

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«НИЖЕГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

**ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО
ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО
УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА**

№ 2 (104)

Нижний Новгород 2014

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева /
НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2014. № 2 (104). – 337 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (глав. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Д. Вавилов, А.М. Грошев, В.М. Галкин, А.Н. Жуков,
А.Б. Дарьенков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин, Д.Н. Лапаев, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов,
В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов, Е.А. Чернышов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Федор Михайлович Митенков

(академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор ОКБМ Африкантов)

Заместитель председателя

Сергей Михайлович Дмитриев

(д-р техн. наук, проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексеева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

(д-р техн. наук, проф., начальник УНИИР)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастера,
Хамильтон, Онтарио, Канада

проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

д-р, профессор, METU, директор OERC, Турция

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

Воротынцева

Владимир Михайлович

Кондратьев

Вячеслав Васильевич

Рындык Александр Георгиевич

Раевский Сергей Борисович

Кошелев Олег Сергеевич

Кулепов Виктор Федорович

член Президиума РАН, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор Института радиоэлектроники РАН им. В.А. Котельникова

член-кор. РАН, д-р эконом. наук, проф.,

директор Института ФГБУН экономики РАН

канд. техн. наук, доцент, проректор на научной работе НГТУ

канд. техн. наук, доцент, проректор по развитию НГТУ

канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИНЭУ НГТУ

д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой ПМ

д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ФТМКЭТ

член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИР

д-р техн. наук, профессор

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТКОДСП

д-р техн. наук, профессор, директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)
ББК 9я54

Электронная версия журнала:
<http://www.nntu.nnov.ru>

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:
ПИ № ФС 77-56417

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексеева, 2014

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

TRANSACTIONS
of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

№ 2 (104)

Nizhni Novgorod 2014

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor),

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.D. Vavilov, V.M. Galkin, A.M. Groshev, A.B. Darenkov,
A.N. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhaleiko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

Member of Russian Academy of Sciences
Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
(Nizhniy Novgorod, Russia)

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

Doctor of technical sciences, professor
Rector of NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

Doctor of technical sciences, professor
Head of NSTU Research and innovative works office
(Nizhniy Novgorod, Russia)

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor
McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of philosophical sciences, professor
Shiv Nadar University (India)
professor, head of Ocean Engineering Research Center
Middle East Technical University (Turkey)

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy
of Sciences
(Moscow, Russia)

Babanov Nikolai Iurevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Shiriaev

Mikhail Vissarionovich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for perspective projects
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for teaching and learning enhancement
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

Doctor of chemical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

Associate member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kulepov Viktor Fedorovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

*Electronic version of the journal:
<http://www.nntu.nnov.ru>*

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Ким Ы., Ковалев Н.Ф., Фильченков С.Е. Полые акустические волноводы переменного сечения. Метод связанных волн.....	11
Ковалев А.Н., Ковалев Ф.Н. Потенциальная точность определения параметров траектории цели в просветном бистатическом радиолокаторе.....	17
Кисиленко К.И., Раевский А.С., Раевский С.Б. О взаимных потоках мощности комплексных волн.....	23
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	26
Козелков А.С., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н. Цунами космогенного происхождения.....	26
Шамин Р.В., Юдин А.В., Кузнецов К.И. Частота обнаружения аномально больших поверхностных волн на основе вычислительных экспериментов в заданной точке области.....	36
Мазова Р.Х., Рамирес Х.Ф., Баранова Н.А., Рассадин А.Г. Катастрофические землетрясения и цунами в Чили. Свидетельства оправдавшегося прогноза.....	42
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	53
Жучков Р.Н. Стабилизация сетевых объектов на основе марковских моделей потери пакетов и принципов прогнозирующего управления.....	53 61
Никулин Е.А. Полиномиальная аппроксимация линиями и поверхностями.....	70
Богачева Е.О., Дмитриев Д.В., Корелин О.Н. Особенности сжатия формата DjVu для экономии сетевого трафика и исследование методов сегментации изображений..	78
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	78
Кабалдин Ю.Г., Кузьмишина А.М. Атомный подход к процессам деформации и разрушения срезаемого слоя при резании.....	78
Кабалдин Ю.Г., Кретинин О.В., Лаптев И.Л., Власов Е.Е., Серый С.В. Моделирование контактного взаимодействия стужки с инструментом на основе квантово-механических расчетов.....	89
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	98
Дмитриев С.М., Баринов А.А., Бородина В.Е., Хробостов А.Е. К вопросу о методологии обоснования теплотехнической надежности активных зон водяных энергетических реакторов.....	98
Новоселова Н.А., Рудоясова Л.Г. О постановке дисперсионных задач слоистых сферических волноводов.....	109

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	114
Котиев Г.О., Сарач Е.Б., Смирнов И.А., Бекетов С.А. Пути повышения быстроходности гусеничных машин транспортного назначения.....	114
Морозов А.В., Котровский А.А., Филёв А.В. Выбор метода комплексного сравнения объектов автобронетанковой техники на этапе проектирования.....	120
Наумов Е.А. К вопросу расчетной оценки несущей способности кузовных конструкций.....	124
Огороднов С.М., Тихомиров А.Н., Шаров Д.В. Исследование расхода топлива легкового коммерческого автомобиля «Газель NEXT» экспериментальным методом....	131
	140
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	
Захаров Л.А., Сеземин А.В., Захаров И.Л., Тарасов А.Н., Дегтярёв А.В. Методика обеспечения экологической безопасности поршневого двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия завода ОАО «РУМО» 8ЧН 22/28.....	140
Локтев А.В., Малахов А.В. Технические решения модернизации газогорелочных устройств отопительных котлов.....	148
Сандаков М.Ю. Математическая модель расчёта ледовой ходкости судов с полными обводами в битом льду.....	154
	160
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	
Бурмакин О.А., Малышев Ю.С., Варечкин Ю.В., Сычушкин И.В. Обоснование эффективности судовых ветрогенераторных установок.....	160
Кралин А.А., Алтунин Б.Ю., Карнавский И.А., Гуляев В.В. Моделирование несимметричных режимов работы трехфазного трансформатора в пакете SIMULINK...	166
Лоскутов А.Б., Лоскутов А.А., Зырин Д.В., Ларионов Л.А. Гибкие распределительные сети с адаптивными алгоритмами – решение интеллектуализации городских сетей.....	173
	179
Садиков Д.Г., Мочалин Д.С., Титов В.Г. Применение преобразователей частоты на компрессорных станциях магистральных газопроводов.....	190
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	190
Коровин В.А., Курилина Т.Д., Степанов П.П. Термодинамика восстановления железа из электропечного шлака и изменение теплового баланса в печи.....	196
Макаренко К.В. Рациональное структурирование графитизированных чугунов.....	206
Романов И.Д., Шацов А.А., Закирова М.Г. Структура и свойства низкоуглеродистой мартенситной стали, закаленной с ковочного нагрева.....	213
Сенопальников В.М., Сивков В.Л., Титов А.В. Формирование разноориентированной структуры в стальном слитке.....	222
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	222
Водзинский В.Ю. Влияние углеродосодержащих примесей на электрофизические характеристики плёнок диоксида кремния, полученных PECVD методом.....	231
Исаев А.В., Жирнова Т.А., Михаленко М.Г., Исаев В.В., Бакаев В.В. Влияние ультрадисперсных алмазов на катодное осаждение серебра.....	241

Наумов В.И., Чумаков В.И., Дородницына А.А., Самсонова А.Д. Количественная оценка барьерного и электрохимического механизмов при антикоррозионной защите сталей. ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ	249
Вдовина С.Б., Труфанова И.С. Методологические основы проектирования и управления интегрированными цепями поставок.....	249
Морозова Г.А. Процесс совершенствования государственного управления.....	256
Лапаев Д.Н., Поташник Я.С. Капитальные вложения в Нижегородской области: состояние, пути увеличения.....	263
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ	272
Скобелева Е.И., Прохорова М.В., Ефимов А.В. Анализ социальных представлений студенческой молодежи о проблемах наркомании (по результатам данных социологического исследования).....	272
Багаев А.В. Управление жизнью человека: программа исследований.....	280
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ	287
Вавилов В.Д. Применение вариационного принципа Гамильтона для построения математических моделей микродатчиков.....	287
Вавилов Д.В., Грязев А.А., Гайнов С.И., Былинкин С.Ф. Математическая модель микросистемного датчика угловых скоростей.....	295
Волков В.Л., Жидкова Н.В., Жидков А.А. Эффективность работы микромеханических датчиков в условиях помех.....	302
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ	314
Галкин В.М., Ерофеева Л.Н., Лещева С.В. Оценки параметра распределения Коши	
Громов Е.М., Наседкина Т.В., Тютин В.В. Солитоны в расширенном нелинейном уравнении Шредингера с пространственной неоднородностью дисперсии в виде перепеда.....	320
Ромен Ю.С., Клебанов Я.М., Солдусова Е.А. Динамика движения колесной пары железнодорожного экипажа с учетом характеристик рельсового пути.....	326

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Kim E, Kovalev N.F., Filchenkov S.E. Hollow acoustic waveguides with variable section. coupled-waves approach.....	11
Kovalev A.N., Kovalev F.N. Potential accuracy of the determination of target trajectory parameters in forward-scattering bistatic radar system.....	17
Kisilenko K.I., Raevskii A.S., Raevskii S.B. About mutual power flows of complex waves..	23
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	26
Kozelkov A.S., Kurkin A.A., Pelinovsky E.N. Tsunami of cosmogenic origin.....	26
Shamin R.V., Yudin A.V., Kuznetsov K.I. The frequency of detection of anomalously large surface waves on the basis computational experiments at a given point of the region.....	36
Mazova R.Kh., Jorge Ramirez Fernandez, Baranova N.A., Rassadin A.G. Catastrophic eartyhquakes and tsunami in Chile. Evidence for realized prognosis.....	42
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	53
Zhuchkov R.N. Jump linear systems and predictive control approaches in stabilizing networked control.....	53
Nikulin E.A. Polynomial approximation by lines and surfaces.....	61
Bogacheva E.O., Dmitriev D.V., Korelin O.N. Features of DjVu format compression for network traffic saving and research of images segmentation methods.....	70
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	78
Kabaldin Yu.G., Kuzmishina A.M. Approach to nuclear and destruction deformation process of cutting layer cutting.....	78
Kabaldin Yu.G., Kretinin O.V., Laptev I.L., Vlasov E.E., Sery S.V. Contact interaction simulation tool chip based on quantum-mechanical calculation.....	89
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	98
Dmitriev S.M., Barinov A.A., Borodina V.E., Khrobostov A.E. On the issue of core cooling reliability substantiation methodology for the pressurized water reactors.....	98
Novoselova N.A., Rudoyasova L.G. On statement of the dispersion tasks layered spherical waveguides.....	109
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	114
Kotiev G., Sarach E., Smirnov I., Filev A. Prospects of increase of rapidity of transport tracked vehicles.....	114
Morozov A., Kotrovskiy A. The choice of the method of complex compare objects of armored technique at the stage of design.....	120
Naumov E.A. The estimated value car and bus body supporting ability.....	124

Ogorodnov S.M., Tikhomirov A.N., Sharov D.V. The study of the fuel consumption of the light commercial vehicle Gazelle NEXT by using of experimental method.....	131
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	140
Zakharov L.A., Sezemin A.V., Zakharov I.L., Tarasov A.N., Degtyarev A.V. Methods of ecological security of internal combustion piston engine with compression-ignition by JSC "RUMO" 8CHN 22/28.....	140
Loktev A.V., Malakhov A.V. Modernization solutions gas burner units heating boilers...	148
Sandakov M.Y. Mathematical model of calculation of ice movement of vessels with large coefficient of fullness in broken ice.....	154
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	160
Burmakin O.A., Malyshev Yu.S., Varechkin Yu.V., Sychushkin I.V. Substantiation of the effectiveness of ships wind generator installations.....	160
Kralin A.A., Altunin B.Y., Karnavsky I.A., Gulyaev V.V. Asymmetrical mode modeling of the three-phase transformer in simulink.....	166
Loskutov A.B., Loskutov A.A., Zyrin D.V., Larionov L.A. Flexible distribution network with adaptive algorithms as decision intellectualization of urban electrical grids.....	173
Sadikov D., Mochalin D., Titov V. Using a frequency converter on a compressor station of the main gas pipe line.....	179
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	190
Korovin V.A., Kurilina T.D., Stepanov P.P. Thermodynamics of iron reduction from electric furnace slag and changing the heat balance in the furnace.....	190
Makarenko K.V. Rational structuring of cast irons.....	196
Romanov I.D., Shatsov A.A., Zakirova M.G. Structure and properties of low-carbon martensitic steel hardened from forging heating.....	206
Senopalnikov V., Sivkov V., Titov A. The formation of differently oriented patterns in the steel ingot.....	213
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	222
Vodzinskiy V. Effect of carbon-containing impurities on the electrical properties of silicon dioxide films obtained by PECVD.....	222
Isaev A.V., Zhirnova T.A., Mikhaleiko M.G., Isaev V.V., Bakaev V.V. The influence of ultradispersed diamonds on cathodic deposition of silver.....	231
Naumov V.I., Chumakov V.I., Dorodnizina A.A., Samsonova A.D. Quantitative assessment of barrier and electrochemical mechanisms for anticorrosive protection of steel...	241
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	249
Vdovina S.B., Trufanova I.S. Methodological foundations of design and management integrated supply chain.....	249
Morozova G.A. The improvement of public administration.....	256
Lapaev D.N., Potashnik Y.S. Apital investments in the Nizhny Novgorod region: status, ways of increasing.....	263

SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	272
Skobeleva E.I., Prokhorova M.V., Efimov A.V. Analysis of drug addiction related social concepts accepted by the students (based on the results of the sociological survey).....	272
Bagaev A.V. Management of human life: the research program.....	280
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	287
Vavilov V.D. Application of the variational principle of hamilton to build mathematical models of microsensors.....	287
Vavilov V.D., Gryazev A.A., Gainov S.I., Bylinkin S.F. Mathematic model of microsystem angular rate sensor.....	295
Volkov V.L., Zhidkova N.V., Zhidkov A.A. Efficiency of micro mechanical sensors in conditions of hindrances.....	302
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	314
Galkin V.M., Erofeeva L.N., Leshcheva S.V. The parameter estimates of cauchy distribution.....	314
Gromov E.M., Nasedkina T.V., Tyutin V.V. Solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial kink-type dispersion distribution.....	320
Romen Yu.S., Klebanov I. M., Soldusova E.A. Wheelset motion dynamics of railway vehicles taking into account the characteristics of the track.....	326

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 537.874.6

Ы. Ким, Н.Ф. Ковалев, С.Е. Фильченков

ПОЛЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ ВОЛНОВОДЫ ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ. МЕТОД СВЯЗАННЫХ ВОЛН

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород

Цель: Развитие метода разложения по собственным функциям, используемого в задачах дифракции.

Методология / подход: Универсальный метод вывода линейных уравнений взаимно связанных волн, применимый к волноведущим системам различной физической природы.

Результаты: Предложен оригинальный математически строгий метод, обладающий физической наглядностью и позволяющий не только получать математически корректные приближенные решения, но и давать им наглядную физическую трактовку.

Применение: Решение широкого класса систем линейных дифференциальных уравнений в частных производных.

Оригинальность / значение: В методе не используются операции почленного дифференцирования рядов, предельные переходы и раскрытие неопределенностей, что обуславливает его широкую применимость, в частности, для случая представления полей неравномерно сходящимися рядами.

Ключевые слова: волновод, собственные волны, коэффициент связи, переизлучение, норма, ортогональность.

При теоретическом исследовании распространения волн в полых волноводах с распределенными неоднородностями весьма эффективен один из вариантов метода связанных волн, названный в [1] методом поперечных сечений. Идея метода состоит в следующем. Неоднородному волноводу в каждом его поперечном сечении сопоставляется вспомогательный регулярный волновод сравнения (ВС) с теми же сечением и распределением параметров заполняющей среды. Искомое поле ищется в виде суперпозиции полей собственных волн соответствующих ВС. Коэффициенты этих разложений определяются из решений системы взаимно связанных линейных уравнений первого порядка, имеющих стандартный вид системы связанных волн или связанных колебаний. Во многих случаях такой переход позволяет получать удобные для приложений приближенные решения.

В монографии [1] приведен вывод уравнений связанных волн как для радио-, так и для акустических волноводов, основанный на нескольких последовательных предельных переходах и раскрытии нескольких неопределенностей. Такой вывод делает неопределенной область применимости метода из [1] и затрудняет дальнейшее его развитие. В настоящей работе приведен прямой вывод уравнений связанных волн применительно к акустическим волноводам, причем без привлечения операций почленного дифференцирования бесконечных рядов, которые в общем случае сходятся неравномерно.

В качестве исходной здесь используется система уравнений первого порядка

$$\operatorname{div} \vec{V} = -iku, \quad (1a)$$

$$\operatorname{grad} u = -ik\vec{V} + \vec{F} \quad (16)$$

для поля скоростей $\vec{V} = \vec{V}(\vec{r}_\perp, z)$ и скалярного поля давлений $u = u(\vec{r}_\perp, z)$. Предполагается, что параметры заполняющей среды не зависят ни от поперечных (\vec{r}_\perp), ни от продольной (z) координат. Зависимость от времени выбрана в виде $e^{i\omega t}$, ω – циклическая частота, $\vec{F}(\vec{r}_\perp, z)$ – векторное поле сторонних источников.

Каждому поперечному сечению нерегулярного волновода сопоставляется регулярный волновод сравнения (ВС) с координатной системой (\vec{r}_\perp, ζ) , как показано на рис. 1. Ось ζ пересекает поперечные сечения в тех же точках, что и ось z , соответственно их направления совпадают. Операторы, действующие в пространстве (\vec{r}_\perp, ζ) , отмечаются нижним индексом ζ .

В настоящей работе рассматриваются только волноводы с идеально мягкими стенками

$$u \Big|_{S_{\text{бок}}} = 0, \quad (3)$$

соответственно на боковой поверхности регулярного ВС выбраны те же граничные условия (3), которые вместе с уравнениями

$$\text{div}_\zeta \vec{V}^m - ih_m V_z^m = -iku^m, \quad (4a)$$

$$\text{grad}_\zeta u^m - ih_m u^m \vec{z}_0 = -ik \vec{V}^m, \quad (4b)$$

порождают полные системы собственных волн в волноводах сравнения, отмечаемых верхними индексами m :

$$\widehat{\vec{V}}^m(\vec{r}_\perp, \zeta, z) = \vec{V}^m(\vec{r}_\perp, z) e^{-ih_m(z)\zeta}, \quad (5a)$$

$$\widehat{u}^m(\vec{r}_\perp, \zeta, z) = u^m(\vec{r}_\perp, z) e^{-ih_m(z)\zeta}. \quad (5b)$$

В (4) и (5) полные комплексные амплитуды \vec{V}^m и u^m зависят не только от \vec{r}_\perp , но являются еще и функциями z , поскольку разным сечениям соответствуют различные ВС. По этой же причине от z зависят и продольные волновые числа $h_m(z)$. Индекс m принимает как положительные, так и отрицательные значения, за исключением $m = 0$, т.е.

$$m \in (-\infty, -1], [1, \infty).$$

Для определенности предполагается, что отрицательным индексам $m < 0$ соответствуют встречные волны, а положительным индексам $m > 0$ – попутные. Предполагаются также выполненными условия четности

$$h_{-m} = -h_m, \quad (6a)$$

$$u^{-m} = -u^m, \quad \vec{V}_\perp^{-m} = -\vec{V}_\perp^m, \quad V_z^{-m} = V_z^m. \quad (6b)$$

В (5) крышкой отмечены поля скоростей и давлений собственных волн.

Величины и функции, входящие в систему уравнений (4), не зависят от координаты ζ , поэтому после добавления и вычитания в их левых частях по слагаемому

$$\frac{\partial V_z^m}{\partial z}, \quad \frac{\partial u^m}{\partial z} \vec{z}_0$$

уравнения (4) преобразуются к виду

$$\text{div} \vec{V}^m - \frac{\partial V_z^m}{\partial z} - ih_m V_z^m = -iku^m, \quad (7a)$$

$$\text{grad} u^m - \frac{\partial u^m}{\partial z} \vec{z}_0 - ih_m u^m \vec{z}_0 = -ik \vec{V}^m, \quad (7b)$$

в которые входят дифференциальные операторы, действующие, в отличие от (4), в пространстве (\vec{r}_\perp, z) . После подстановки уравнений из (1) и (7) в правую часть дифференциального тождества

$$\operatorname{div}(u^m \vec{V} - u \vec{V}^m) = u^m \operatorname{div} \vec{V} + \vec{V} \operatorname{grad} u^m - u \operatorname{div} \vec{V}^m - \vec{V}^m \operatorname{grad} u, \quad (8)$$

выводится удобный для дальнейшего вариант леммы Лоренца:

$$\operatorname{div}(u^m \vec{V} - u \vec{V}^m) = -\vec{V}^m \vec{F} + \left(\frac{\partial u^m}{\partial z} + i h_m u^m \right) V_z - \left(\frac{\partial V_z^m}{\partial z} + i h_m V_z^m \right) u, \quad (9)$$

из которой интегрированием по исчезающе тонкому поперечному слою нерегулярного волновода и с использованием теоремы Остроградского-Гаусса получается интегральное равенство с полной производной (d/dz)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dz} \int_{S_{\perp}} (u^m V_z - u V_z^m) ds - i h_m \int_{S_{\perp}} (u^m V_z - u V_z^m) ds = \int_{S_{\perp}} \left(\frac{\partial u^m}{\partial z} V_z - u \frac{\partial V_z^m}{\partial z} \right) ds - \\ - \oint_L (u^m \vec{V} - u \vec{V}^m) \vec{\chi} \frac{dl}{\cos \theta} - \int_{S_{\perp}} \vec{F} \vec{V}^m ds \end{aligned} \quad (10)$$

Следует отметить, что равенство (10) и полученная лемма Лоренца непосредственно применимы к исследованиям некоторых простых волноводных систем и лежат в основе доказательств ряда теорем или общих свойств нерегулярных волноводных систем.

Далее, учитывая:

- граничные условия на боковых идеально мягких стенках (3);
- условия ортогональности для полной систем собственных, или парциальных, волн

$$\int_{S_{\perp}} (u^{-m} V_z^j - u^j V_z^{-m}) ds = N_m \delta_{m j} \quad (11)$$

в форме, удобной для дальнейших преобразований;

- (ба) и изменение знака у индекса m в (10);
- справедливость, то есть сходимость в среднем, только рядов для скалярных полей

$$V_z = \sum_j P_j V_z^j, \quad (12a)$$

$$u = \sum_j P_j u^j, \quad (12б)$$

из (10) выводится искомая система обыкновенных дифференциальных уравнений первого порядка для взаимно связанных волн

$$\frac{dP_m}{dz} + i h_m P_m + \frac{1}{N_m} \frac{dN_m}{dz} = \frac{1}{N_m} \sum_j S_{m j} P_j - \frac{1}{N_m} \int_{S_{\perp}} \vec{F} \vec{V}^{-m} ds, \quad (13)$$

где

$$S_{m j} = \int_{S_{\perp}} \left(\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} V_z^j - u^j \frac{\partial V_z^{-m}}{\partial z} \right) ds - \quad (14)$$

коэффициенты связи парциальных волн.

Как и m , индекс j принимает все значения от $-\infty$ до ∞ , кроме $j = 0$, так что (13), (14) описывают явление переизлучения собственных волноводных волн (5), (12) на участках волноводов с однородной заполняющей средой, но с переменным сечением, то есть когда $S_{m j}(z) \neq 0$, и явления возбуждения тех же волн сторонними векторными источниками, если

$$\int_{S_{\perp}(z)} \vec{F} \vec{V}^{-m} ds \neq 0. \quad (15)$$

Для однозначного определения комплексных амплитуд $P_m(z)$ бесконечную систему (13) нужно дополнить краевыми условиями, определяемыми из постановки конкретных за-

дач и принципа причинности. Например, при падении с левой стороны какой-либо волны с индексом $m = N > 0$ на ограниченный по длине нерегулярный участок (z_1, z_2) , вне области которого отсутствуют сторонние источники \vec{F} , концевые условия можно записать в следующем простом виде:

$$P_N(z_1) = P, P_m(z_1) = 0 \text{ если } m > 0 \text{ и } m \neq N;$$

$$P_m(z_2) = 0 \text{ если } m < 0.$$

При выводе результирующей системы (13) было принято предположение о представлении сходящимися рядами только двух полей u и V_z , причем без дополнительных неразлагаемых составляющих (12а), (12б). Если не применять каких-либо мер по улучшению сходимости ряда (12б), то поперечные скорости \vec{V}_\perp можно представить аналогичными рядами

$$V_\perp = \sum_j P_j \vec{V}_\perp^j - \frac{i}{k} \vec{F}_\perp, \tag{16}$$

но с неразлагаемыми членами, пропорциональными \vec{F}_\perp , и только в области равномерной сходимости (12б). Появление в (16) неразлагаемых составляющих связано с непотенциальностью поля скоростей в области расположения источников (16). Из полученного представления (16) следует также, что входящий в (16) ряд сходится медленно и неравномерно, а в точках с дельта-источниками

$$|F| \sim \delta \tag{17}$$

расходится.

