1982. 224 с.
2. Янговский Е.И., Левин Л.А. Промышленные тепловые насосы. М.: Энергоатомиздат, 1989. 128 с.
3. International Symposium on the Industrial Application of Heat Pump. 1982. № 24-26, March. 189 p.

4. Поз М.Я., Кучумова И.Г. Использование тепловых насосов для утилизации тепла удаляемого воздуха // Новые системы отопления и вентиляции промышленных зданий. М., 1982. С. 91-100.
5. Оценка эффективности внедрения теплонасосных установок в южных районах / О.Ш. Везиришвили, Г.И. Чоговадзе и др. // Теплоэнергетика. 1981. № 12. С. 45-47.
6. Курицын Б.Н. Основы энергосбережения в отопительно-вентиляционной технике. Саратов: Надежда, 1996. 92 с.
7. Лебедев П.Д. Расчет и проектирование сушильных установок. М. – Л.: Госэнергоиздат, 1973. 320 с.
8. Карапетьянц М.Х. Химическая термодинамика. М.: Химия, 1975. 583 с.
9. Thomson G.W. The Antoine equation for vapor-pressure data // Chemical Reviews. 1946. Vol. 38. № 1. P. 128-143.
10. Курицын Б.Н. Системы снабжения сжиженным газом. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1988. 196 с.

Усачев Александр Прокофьевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr P. Usachev – Dr. Sc., Professor
Department of Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and
Applied Fluid and Gas Dynamics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Рулев Александр Владимирович – доктор технических наук, профессор кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Aleksandr V. Rulev – Dr. Sc., Professor
Department of Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and
Applied Fluid and Gas Dynamics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Усачева Елена Юрьевна – студент кафедры «Теплогазоснабжение, вентиляция, водообеспечение и прикладная гидрогазодинамика» Саратовского государственного технического университета имени Гагарина Ю.А.

Elena Yu. Usacheva – Undergraduate
Department of Heat and Gas Supply,
Ventilation, Water Supply and
Applied Fluid and Gas Dynamics,
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov

Статья поступила в редакцию 15.04.15, принята к опубликованию 10.11.15

Правила оформления и представления статей

1. Статья, направляемая в редакцию журнала «Вестник СГТУ», должна быть тщательно отредактирована и представлена в электронном виде в формате текстового редактора «MS Word 2007» (параметры страницы – А 4; поля – 2,0 см; ориентация книжная; шрифт Times New Roman, высота 12; межстрочный интервал – 1,0). Текст статьи представляют в редакцию по электронной почте vestnik@sstu.ru.

2. Статья должна содержать краткий обзор проблемы, из которого следует постановка задачи, обосновывать актуальность темы, отражать теоретические и (или) экспериментальные результаты и содержать четкие выводы, свидетельствующие о новизне полученных результатов.

3. В начале статьи в левом верхнем углу ставится индекс УДК. Далее на первой странице данные идут в такой последовательности:

- инициалы и фамилии авторов,
- полное название статьи (шрифт жирный, буквы прописные),
- краткая (5-7 строк) аннотация (курсив),
- ключевые слова.

Далее авторы, название статьи, аннотация и ключевые слова повторяются на английском языке.

Затем идет текст самой статьи и список литературы.

Статья завершается сведениями об авторах: ф.и.о. (полностью), ученая степень, ученое звание, место работы (полностью), должность, контактные телефоны. Сведения об авторах также повторяются на английском языке.

4. Объем статьи не должен превышать 10 страниц текста, содержать не более 5 рисунков или фотографий; объем обзора – 25 страниц, 10 рисунков; объем краткого сообщения – не более 3 страниц, 2 рисунков.

Иллюстрации (рисунки, графики) должны быть расположены в тексте статьи и выполнены в одном из графических редакторов (формат tif, pcc, jpg, pcd, msp, dib, cdr, cgm, eps, wmf). Допускается также создание и представление графиков при помощи табличных процессоров Excel, Quattro Pro, MS Graph. Каждый рисунок должен иметь номер и подпись. Рисунки и фотографии должны иметь контрастное изображение.

Таблицы располагаются непосредственно в тексте статьи. Каждая таблица должна иметь номер и заголовок.

5. Формулы и буквенные обозначения величин должны быть набраны в редакторе формул **Microsoft Equation 3.0**. Каждая формула должна иметь номер.

6. 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.

7. Список литературы должен быть оформлен по ГОСТ 7.0.5-2008 и включать: 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.

8. К статье прилагается экспертное заключение.

9. Рукопись статьи рецензируется ведущим ученым в данной области, как правило, доктором наук.

10. Электронная версия опубликованной статьи размещается в системе РИНЦ.

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

12. Статьи, не отвечающие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются, рукописи и электронные носители авторам не возвращаются. Датой поступления рукописи считается день получения редакцией окончательного текста. В случае отказа в публикации статьи редакция направляет автору мотивированный отказ.

13. Для публикации и своевременной подготовки журнала необходимо заполнить регистрационную карту участника, представляемую отдельным файлом. Высылается вместе с рукописью.

14. Плата с аспирантов за публикацию статьи не взимается.

Вестник Саратовского государственного технического университета

– рецензируемое научное периодическое издание по 2 отраслям науки (01.00.00 – Физико-математические науки, 05.00.00 – Технические науки), охватывающим по совокупности 5 групп специальностей (01.02.00 – Механика, 01.04.00 – Физика, 05.02.00 – Машиностроение и машиноведение, 05.13.00 – Информатика, вычислительная техника и управление, 05.14.00 – Энергетика).

Журнал имеет следующие соответствующие указанным группам специальностей разделы содержания:

- Математика и механика
- Физика
- Машиностроение и машиноведение
- Информационные технологии
- Энергетика

Журнал публикует статьи только по данным группам специальностей!

Регистрационная карта публикующегося в журнале «Вестник СГТУ»		
Фамилия	Имя	Отчество
Полное название статьи		
Ученая степень	Ученое звание	Должность с указанием кафедры, отдела, лаборатории
Электронная почта	Служебный телефон/факс	Домашний адрес и телефон
Наименование направляющей статью организации		
Группа специальностей, к которой относится статья		