Формула (14) для коэффициентов связи является универсальной, но наиболее пригодна она в случаях исследований переизлучений волн на частотах, близких к критическим $|h_m/k| \ll 1$. В случае же $|h_m| \approx k$ более удобными становятся другие представления для S_{mj} , не содержащие производных (по z) от полей. В качестве примера здесь приведен вывод одного из возможных таких представлений, полученного преобразованием (14) с использованием системы уравнений

$$\text{div}_\zeta \left(\frac{\partial \hat{V}^{-m}}{\partial z} \right) = -ik \frac{d\hat{u}^{-m}}{dz}, \tag{18a}$$

$$\text{div}_\zeta \left(\frac{\partial \hat{u}^{-m}}{\partial z} \right) = -ik \frac{d\hat{V}^{-m}}{dz}, \tag{18б}$$

обозначения в которой такие же, как в (4) и (5), а производные по z соответствуют переходу от одного волновода сравнения к другому, близкому. Например,

$$\frac{\partial \hat{u}^{-m}}{\partial z} = \left(\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} + i\zeta \frac{dh_m}{dz} u^{-m} \right) e^{ih_m \zeta}. \tag{19}$$

Подставляя в дифференциальное соотношение типа (8) производные из (18а), (18б) и из (1а), (1б), но записанных для собственных волн ВС с индексами j , нетрудно получить дифференциальное соотношение

$$\text{div}_\zeta \left(\frac{\partial \hat{u}^{-m}}{\partial z} \hat{V}^j - \hat{u}^j \frac{\partial \hat{V}^{-m}}{\partial z} \right) = 0 \tag{20}$$

типа леммы Лоренца. После интегрирования (20) по тонкому поперечному слою волновода сравнения с учетом (19) и граничных условий (3) для собственных волн, вытекает интегральное равенство

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\zeta} \left[e^{i(h_m - h_j)\zeta} \right] \int_{S_\perp} \left\{ \left(\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} + i\zeta \frac{dh_m}{dz} u^{-m} \right) V_z^j - u^j \left(\frac{\partial V_z^{-m}}{\partial z} + i\zeta \frac{dh_m}{dz} V_z^{-m} \right) \right\} dz + \\ & + e^{i(h_m - h_j)\zeta} \oint_L \left(\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} + i\zeta \frac{dh_m}{dz} u^{-m} \right) \vec{V}^j \vec{n} dl = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

применимое при любом сочетании индексов m и j . В (21) L – контур поперечного сечения (рис. 1); а l – координата вдоль контура L .

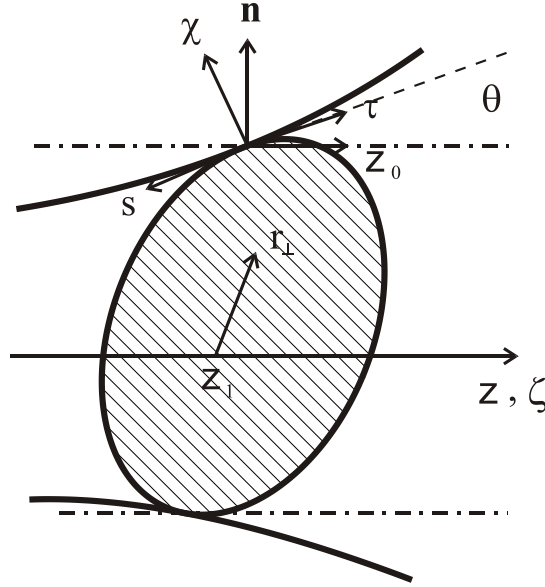


Рис. 1. Поперечное сечение ($z = z_1$) нерегулярного волновода (непрерывные линии) и соответствующий ему волновод сравнения (штрих-пунктирные линии)

Если предположить, что $j \neq m$, то с учетом условия ортогональности (11) из (21) следует необходимая для дальнейших преобразований формула:

$$i(h_m - h_j) \int_{S_\perp} \left(\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} V_z^j - u^j \frac{\partial V_z^{-m}}{\partial z} \right) ds + \oint_L \frac{\partial u^{-m}}{\partial z} V_n^j dl = 0. \quad (22)$$

Поскольку из граничных условий (3) следует

$$\frac{\partial u^{-m}}{\partial z} = -\kappa \frac{\partial u^{-m}}{\partial n}, \quad (23)$$

$$\kappa = \operatorname{tg}\theta \quad (24)$$

(см. рис. 1), то

$$S_{mj} = -\frac{i}{h_m - h_j} \oint_L \kappa \frac{\partial u^{-m}}{\partial n} V_n^j dl. \quad (25)$$

Если же положить $j = m$, то аналогичным образом выводится

$$\frac{dh_m}{dz} = -\frac{i}{N_m} \oint_L \kappa \frac{\partial u^{-m}}{\partial n} V_n^m dl. \quad (26)$$

В этом же случае $j = m$ путем дифференцирования по z условия ортогональности (11) аналогично выводятся соотношения взаимности:

$$S_{mj} = -S_{jm}, \quad j \neq m, \quad (27)$$

$$S_{mm} = -\frac{1}{2} \frac{dN_m}{dz} \quad (28)$$

– выражение для диагональных членов матрицы коэффициентов связи (14).

Последние результаты (25), (26) с точностью до обозначений, как и следовало ожидать, совпадают с соответствующими выражениями из [1]. Однако развитый здесь метод имеет несомненные преимущества. Поскольку при выводе (13) не использовались операции почленного дифференцирования плохо сходящихся рядов (12), предельные переходы и операции раскрытия неопределенностей, то возможны обобщения на случаи других граничных условий (3) и, что важно, на случаи разных граничных условий для полного поля и собственных волн волноводов сравнения. Возможен также корректный учет поглощения энергии звуковых волн волноводными стенками, сопровождаемого переизлучением волн.

Основания развитого здесь метода весьма просты и универсальны, поэтому он (метод) может быть использован и для других систем дифференциальных уравнений в частных производных, например, описывающих явления распространения тепловых возмущений. Применим метод и к несамосопряженным задачам, таким как исследование рассеяния волн в полых волноводах, заполненных электронными пучками. В подобных задачах вместо (11) нужно использовать более общее условие полной биортогональности, при выводе которого не используется симметрия (6а).

Очевидно, что рассмотренный обобщенный метод связанных волн становится эффективным, когда в процессе участвует небольшое число собственных волн, имеющих сравнимые амплитуды. Сопоставление амплитуд и фаз взаимодействующих волн и, особенно, сама форма промежуточных и последних уравнений часто позволяет давать простую и хорошо изученную трактовку явления переизлучения, облегчающую качественный анализ различных практических устройств.

-
1. **Каценеленбаум, Б.З.** Теория нерегулярных волноводов с медленно меняющимися параметрами. – М.: Изд-во АН СССР, 1961. – 215 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

E. Kim, N.F. Kovalev, S.E. Filchenkov

HOLLOW ACUSTIC WAVEGUIDES WITH VARIABLE SECTION. COUPLED-WAVES APPROACH

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, Nizhny Novgorod

Purpose: Development of a method of expansion in eigenfunctions, used in diffraction problems.

Design/methodology/approach: Universal method of a deriving of the linear equations of mutually coupled waves, applicable to waveguide systems of various physical nature.

Findings: The original mathematically strict method is suggested having physical presentation and allowing not only to obtain mathematically correct approximations but also to give them evident physical interpretation.

Research limitations/implications: The solution of a wide class of systems of the linear partial differential equations.

Originality/value: In the method operations of term by term differentiation, limit transitions and evaluation of indeterminate form not used. That is why it is widely applicated, in particular for a case of expansion of solution with nonuniform convergent series.

Key words: waveguide, eigenwaves, coupling coefficient, reradiation, norm, orthogonality.

УДК 621.396.96

А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев

ПОТЕНЦИАЛЬНАЯ ТОЧНОСТЬ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ТРАЕКТОРИИ ЦЕЛИ В ПРОСВЕТНОМ БИСТАТИЧЕСКОМ РАДИОЛОКАТОРЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Оценка точности определения траекторных параметров цели методом максимального правдоподобия в просветном радиолокаторе с измерениями доплеровской частоты рассеянного сигнала. В приемнике радиолокатора напряжение доплеровской частоты выделяется амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции рассеянной на цели радиоволны и более мощной прямой радиоволны от передатчика.

Методология / подход: Расчет точности произведен для нормально распределенных ошибок измерения доплеровской частоты путем обращения информационной матрицы Фишера.

Результаты: Получены формулы расчета потенциальной точности определения параметров траектории цели в бистатическом радиолокаторе с измерениями доплеровской частоты рассеянного сигнала. Приведен пример расчета потенциальной точности для просветного радиолокатора с конкретными характеристиками.

Применение: Просветная радиолокация, фазовые устройства измерения дальности и измерения азимута.

Оригинальность / значение: Представленная методика расчета точности позволяет на этапе проектирования выявить возможности просветной радиолокационной системы и определить ее параметры, исходя из требуемой точности. Оценка точности определения момента пересечения целью отрезка, соединяющего передатчик с приемником, позволяет определить параметры угломерных и дальномерных устройств более сложных просветных радиолокационных комплексов.

Ключевые слова: просветная радиолокация, бистатическая радиолокационная система, доплеровская частота, информационная матрица Фишера, параметры траектории.

В просветных радиолокационных системах (РЛС) обнаружение цели осуществляется в окрестности линии базы, соединяющей передатчик и приемник, где наблюдается повышенная интенсивность рассеянного вперед поля [1]. В просветных РЛС используют передатчики с монохроматическим излучением и приемники с амплитудным детектированием суммарного колебания, образуемого в результате интерференции прямой радиоволны от передатчика и рассеянной на цели радиоволны [2-5].

В настоящей работе оценивается точность определения координат цели по результатам измерений доплеровской частоты в просветном бистатическом радиолокаторе (состоит из одного передатчика и одного приемника).

На рис. 1 показана схема просветной бистатической двухкоординатной РЛС. Элементы системы размещены в плоскости xOy : приемник (Пр) – в начале системы координат (в точке O), передатчик (П) – на оси Ox на расстоянии a от приемника, называемого базой. Цель движется со скоростью v в плоскости xOy , пересекая линию базы под углом ψ в точке $(s, 0)$, $0 < s < a$. Расстояния $r_{\text{п}}$ и $r_{\text{пр}}$ являются дальностями цели до передатчика и до приемника. Доплеровская частота принимаемого сигнала определяется скоростью изменения дальностей [5]:

$$f(t) = -\frac{1}{\lambda} \frac{d(r_{\text{п}}(t) + r_{\text{пр}}(t))}{dt}, \quad (1)$$

λ – длина волны излучения передатчика; t – время.

Измерения доплеровской частоты выполняются с одинаковым интервалом T и независимо друг от друга. Ошибки измерений распределены по нормальному закону с нулевым математическим ожиданием и неизменной во времени дисперсией σ_f^2 .

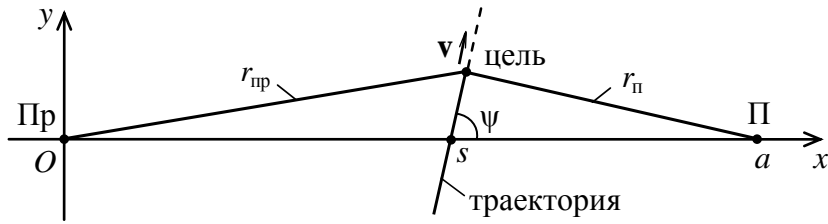


Рис. 1. Схема просветной бистатической РЛС

Поскольку обнаружение цели осуществляется на небольших удалениях от линии базы $|y| \ll s, |y| \ll (a - s)$, то в качестве модели движения цели рассматривают ее равномерное прямолинейное движение с углами ψ близкими к 90° [3-6]:

$$x(t) = s + v_x(t - \tau), \tag{2}$$

$$y(t) = v_y(t - \tau), \tag{3}$$

где $x(t), y(t)$ – координаты цели, $v_x = |\mathbf{v}| \cos \psi; v_y = |\mathbf{v}| \sin \psi; |v_x| \ll |v_y|; \tau$ – момент пересечения целью оси Ox .

Параметры траектории, через которые выражаются координаты (2), (3), удобно объединить в вектор [7]

$$\chi_4 = [\tau, s, v_y, v_x]^T. \tag{4}$$

Индекс в обозначении вектора показывает число параметров, которые описывают траекторию (вектор χ_4 состоит из четырех элементов), T – знак транспонирования.

Связь параметров траектории (4) с доплеровской частотой (1) задается уравнениями [4, 5]

$$f_i(\chi_4) = -\frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{(x_i - a)v_x + y_i v_y}{\sqrt{(x_i - a)^2 + y_i^2}} + \frac{x_i v_x + y_i v_y}{\sqrt{x_i^2 + y_i^2}} \right\}, \tag{5}$$

Здесь $x_i = x(t_i), y_i = y(t_i)$ – значения координат цели (2), (3) в моменты измерений $t_i = t_1 + (i - 1)T, i = \overline{1, n}, (n - \text{число измерений на текущий момент времени } t = t_n); t_1$ – момент первого измерения (совпадает с моментом вхождения цели в зону действия системы).

Все поступившие к текущему моменту времени $t = t_n$ оценки доплеровской частоты объединяются в один вектор \mathbf{z} , а соответствующие им функции (5) для тех же моментов времени – в вектор \mathbf{h} :

$$\mathbf{z} = [\hat{f}_1, \dots, \hat{f}_i, \dots, \hat{f}_n]^T,$$

$$\mathbf{h} = [f_1, \dots, f_i, \dots, f_n]^T,$$

где \hat{f}_i – оценка доплеровской частоты в момент времени $t_i, \hat{f}_i = \hat{f}(t_i)$. Размерности векторов \mathbf{z} и \mathbf{h} составляют величину n , увеличивающуюся со временем.

Корреляционная матрица, характеризующая потенциальную точность определения вектора χ_4 , находится обращением информационной матрицы Фишера [7] и имеет вид

$$\mathbf{Q}_4 = [\mathbf{H}_4^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_4]^{-1}. \tag{6}$$

Здесь \mathbf{H}_4 – матрица размером $n \times 4$ с элементами, представляющими собой производные функций (5) по всем составляющим вектора χ_4 , вычисленным для заданной траектории:

$$H_{i,1} = \frac{\partial f_i(\chi_4)}{\partial \tau}, H_{i,2} = \frac{\partial f_i(\chi_4)}{\partial s}, H_{i,3} = \frac{\partial f_i(\chi_4)}{\partial v_y}, H_{i,4} = \frac{\partial f_i(\chi_4)}{\partial v_x};$$

\mathbf{R} – корреляционная матрица ошибок измерений. Для рассматриваемой модели измерений

$$\mathbf{R} = \sigma_f^2 \mathbf{I},$$

\mathbf{I} – единичная матрица размером $n \times n$.

Диагональные элементы матрицы \mathbf{Q}_4 представляют собой минимальные значения дисперсий ошибок определения траекторных параметров σ_τ^2 , σ_s^2 , $\sigma_{v_y}^2$ и $\sigma_{v_x}^2$, которые достигаются в рассматриваемой системе для заданной траектории.

В качестве примера на рис. 2 сплошными линиями показаны графики среднеквадратичных отклонений σ_τ , σ_s и σ_{v_y} ошибок определения момента τ , абсциссы s и компоненты скорости v_y в зависимости от времени наблюдения t_n (числа n измерений доплеровской частоты) для траектории с параметрами $s = 10$ км, $\tau = 20$ с, $v = 200$ м/с и $\psi = 90^\circ$. Параметры системы имели значения: $a = 40$ км, $\lambda = 1$ м, $T = 1$ с, $\sigma_f = 0,2$ Гц. Зона действия системы условно задавалась границами $y = \pm 4$ км. На графике начало отсчета времени совпадает с моментом первого измерения: $t_1 = 0$. Время наблюдения и число измерений связаны равенством $t_n = (n - 1)T$ или $n = 1 + t_n/T$.

Другой вариант расчета точности, предназначенный для движения цели строго перпендикулярно линии базы ($\psi = 90^\circ$, $v_x = 0$), предусматривает оценку вектора

$$\chi_3 = [\tau, s, v_y]^T. \quad (7)$$

В этом случае расчет можно произвести по формуле, аналогичной (6),

$$\mathbf{Q}_3 = [\mathbf{H}_3^T \mathbf{R}^{-1} \mathbf{H}_3]^{-1}. \quad (8)$$

Матрица производных \mathbf{H}_3 имеет размер $n \times 3$ и содержит производные доплеровской частоты (5) только по параметрам τ , s , v_y (\mathbf{H}_3 получается из \mathbf{H}_4 исключением четвертого столбца).

Результаты расчета по (8) для рассмотренного примера представлены штриховой линией на рис. 2.

Из приведенных графиков видно, что наилучшая точность определения параметров траектории достигается на выходе цели из зоны действия; при этом σ_τ после пересечения целью линии базы меняется незначительно. На начальных участках траектории ошибки определения параметров велики, что связано с малым числом поступивших измерений. Точность оценки параметров неполного вектора χ_3 на начальных участках намного лучше, чем полного вектора χ_4 . Поэтому поиск координат цели в системе целесообразно начинать, исходя из предположения о движении цели ортогонально линии базы [7, 8].

Лучшая точность элементов вектора χ_3 в сравнении с χ_4 обусловлена меньшим количеством оцениваемых параметров при том же числе измерений доплеровской частоты [7, 9].

На практике не представляется возможным определить однозначно все траекторные параметры. Так, известно (см., например, [5]), что траектории с параметрами s и $(a - s)$ порождают одинаковую зависимость $f(t)$ (1). То же относится и к скорости цели – знак скорости v_y ($v_y > 0$ или $v_y < 0$) не влияет на вид функции $f(t)$. Оценить однозначно удастся параметр τ , причем с точностью, близкой к потенциальной, если измерения доплеровской частоты аппроксимировать полиномами первой или второй степени [8]. Оценка τ важна как для определения суммарной дальности $(r_n(t) + r_{\text{тр}}(t))$, которая, согласно (1), может находиться интегрированием частоты f от момента τ до текущего времени t [10], так и для определения направления прихода рассеянного сигнала интерферометрическими угломерными устройствами [11].

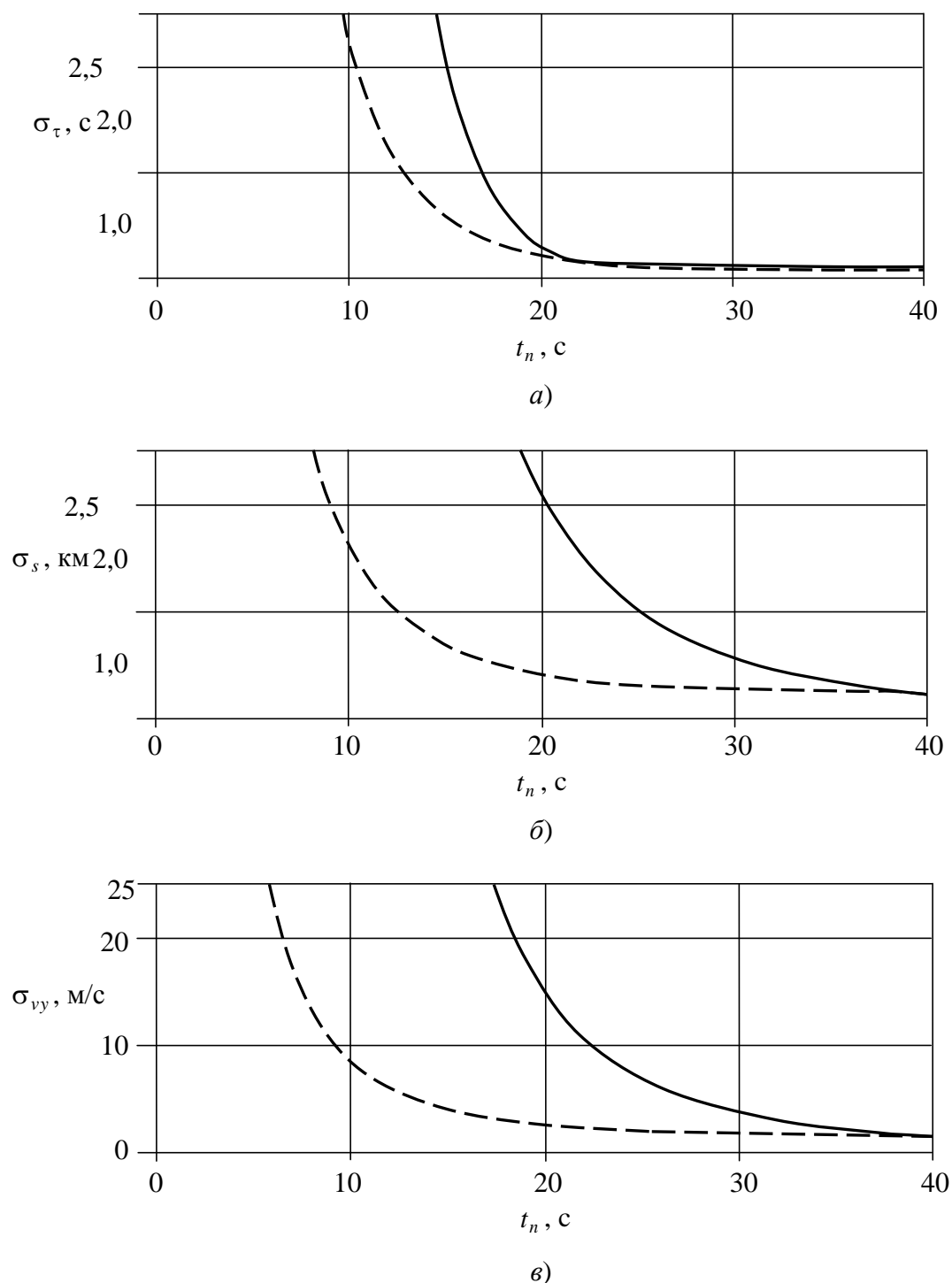


Рис. 2. Зависимость точности определения момента τ (а), абсциссы s (б) и компоненты скорости v_y (в) от времени наблюдения t_n

Неоднозначность измерения координат цели в рассматриваемой на рис. 1 системе устраняется добавлением еще одного приемника. В полученной таким образом РЛС (рис. 3) становится возможным определять направление на цель (угол θ) по разности фаз $\Delta\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$ колебаний в приемниках Пр₂ и Пр₁:

$$\sin \theta = \frac{\Delta\varphi \lambda}{2\pi b}, \quad (9)$$

где b – расстояние между приемниками, $b < \lambda/2$.

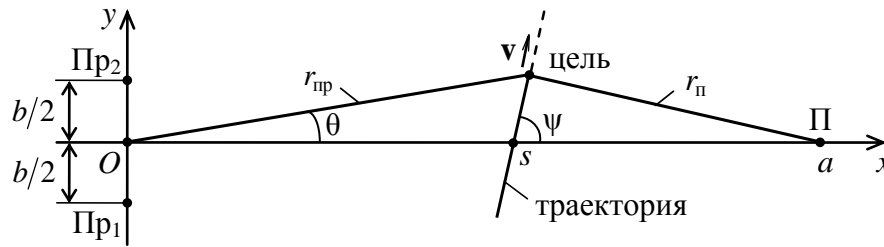


Рис. 3. Схема просветной РЛС с двумя приемниками

Если в (9) использовать разность фаз $\Delta\varphi_d = \varphi_{d2} - \varphi_{d1}$ напряжений доплеровской частоты (напряжений на выходе детекторов), то возникает неопределенность в знаке угла θ , связанная с потерей знака доплеровской частоты при амплитудном детектировании. В этом случае правильный знак угла θ можно определить по приращению разности фаз $\Delta\varphi_d$ протектированных колебаний: цель находится в нижней полуплоскости ($\theta < 0$), если $d\Delta\varphi_d(t)/dt > 0$; и наоборот, $\theta > 0$, если $d\Delta\varphi_d(t)/dt < 0$. На практике знак приращения $d\Delta\varphi_d(t)/dt$ можно найти по нескольким последовательным измерениям $\Delta\varphi_d$.

Такой подход к определению знака угла θ справедлив и при расстоянии между приемниками превышающими половину длины волны ($b > \lambda/2$). Неоднозначность, связанная с цикличностью разности фаз $\Delta\varphi$ колебаний, преодолевается путем измерения момента τ пересечения целью оси Ox и слежением за изменением этой разности во времени [11].

После измерения угла θ и доплеровской частоты f оценку координат можно найти угломерно-дальномерным методом [10, 12].

Выводы

Таким образом, используя выражения (6), (8), можно оценить точность определения траекторных параметров цели в бистатическом радиолокаторе с измерениями доплеровской частоты рассеянного сигнала. В рассмотренном случае равномерного движения цели ортогонально линии базы точность определения элементов вектора χ_3 (7) выше, чем элементов полного вектора χ_4 (4), особенно на начальных участках траектории. Это дает основание строить алгоритмы начальной оценки координат, исходя из движения цели поперек линии базы.

Оценки точности траекторных параметров, и прежде всего момента τ , важны для проектирования устройств измерения угла и измерения дальности, входящих составными частями в более сложные просветные радиолокационные комплексы. Примером такого устройства является фазовый пеленгатор интерференционного типа (рис. 3): оценка момента τ позволяет устранить неоднозначность, связанную с цикличностью разности фаз $\Delta\varphi$ колебаний в разнесенных приемниках.

Считаем своим приятным долгом поблагодарить члена-корреспондента РАН В.В. Кондратьева за поддержку работы.

Библиографический список

1. Уфимцев, П.Я. Основы физической теории дифракции / П.Я. Уфимцев. – М.: БИНОМ, 2011. – 351 с.
2. Чапурский, В.В. Синтезированная теневая радиолокация в бистатической радиолокации // Радиотехника. 2009. № 3. С. 52 – 69.
3. Бляхман, А.Б. Бистатическая эффективная площадь рассеяния и обнаружение объектов при радиолокации "на просвет" / А.Б. Бляхман, И.А. Рунова // Радиотехника и электроника. 2001. Т. 46. № 4. С. 424 – 432.
4. Точность определения координат методом максимального правдоподобия при локации «на просвет» / А.Г. Рындык [и др.] // Радиотехника и электроника. 1999. Т. 44. № 12. С. 1436 – 1440.

5. **Ковалев, Ф.Н.** Определение координат движущихся целей по измерениям доплеровской частоты в радиолокационных системах с обнаружением "на просвет" // Радиотехника и электроника. 2007. Т. 52. № 3. С. 331–339.
6. **Ковалев, Ф.Н.** Определение параметров траектории цели в просветных бистатических радиолокационных системах // Системы управления и информационные технологии. 2013. № 4(54). С. 86–90.
7. **Ковалев, А.Н.** Точность определения параметров траектории цели в просветной бистатической радиолокационной системе / А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. 2014. № 47. С. 58–62.
8. **Ковалев, А.Н.** Определение момента пересечения объектом отрезка между приемником и передатчиком в системах радиолокации на просвет / А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2013. № 4(12). С. 30–35.
9. **Ковалев, Ф.Н.** Потенциальная точность определения координат цели при локации «на просвет» с учетом нелинейного характера движения цели // Труды Нижегородского государственного технического университета. 2007. Т. 65. Вып. 14. С. 75–79.
10. Пат. 2133480 Рос. Федерация: МПК⁶ G01S3/72, G01S7/42. Радиолокационный способ определения параметров движения объекта / Бляхман А.Б., Самарин А.В.; заявитель и патентообладатель Нижегород. науч.-исслед. ин-т радиотехники. – № 98101955/09; заявл. 02.02.98; опубл. 20.07.99.
11. **Ковалев, Ф.Н.** Фазовая пеленгация в системах радиолокации на просвет / Ф.Н. Ковалев, В.В. Кондратьев // Доклады Академии наук. 2014. Т. 455. № 4. С. 401–403.
12. **Ковалев, А.Н.** Статистические характеристики ошибок местоопределения цели в бистатической радиолокационной системе просветного типа / А.Н. Ковалев, Ф.Н. Ковалев // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2014. Т. 57. № 3. С. 3–9.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

A.N. Kovalev, F.N. Kovalev

POTENCIAL ACCURACY OF THE DETERMINATION OF TARGET TRAJECTORY PARAMETERS IN FORWARD-SCATTERING BISTATIC RADAR SYSTEM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Calculation accuracy of the determination of target trajectory parameters by method of maximum likelihood from the Doppler data measured in forward-scattering bistatic radar system. The Doppler-frequency signal is separated by the amplitude detection of the sum signal in receiver. The sum signal consist of direct signal from the transmitter and signal reflected from the target.

Methodology / approach: Calculation of accuracy produced for Doppler frequency measurement errors with normal probability distribution. Inversion of Fisher information matrix is used.

Findings: Formulas of calculation the potential accuracy of the determination of target trajectory parameters from the Doppler data measured in forward-scattering bistatic radar system are obtained. An example of calculating the potential accuracy for forward-scattering radar with specific characteristics is described.

Research limitations/implications: Forward-scattering radar, range-finders and direction-finders with using phase method.

Originality/value: The presented methodology of calculation of accuracy allows to identify opportunities of forward-scattering radar system on design phase. It also allows to choose the parameters of the radar according with the required accuracy. So evaluation of the accuracy of determining the moment the location of an object between the transmitter and receiver allows to determine the parameters of range-finder and direction-finder of radar system.

Key words: forward-scattering radar, bistatic radar system, Doppler frequency, Fisher information matrix, trajectory parameters.

УДК 621.37.029.6

К.И. Кисиленко, А.С. Раевский, С.Б. Раевский

О ВЗАИМНЫХ ПОТОКАХ МОЩНОСТИ КОМПЛЕКСНЫХ ВОЛН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Расчеты взаимных потоков мощности комплексных волн в направляющих электродинамических структурах.**Методология/подход:** Используемая методология основана на теории несамосопряженных электродинамических операторов.**Выводы:** Результаты расчетов могут быть использованы при проектировании фильтров на основе комплексного резонанса.**Ограничения исследования/развитие исследований:** Настоящие результаты обеспечивают отправную точку для дальнейшего исследования свойств комплексных волн в направляющих электродинамических структурах.**Оригинальность/значение:** Исследуются комплексные волны в волноводных электродинамических структурах. Показывается, что собственные комплексные волны, не переносящие в среднем за период мощности, могут иметь взаимные потоки мощности, отличные от нуля.*Ключевые слова:* комплексные волны, взаимные потоки мощности, дисперсионное уравнение, комплексный резонанс.

Существование в неоднородных по поперечному сечению направляющих электродинамических структурах комплексных волн (КВ) [1-9] объясняется [10] распределенным разворотом мощности, приводящим к образованию встречных (в пределах поперечного сечения структуры) потоков энергии. В результате поток мощности каждой собственной КВ, средний за период, оказывается равным нулю. Как отмечалось в [11], указанные встречные потоки мощности своим существованием обязаны взаимодействию парциальных волн, на которые можно разложить поля любых волн направляющих структур [12].

Известно [13], что взаимодействие запредельных (реактивно затухающих) нормальных волн, не переносящих активной мощности, возникающих на любых нерегулярностях направляющей структуры, приводит к образованию отличного от нуля потока мощности, среднего за период. На этом явлении основывается принцип действия предельных аттенюаторов. Аналогичное явление обнаруживается и при совместном возбуждении КВ. Если каждая собственная КВ неоднородной направляющей структуры в результате равенства (в пределах поперечного сечения) встречных потоков мощности не переносит в среднем за период энергии, то их взаимный поток мощности может быть отличен от нуля. Покажем это.

Рассмотрим взаимодействие двух КВ со встречно убывающими полями, решение дисперсионного уравнения для которых изображается одной точкой на комплексной плоскости поперечного волнового числа. Как показано в [10, 12], источники, описываемые действительной функцией координат, возбуждают пары КВ с комплексно-сопряженными амплитудами и волновыми числами. Такие пары волн образуют поле стоячей волны, локализованное вблизи источника, то есть экспоненциально убывающее при удалении от него. В этом случае взаимодействие двух собственных КВ не приводит к возникновению ненулевого потока мощности. Возникновение экспоненциально убывающего от источника поля стоячей волны приводит к явлению, называемому комплексным резонансом [6]. Поскольку последний существует при обязательном присутствии [12] источника, колебание, соответствующее ему, следует [14] классифицировать как колебание, «присоединенное» к источнику.

Волны могут принадлежать любой неоднородной направляющей структуре, например, круглому двухслойному экранированному волноводу.

Продольная зависимость полей двух указанных волн имеет вид

$$e^{\pm i(\beta_1 + i\beta_2)z}, \quad (1)$$

где (-) соответствует прямой комплексной волне; (+) – обратной; $\beta_1 > 0$; $\beta_2 < 0$.

На комплексных плоскостях поперечных волновых чисел ($\alpha_{1,2}$) внутренней и внешней областей направляющей двухслойной структуры волнам (1) соответствуют одни и те же точки, являющиеся изображениями решений дисперсионного уравнения.

Описывая поля комплексных продольными компонентами векторов Герца,

$$\Pi_{z_{1,2}}^{e,m} = \Psi_{1,2}^{e,m}(r, \varphi) e^{\pm i\beta z},$$

где $\beta = \beta_1 + i\beta_2$; r и φ – цилиндрические координаты, индексы 1 и 2 соответствуют внутренней и внешней областям направляющей структуры. Для продольных компонент комплексных векторов Умова-Пойнтинга может иметь вид

$$S_{z_{1,2}} = \frac{|\beta|^2}{r} \left(\frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon \mu \omega^2}{r} \left(\frac{\partial \Psi^m}{\partial \varphi} \frac{\partial \Psi^{e*}}{\partial r} - \frac{\partial \Psi^m}{\partial r} \frac{\partial \Psi^{e*}}{\partial \varphi} \right) \pm \quad (2)$$

$$\pm \omega \varepsilon \beta \left(\left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \right|^2 \right) \pm \omega \varepsilon \beta^* \left(\left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial \varphi} \right|^2 \right),$$

где индекс 1 и знак (+) соответствуют прямой (первой) комплексной волне, индекс 2 и знак (-) – обратной (второй).

Поскольку для двух рассматриваемых волн имеет место равенство

$$\frac{\partial \Psi^{e,m(2)}}{\partial \varphi} = \frac{\partial \Psi^{e,m(1)}}{\partial \varphi},$$

их продольные компоненты векторов Умова-Пойнтинга, согласно (2), равны по величине и противоположны по знаку.

Продольная компонента взаимного комплексного вектора Умова-Пойнтинга записывается в виде

$$S_{z_{1,2}} = \left\{ \frac{|\beta|^2}{r} \left(\frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial r} \right) + \frac{\varepsilon \mu \omega^2}{r} \left(\frac{\partial \Psi^m}{\partial \varphi} \frac{\partial \Psi^{e*}}{\partial r} - \frac{\partial \Psi^m}{\partial r} \frac{\partial \Psi^{e*}}{\partial \varphi} \right) \pm \quad (3) \right.$$

$$\left. \pm \omega \varepsilon \beta \left(\left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \right|^2 \right) \pm \omega \varepsilon \beta^* \left(\left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial \varphi} \right|^2 \right) \right\} e^{-2i\beta z}.$$

Введем обозначения:

$$\frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial \varphi} - \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \frac{\partial \Psi^{m*}}{\partial r} = a + ib;$$

$$\omega \int_S \varepsilon \left(\left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^e}{\partial \varphi} \right|^2 \right) dS = x;$$

$$\omega \int_S \mu \left(\left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial r} \right|^2 + \frac{1}{r^2} \left| \frac{\partial \Psi^m}{\partial \varphi} \right|^2 \right) dS = y,$$

где S – площадь поперечного сечения направляющей структуры. В предположении равенства нулю собственных и взаимного потоков мощности в среднем за период из (2) и (3) получаем две системы линейных алгебраических уравнений относительно x и y :

$$x \pm y = -\frac{1}{\beta_1} \int_S \frac{a}{r} (\varepsilon \mu \omega^2 \pm |\beta|^2) dS; \quad (4)$$

$$x \mp y = -\frac{1}{\beta_2} \int_S \frac{b}{r} (\varepsilon \mu \omega^2 \mp |\beta|^2) dS.$$

В (4) верхние знаки соответствуют системе, получаемой из (2), нижние – из (3).

Нетрудно показать, что системы уравнений (4) несовместны. Отсюда следует вывод, что, поскольку равенство нулю потоков мощности собственных комплексных волн является известным [10] фактом, предположение о равенстве нулю взаимного потока мощности двух рассматриваемых комплексных волн, следствием которого является вторая система (4), некорректно.

Таким образом, показали, что взаимодействие двух комплексных волн любой направляющей структуры может привести к возникновению потока мощности среднего за период, отличного от нуля.

Библиографический список

1. **Clarricoots, D.J.B.** Evanescent and propagating modes of dielectric-loaded circular waveguides / D.J.B. Clarricoots and B.C. Taylor // Proc. IEE. 1964. V. 111. № 12. P. 1951.
2. **Шевченко, В.В.** Плавные волновые переходы / В.В. Шевченко. – М.: Наука, 1969. – 191 с.
3. **Раевский, С.Б.** Комплексные волны в двухслойном круглом экранированном волноводе // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1972. Т. XV. № 1. С. 112.
4. **Раевский, С.Б.** О существовании комплексных волн в некоторых двухслойных изотропных структурах // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1972. Т. XV. № 12. С. 1926.
5. **Калмык, В.А.** Экспериментальное исследование комплексных волн в двухслойном круглом экранированном волноводе / В.А. Калмык, С.Б. Раевский, В.П. Угрюмов // Радиотехника и электроника. 1978. Т. XXV. № 4. С. 699.
6. **Веселов, Г.И.** Исследование комплексных волн двухслойного экранированного волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский, В.А. Калмык // Радиотехника. 1980. Т. 35. № 9. С. 59.
7. **Веселов, Г.И.** Особенности волновых процессов в двухслойном волноводе круглого сечения / Г.И. Веселов, С.Г. Семенов // Радиотехника. 1982. Т. 37. № 10. С. 57.
8. **Веселов, Г.И.** Комплексные волны круглого диэлектрического волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 2. С. 230.
9. **Веселов, Г.И.** О спектре комплексных волн круглого диэлектрического волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. 1983. Т. 38. № 2. С. 55.
10. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 247 с.
11. **Веселов, Г.И.** О встречных потоках мощности в некоторых двухслойных изотропных структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Изв. вузов СССР. Радиофизика. 1983. Т. XXVI. № 8. С. 1041.
12. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника. 2010. – 223 с.
13. **Вайнштейн, Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988. – 440 с.
14. **Раевский, А.С.** Присоединенные колебания и волны в слоистых направляющих структурах / А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Антенны. 2014. Вып. 3.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

K.I. Kisilenko, A.S. Raevskii, S.B. Raevskii

ABOUT MUTUAL POWER FLOWS OF COMPLEX WAVES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Calculations of the mutual power flows of complex waves in the guide electrodynamic structures.

Design/methodology/approach: The methodology used is based on the theory of non-selfadjoint electrodynamic operators.

Findings: Results of calculations could be used in an engineering of filters based on complex resonance.

Research limitations/implications: The present results provide a starting-point for further research of properties of complex waves in the guide electrodynamic structures.

Originality/value: The researches deal with complex waves in the guide electrodynamic structures.

Key words: complex waves, mutual power flows, dispersion equation, complex resonance.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.466

А.С. Козелков^{1,2}, А.А. Куркин², Е.Н. Пелиновский^{2,3}

ЦУНАМИ КОСМОГЕННОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»¹

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород³

Цель: В работе обсуждаются цунами космогенного происхождения.

Метод: В основе исследования лежат физико-математические и численные модели космогенных цунами.

Результаты: Представлен краткий анализ потенциально опасных околоземных объектов, вероятность и возможные последствия их столкновения с Землей.

Область применения: Представленные результаты могут быть использованы при разработке усовершенствованных моделей космогенных цунами.

Ключевые слова: космогенные цунами, метеориты, астероиды, физико-математические и численные модели.

Введение

На рубеже XX и XXI вв. произошла существенная переоценка угрозы падения малых тел Солнечной системы на Землю, и эта тема начала привлекать все большее внимание. Падение метеорита в Челябинской области 15 февраля 2013 г. еще больше подогрело этот интерес. Стала появляться информация о сближении с Землей космических тел размерами от нескольких десятков метров до километров. Многие из этих объектов пролетают в непосредственной близости к Земле, на расстоянии, сравнимом с расстоянием до Луны. В связи с этим стали разрабатываться прогнозы опасного сближения астероидов с Землей на будущие десятилетия и даже столетия, а в науке прочно закрепился термин, олицетворяющий эту угрозу, – астероидно-кометная опасность.

В случае вхождения астероидов и метеоритов диаметром 5-6 км в Атлантический океан в нем могут возникнуть гигантские волны высотой несколько сотен метров, способные уничтожить Европу и Северную Америку [7]. Такие события уже происходили в прошлом. В данной работе представлен обзор текущего состояния исследований по космогенным цунами, а также методы и модели, используемые в настоящее время для анализа этого явления.

Данные о столкновениях астероидов с Землей

Столкновение с Землей крупных небесных тел с диаметром несколько километров, представляют достаточно редкие события, однако столкновение с телами малого и среднего размеров неоднократно имели место в прошлом. Число доказанных метеоритных кратеров, получивших название «астроблем» к настоящему времени составляет около двух сотен [1]. В течение последних 15 лет выполнен всесторонний поиск и анализ потенциально опасных околоземных объектов, приведший к открытию около десяти тысяч околоземных астероидов [2]. В настоящее время обнаружено более 800 астероидов большого диаметра, чьи орбиты могут пересечься

с Землей. Каждый год регистрируется 2–3 пролёта тел диаметром 100–1000 м на расстоянии 0,5–3 млн км от Земли, и многие такие пролеты регистрируются уже постфактум. В целом, вокруг Земли вращается более 7000 комет и астероидов, которые потенциально могут столкнуться с нашей планетой, причем 90% из них имеют диаметр более километра и 20% имеют опасные орбиты, сближающие их на расстояние менее 8 млн км [2 – 4], а 1% астероидов сближается с Землей на расстояние меньшее, чем до Луны [5]. Более того, по имеющимся данным, орбиту Земли пересекают несколько десятков активных комет и несколько сотен угасших комет, диаметрами ядра до 1 км. Столкновения с астероидами рассматривается как наиболее вероятные, поскольку лишь 0,4% опасных сближений приходится на периодические кометы [3]. Так называемые «долгопериодические» кометы могут подойти на потенциально опасную орбиту столкновения с Землей всего за два месяца до своего обнаружения.

Основную опасность в глобальном масштабе представляют собой тела диаметром более 1 км, тогда как серьезные континентальные или региональные разрушения могут вызвать тела и гораздо меньшего диаметра [7]. Последствия столкновения астероидов разного размера с Землей обсуждаются в [3, 8]. Оценки рисков показывают, что 53% астероидов могут упасть в Мировой океан с последующим образованием цунами [5]. Естественно, что у тел меньшего размера вероятность столкновения с Землей гораздо выше, чем у больших или гигантских астероидов. Так, метеорит диаметром 50 м сталкивается с Землей примерно раз в 100 лет, вызывая разрушения на площади около 2 кв. км, при этом энергия столкновения оценивается в 10 Мт (ТНТ эквивалент) [3, 9, 10–24]. С метеоритами диаметр в 1 км и более, Земля сталкивается в среднем раз в 100–200 тысяч лет. Следует отметить, что атмосфера Земли оказывает существенное воздействие на крупные астероиды, и зачастую они полностью испаряются в атмосфере [3, 8]. Это наблюдалось при падении Тунгусского метеорита, когда до Земли дошла только ударная волна, и в случае с Челябинским метеоритом, когда на землю упало несколько десятков фрагментов малого размера.

Можно выделить ряд проблем, изучение которых важно как для понимания физики космогенных цунами, так и для развития вычислительных технологий, их моделирования и предсказания. Вычислительные технологии для данной проблематики, по существу, являются единственным инструментом для понимания процессов столкновения, динамики, кратерообразования в планетарном масштабе. Многие процессы высокоскоростных соударений планетарного масштаба, такие как плавление, излучение, испарение и другие, невозможно воспроизвести в лабораторных условиях на Земле. Одной из слабо изученных стадий воздействия астероида на поверхность Земли является падение небесного тела в Мировой океан и образование волны цунами. Учитывая тот факт, что водная поверхность составляет около 2/3 от всей земной, вероятность падения астероида в океан гораздо выше, чем на сушу, примерно в пять раз [12]. Однако к настоящему времени обнаружено всего 15–20 кратеров, образованных при ударе в море [13]. Это связано с трудностями исследований на дне океана.

Модели космогенного цунами

Обзоры по тематике космогенных цунами содержатся в [3, 8, 14–16, 23, 29, 34]. Описание космогенного цунами представляется достаточно сложным в силу взаимовлияния друг на друга нескольких стадий, из которых можно выделить основные:

1. Определение характеристик астероида в атмосфере. На этой стадии, помимо оценки вероятности такого события, а также определения размеров, формы, скорости, плотности метеорита, необходимо учитывать ряд сложнейших процессов, таких как вращение, абляция, термохимия, потеря скорости и массы и др., которые повлияют на конечную скорость столкновения астероида с Землей.

2. Формирование кратера на водной поверхности. Процесс взаимодействия астероида с водой является сильно нелинейным, и формирования кратера сопровождается рядом специфических процессов, таких как парообразование, выброс воды в атмосферу, столкновение с водой нескольких осколков, приводящее к формированию группы очагов и др. На этом

этапе необходимо определить связь между характеристиками метеорита, батиметрией морского дна и параметрами очага возмущения.

3. Движение астероида в толще океана. Достаточно крупный астероид, упав в океан, способен беспрепятственно пройти сквозь его толщу и сформировать кратер на дне. На данном этапе необходимо определить влияние схлопывания газового пузыря на параметры очага цунами, образующегося за астероидом при прохождении толщи воды.

4. Разрушение водного кратера, влияние этого разрушения на формирование очага цунами.

5. Распространение цунами очень большой амплитуды и накат на сушу. По сравнению с цунами сейсмического происхождения волны цунами космогенного происхождения являются более нелинейными (их амплитуда достигает 100 м и более) и более дисперсионными (их длина сопоставима с глубиной океана).

С точки зрения моделирования космогенного цунами самой сложной задачей является движение астероида в атмосфере в части термохимии, которая важна для расчета траектории и потери массы астероида. Кинетическая энергия каменного метеорита диаметром 100 м, падающего со скоростью 20 км/с, составляет около 3×10^{17} Дж, что соответствует энергии очень сильного цунами сейсмического происхождения. Энергия астероида диаметром 1 км будет на три порядка больше, что в несколько раз превысит энергию сильнейшего Чилийского землетрясения 1960 г. Оценка кинетической энергии (в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента), выделенной в результате столкновения, может быть осуществлена по формуле [20]

$$E = 6.256 \times 10^{-8} d^3 v^2 \rho_a, \quad (1)$$

здесь d – диаметр астероида; v – скорость астероида относительно Земли; ρ_a – плотность астероида (здесь и далее все единицы величин в формулах соответствуют системе СИ). В [20] приводятся оценочные значения кинетической энергии столкновения для короткопериодических и долгопериодических комет различного диаметра.

Также проблематичной является стадия удара небесного тела о водную поверхность и формирование каверны с последующей ее эволюцией, образованием подводных пузырей и их влиянием на формирование очага. Исследования в этой области связаны с теорией кратерообразования, которые, можно разделить на два направления. Первое из них опирается на теорию взрыва, а второе – на механику несжимаемых жидкостей. Применение методов механики несжимаемой жидкости объясняется тем, что давление, возникающее при взрыве, настолько велико, что прочностными и упругопластическими свойствами среды в большинстве случаев можно пренебречь, как и силами трения по сравнению с инерционными силами. Более того, если пренебречь сжимаемостью среды, то и получается модель несжимаемой жидкости, в которой, в общем случае, можно учесть и силы трения с помощью введения вязкости. Моделирование кратерообразования в рамках данной модели дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [17].

При падении метеорита в воду наблюдается ряд специфических эффектов: движение метеорита в водной среде; обрушение волн; выброс воды в атмосферу; парообразование и др. [19, 28], для которых потребуется усложнение общей модели. Кроме того, в отличие от твердой поверхности, при ударе тела о поверхность воды значительная его часть (от 25 до 100% в зависимости от скорости и угла наклона траектории) остается нерасплавленной. Все эти процессы являются серьезным препятствием для теоретического анализа.

Помимо волн, образовавшихся непосредственно из-за удара о поверхность, также образуются вторичные волны, связанные с динамикой кратера в результате его схлопывания и заполнения водой. Часть процессов, учитываемых в модели падения на твердую поверхность, при падении метеорита в воду можно не рассматривать. К таким процессам можно отнести разброс и дробление метеорита, которые не повлияют на формирование волновой картины, если, конечно, фрагменты не являются достаточно крупными.

Падение крупного метеорита, способного вызвать волну цунами высотой в сотню

метров, является редким событием, однако прогнозирование данного явления представляется актуальным (они имели место ранее [22, 23] и могут нанести существенный ущерб при возникновении вновь [24]). В работе [22] приводится исторический очерк космогенных цунами, которые возникали в прошлом (около 10), их географическое распределение показано на рис. 1. Особо отметим два события, которые произошли на территории России (Калуга, 380 млн лет назад, когда на этой территории было море, и Баренцево море, 142 млн лет назад).

Исследование возникновения космогенных цунами порождает массу проблем, для решения которых построение единой физико-математической модели едва ли представляется возможным. Общая модель должна учитывать процессы гидро-, аэродинамики, механики напряженно-деформированного состояния, динамики многокомпонентных сред, а в более сложном случае и многофазных сред. По этой причине при моделировании космогенных цунами выделяют ряд подзадач, для которых строятся конкретные модели. К наиболее общим из таких задач можно отнести: формирование очага, т.е. непосредственно падение метеорита; кратерообразование на дне океана; выброс воды в атмосферу; распространение волны; ряд других.

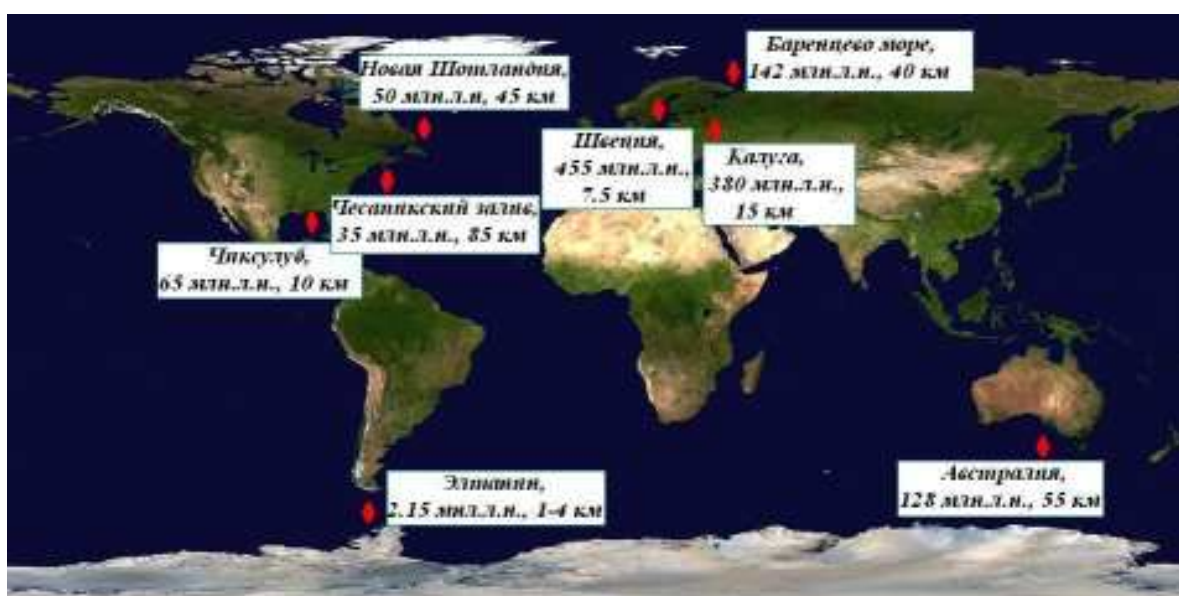


Рис. 1. Места наблюдения исторических «космогенных цунами» [22]

На этапе образования водного кратера можно выделить три связанных гидродинамических потока. Первый поток - воздушный, возникающий в результате выталкивания телом газа из промежуточного водного кратера (каверны), созданного падением (рис. 2). Скорость данного потока существенно связана со вторым гидродинамическим потоком, возникающим при схлопывании стенок полости кратера, который в результате устремляется вверх и приводит к образованию султана [25]. В процессе погружения за телом образуется третий гидродинамический поток – турбулентный вихревой след с развитой кавитацией, состоящий из пары крупных вытянутых вихрей, вращающихся в разные стороны.

Форма промежуточного водного кратера до начала его трансформации с большой вероятностью будет совпадать с формой аналогичного кратера на твердой поверхности, однако механизм его образования совсем иной. Высоты и формы центральной и периферийной частей будут различаться. В водном кратере эти высоты будут зависеть от размера и формы астероида, его скорости, и, что немало важно, от процессов, происходящих в толще воды. Все это, несомненно, повлияет на высоту, форму и скорость распространения волны цунами из очага.

При падении в глубоководный район океана волна цунами, как показывают расчеты [13, 26, 27], будет сформирована в результате схлопывания промежуточного водного кратера. При диаметре астероида менее 0,5 км водный кратер не достигнет дна океана. В случае достижения дна астероидом, при достаточном его размере и скорости, образование донной

структуры может сопровождаться перемещением периферийной его части и структурного подъема дна в процессе роста кратера, что также может сгенерировать волну цунами. Такой процесс имел место при образовании кратера Мьолнир диаметром 40 км в Баренцевом море [13]. Этот кратер был образован 140 млн лет назад при падении астероида диаметром 1–3 км в море глубиной 300–500 м.

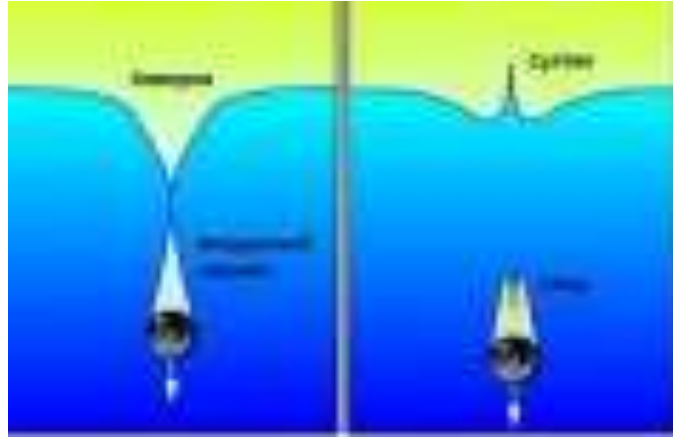


Рис. 2. Стадии формирования водного кратера. Образование каверны и «воздушного кармана» в толще воды (слева) и следа за телом с формированием «султана» на поверхности (справа)

Оценка достижения дна астероидом и возможное образование донного кратера приводится в [13]. Для определения влияния толщи воды на процесс кратерообразования на дне вводится параметр d/H (d – диаметр астероида, H – глубина моря). При $0,1 < d/H < 1$ толща океана существенно влияет на этот процесс, размеры и морфологию кратера, при $d/H < 0,1$ кратер не образуется вообще, а при $d > H$ слой воды не влияет на ход процесса кратерообразования. Если диаметр астероида в четыре раза больше, чем глубина океана, он достигает дна без особых разрушений и торможения.

Первая волна цунами начнет распространяться уже с начальной стадии падения тела – промежуточного водного кратера. Именно такую форму источника в качестве начального возмущения используют во многих работах по моделированию распространения космогенного цунами [22, 23, 28, 29]. В этих работах стадия падения и погружения астероида не рассматривается, а форма каверны на поверхности задается с помощью приближенных аналитических формул. В частности, предполагают, что на начальной стадии кратерообразования метеорит создает радиально симметричную полость, которая может быть описана функцией [16, 30]

$$\begin{aligned} \eta^{\text{imp}}(r) &= D_C(1 - r^2/R_C^2), & r \leq R_D, \\ \eta^{\text{imp}}(r) &= 0, & r > R_D, \end{aligned} \quad (2)$$

где D_C – глубина каверны, R_C и R_D – внутренний и внешний радиусы каверны соответственно. В случае равенства радиусов каверны $R_C = R_D$ поверхность представляет собой впадину (рис. 3), что соответствует выбросу воды в атмосферу или её испарению [16]. В случае $R_D = \sqrt{2}R_C$ вода, выброшенная из каверны, формирует внешний всплеск – кольцевую структуру, характерную при падении объекта в воду, объем которой в точности соответствует объему воды, выброшенному из каверны.

Предполагая переход кинетической энергии астероида в потенциальную энергию смещения уровня воды, в [30] выводятся простые аналитические формулы для вычисления радиуса и глубины каверны:

$$D_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon\rho_I R_I^3 V_I^2}{\rho_w g R_C^2}}, \quad R_C = R_I \left(2\varepsilon \frac{V_I^2}{g R_I} \right)^{\delta} \left(\frac{\rho_I}{\rho_w} \right)^{1/3} \left(\left(\frac{\rho_w}{\rho_I} \right)^{1/3 - \delta} \left(\frac{1}{q R_I^{a-1}} \right)^{2\delta} \right), \quad (3)$$

где ρ_w – плотность воды; g – ускорение силы тяжести; ε – доля кинетической энергии метеорита, переходящая в энергию цунами; ρ_I , R_I , V_I – плотность, радиус и скорость метеорита; q и α – коэффициенты, связанные со свойствами метеорита и водного слоя, $\delta = 1/(2\alpha + 2)$. Численные результаты, полученные с применением сложных нелинейных моделей, вполне согласуются с параметризацией вида (2) и (3) [16], хотя этот вопрос нуждается в дальнейших исследованиях.

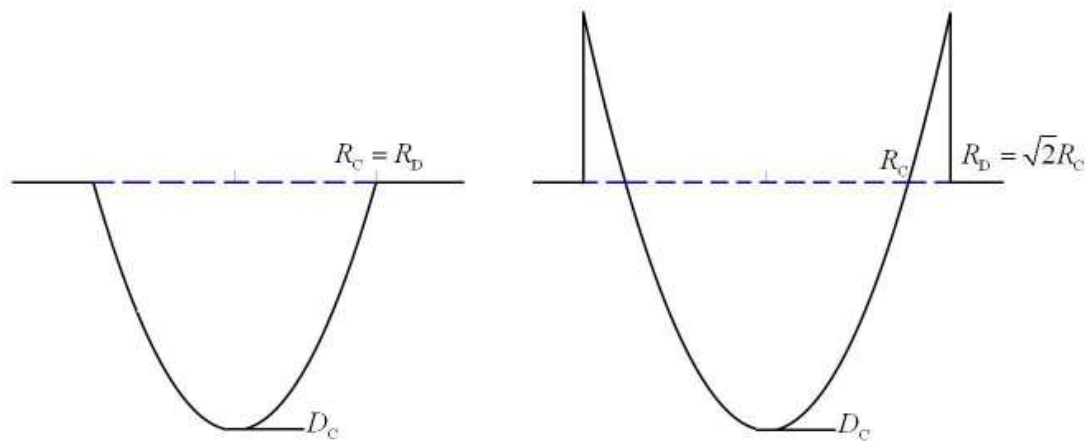


Рис. 3. Начальное возмущение водной поверхности

Экспериментальные исследования образования каверны на поверхности воды при падении тела с гиперзвуковой скоростью описаны в [17]. В эксперименте оценивались радиус и глубина каверны, образованной ударом о жидкость стеклянного шарика диаметром 2 мм, движущегося со скоростью 4,64 км/с. Использование таких экспериментов полезно на стадии калибровки численных моделей. Использование этих знаний для объяснения механизма образования земных кратеров, вообще говоря, некорректно, поскольку здесь исследуются прочностные кратера малого диаметра, морфология которых отличается от крупных гравитационных кратеров [13].

Сформированная волна цунами, согласно расчетам по линейной теории, как уже говорилось, может достигать высоты несколько сотен метров и даже нескольких километров [13, 22, 26–28, 31, 32]. При численном моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» [13, 26] амплитуда волны цунами достигает более километра непосредственно в очаге, 300 м на расстоянии 70 км от очага и около 10 м вблизи побережья Южной Америки. В расчетах потенциального цунами от возможного падения астероида 1950 DA (1,1 км в диаметре) в Атлантический океан, которое может произойти 16 марта 2880 г., высота цунами может достигать 100 м вблизи побережья Северной Америки и 20 м вблизи Европы [6]. Анализ численных расчетов наклонного падения астероида (15° к горизонту) показывает, что возникающая волна цунами быстро становится симметричной (в радиусе 50 км) и ее амплитуда слабо зависит от направления распространения [26]. В цитируемых численных работах для моделирования распространения цунами используется линейная теория волн на воде в бассейне постоянной глубины. Очевидна, однако, неприменимость линейной теории волн к волнам космогенного происхождения.

В настоящее время не произошло ни одного космогенного цунами, что не позволяет сопоставить результаты моделирования с натурными данными. Высоты сгенерированных волн, полученные численно, могут быть сопоставлены с эмпирической формулой, выведенной на основании экспериментальных данных, полученных в ходе проведения подводных взрывов [26]:

$$h = 45 \frac{H}{L} (E)^{0.25}, \quad (4)$$

где h – высота волны; H – глубина океана; L – расстояние от источника. Оценка высот волны

цунами на разных расстояниях от источника при моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» дает хорошее совпадение с данными, полученными по формуле (4) [13, 26]. Однако эта формула дает адекватное совпадение только в случае генерации волны цунами в результате схлопывания промежуточного водного кратера. Если волна цунами генерируется еще и подвижками дна, происходящими в результате кратерообразования, то данная формула дает большую погрешность (до нескольких раз).

В [20] приводится таблица высот волн космогенного цунами в зависимости от размера астероида, основанная на формуле, выведенной в Лос-Аламосской Национальной лаборатории для оценки высот цунами на расстоянии 1000 км от точки столкновения:

$$h = 1,0081 \times 10^{-5} (d^3 v^2 \rho_a)^{0.54}, \quad (5)$$

где все обозначения были приведены ранее.

Калибровка численных методик, предназначенных для моделирования распространения космогенных цунами, также может быть проведена на некоторых доступных экспериментальных данных. В работе [33] экспериментально исследовались гравитационные волны при свободном падении тела в мелководный бассейн. При этом опыты проводились так, чтобы как можно сильнее проявились эффекты, связанные с конечной глубиной жидкости. В проведенном эксперименте обращает на себя внимание тот факт, что при вертикальном падении кубического тела, помимо выброса вертикальной струи из основной массы жидкости, выбрасывается еще и горизонтальная струя. Показано, насколько сложно описать гравитационные волны, располагая только данными об энергии падающего тела, если она достаточно велика, а в случае падения небесного тела она будет очень велика. Еще один вывод из этих экспериментов: при всей сложности процессов вблизи тела на больших расстояниях от очага формируются уединенные волны предельной амплитуды. В связи с этим становится важным вопрос о возможном числе уединенных волн при падении астероида в океан. В представленном опыте больше двух следующих друг за другом уединенных волн получить не удалось, хотя здесь же отмечается, что в опыте со смещением участка дна бассейна уединенных волн наблюдалось большое количество.

Падение астероида в океан сгенерирует волну, отличающуюся от волны, порождаемой подводным землетрясением. Волны цунами сейсмического происхождения являются очень длинными, их длина намного превышает глубину океана, они распространяются с очень малой потерей энергии на большие расстояния со скоростью $c = \sqrt{gh}$. В проведенных вычислениях [29] скорость волн, сгенерированных в результате падения астероида, значительно меньше, чем \sqrt{gh} , а длина в два раза меньше диаметра промежуточного водного кратера. Отсюда следует важная роль дисперсионных эффектов в проблеме цунами космогенного происхождения, в то время как для описания цунами сейсмического происхождения широко используется теория мелкой воды [22, 37 – 39], в рамках которой давление является строго гидростатическим. Кроме того, в задачах с большими расчетными областями и сложной структурой дна неизбежно будут возникать области, в которых приближение мелкой воды, строго говоря, не применимо из-за трехмерного характера течения.

Для описания процессов в очаге цунами необходимо использовать полную систему уравнений Навье-Стокса. Однако численное интегрирование системы уравнений Навье-Стокса является весьма сложной и трудозатратной задачей. В настоящее время космогенные цунами моделируют с помощью уравнений Эйлера [29], уравнений Буссинеска [14, 31]; используют полуэмпирические модели [6, 24], а также уравнений мелкой воды, учитывающих донное трение [23]. Различные подходы к моделированию космогенного цунами рассматриваются в [34]. Здесь анализируются модели образования источника, возможность применения линейной теории и теории мелкой воды для распространения волн, а также сравнительный анализ результатов моделирования космогенных цунами, ранее полученных другими авторами, который зачастую показывает существенные различия в некоторых оценках.

Стратегия численного моделирования космогенного цунами, включая все стадии от образования начального возмущения на поверхности до заплеска на сушу, представлена в [32]. В этих расчетах глубина океана также предполагалась постоянной, а заплеск волны на берег вычислялся для модельного шельфа с определенным углом наклона. В представленной стратегии образование начальной волны, распространение и заплеск считались по разным программам. Сгенерированный источник волны цунами передавался в качестве граничного условия в программу расчета её распространения, после чего по специальной программе вычислялся заплеск волны на берег. Воздействие космогенного цунами на побережье Черного моря анализируется в [34]. Здесь в качестве источника использовалась аналитическая формула, а распространение моделировалось с помощью двумерных уравнений теории мелкой воды.

Одновременное моделирование стадии начального возмущения и распространения волны цунами на примере известных исторических подводных образований рассматривается в [13, 26, 27]. Здесь используются уравнения Эйлера, а глубина океана считается постоянной. В этих работах большее внимание все же уделяется кратерообразованию на дне океана, а не волнам цунами. Подчеркивается существенное влияние глубины океана на процессы, происходящие при падении астероида.

Моделирование распространения космогенных цунами и их возможное воздействие, включая оценку экономического ущерба, на побережье Тихого океана проводилось в [21, 35]. Здесь источник задавался в виде аналитической формулы. По проведенным расчетам получается, что максимальная высота цунами на Японском побережье составит более 60 м. Возможные последствия для Европы и Америки от падения астероида диаметром 5 км в середину Атлантического океана обсуждаются в [7, 35]. По данному прогнозу, цунами наводнят две трети верхней части Восточных США до предгорий Аппалач. В Европе самое сильное воздействие придется на Португалию.

Заключение

Были обсуждены кратко существующие методы расчета волн цунами космогенного происхождения. Много, особенно это касается очага, в этой области еще только предстоит исследовать, и здесь много не изученных вопросов. Численное моделирование данного явления пока еще осуществляется только в двумерном виде и на основе упрощенных моделей, что также не учитывает некоторые реальные эффекты при генерации и распространении. Работы по распространению волн в реальных акваториях моделировались только с очагом, задаваемом в аналитическом виде, а все исторические «импакты», способные сгенерировать волну цунами, не учитывали реальную батиметрию дна и были больше нацелены на моделирование кратерообразования, нежели на полноценный анализ космогенных цунами. Полноценное описание воздействия астероида на поверхность океана, на наш взгляд, возможно только при использовании полномасштабной физико-математической модели, основанной на системе уравнений гидродинамики и учитывающей, в том числе, многофазные течения. При изучении космогенных цунами на первом этапе межфазовым взаимодействием атмосферы и океана можно пренебречь, ограничившись лишь учетом плотности и давления. Такие модели в настоящее время уже разработаны за рубежом, и их сопоставление сделано в [17]. Отметим и российские программы [10, 18]. Они могут быть использованы для более точной оценки характеристик на всех стадиях образования и распространения волн цунами несейсмического происхождения.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133. Частично эта работа поддержана для ЕП грантом РФФИ (14-05-00092).

Библиографический список

1. Earth Impact Database [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> – 11.11.13.

2. Near-Earth Object Program (NASA, JPL). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
3. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: Физматлит, 2010. – 384 с.
4. **Chapman, C.R.** The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 222. P. 1–15.
5. Report of the Near-Earth Object Science Definition Team. Study to Determine the Feasibility of Extending the Search for Near-Earth Objects to Smaller Limiting Diameters. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
6. **Ward S.N., Asphaug E.** Asteroid impact tsunamis of 2880 March 16 / S.N. Ward, E. Asphaug // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153. P. F6 – F10.
7. **Hills J.G., Goda M.P.** Damage from comet-asteroid impacts with earth / S.N. Ward, E. Asphaug // *Physica D*. 1999. V. 133. P. 189–198.
8. **Nemchinov I., Shuvalov V., Svetov V.** Main factor of hazards due to comets and asteroids / I. Nemchinov, V. Shuvalov, V. Svetov // *Catastrophic events caused by cosmic objects*; Eds. V.V. Adushkin, I.V. Nemchinov. – New York, Heidelberg: Springer, 2008. P. 1–89.
9. **Paine, M.P.** Asteroid impacts: The extra hazard due to tsunamis // *Science of Tsunami Hazards*. 1999. V. 17. №. 3. P. 155–166.
10. **Минаков А.В., Гаврилов А.А., Дектерев А.А.** Численный алгоритм решения пространственных задач гидродинамики с подвижными твердыми телами и свободной поверхностью / А.В. Минаков, А.А. Гаврилов, А.А. Дектерев // *Сибирский журнал индустриальной математики*. 2008. Т. XI. № 4 (36). С. 94–04.
11. **Benest D., Froeschele C.** Impacts on Earth / D. Benest, C. Froeschele. – New York, Heidelberg: Springer, 1998. – 233 p.
12. **Morrison, D.** Defending the Earth against asteroids: the case for a global response // *Science and Global Security*. 2005. V. 13. P. 87–103.
13. **Shuvalov, V.V., Trubestkaya I.A.** Numerical modeling of marine target impacts / V.V. Shuvalov, I.A. Trubestkaya // *Solar System Research*. 2002. V. 36. №. 5. P. 417–430.
14. **Korycansky D.G., Lynett P.J.** Run-up from impact tsunamis / D.G. Korycansky, P.J. Lynett // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170. P. 1076–1088.
15. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
16. **Левин, Б.В., Носов М.А.** Физика цунами и родственных явлений в океане / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус-К, 2005. – 360 с.
17. **Pierazzo E., Artemieva N., Asphaug E.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets / E. Pierazzo [et al.] // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. V. 43. №. 12. P. 1917 – 1938.
18. **Волков К.Н., Дерюгин Ю.Н., Емельянов В.Н.** Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – 600 с.
19. **Badescu, V.** Risks for poisoning of coastal and inland population due to asteroid impacts in Southern regions of Black Sea // *Stoch Environ Res Risk Assess*. 2008. V. 22. P. 461–476.
20. **Marusek, J.A.** Comet and asteroid threat impact analysis // Report of American Institute of Aeronautics and Astronautics, presented on the 2nd International Planetary Defense Conference (George Washington University, Washington, D.C., 5-8 March 2007). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.breadandbuttersscience.com/CATIS.pdf>
21. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean – II // *Earth, Moon and Planets*. 1997–1998. V. 76. P. 117–121.
22. **Kharif, C., Pelinovsky E.** Asteroid impact tsunamis / C. Kharif, E. Pelinovsky // *C. R. Physique*. 2005. V. 6. P. 361–366.
23. **Isvoranu, D., Badescu V.** Hydrodynamics of tsunamis generated by asteroid impact in the Black Sea / D. Isvoranu, V. Badescu // *Cent. Eur. J. Phys*. 2012. V. 10. P. 429–446.
24. **Chesley S.R., Ward S.N.** A Quantitative Assessment of the human and economic hazard from impact-generated tsunamis / S.R. Chesley, S.N. Ward // *Natural Hazards*. 2006. V. 38. P. 355–374.
25. **Лаврентьев, М.А., Шабат Б.В.** Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 473 с.

26. **Shuvalov, V.V., Trubetskaya I.A.** Numerical Modeling of the Formation of the Eltanin Submarine Impact Structure / V.V. Shuvalov, I.A. Trubetskaya // Solar System Research. 2007. V. 41. № 1. P. 56–64.
27. **Shuvalov, V.V., Dypvik H., Kalleson E.** Modeling the 2.7 km in diameter, shallow marine Ritland Impact Structure / V.V. Shuvalov [et al.] // Earth Moon Planets. 2012. V. 108. P. 175–188.
28. **Schuiling R.D., Cathcart R.B., Badescu V.** Asteroid impact in the Black Sea. Death by drowning or asphyxiation? / R.D. Schuiling [et al.] // Nat. Hazards. 2007. V. 40. P. 327–338.
29. **Gisler, G., Weaver R., Gittings M.** Calculations of Asteroid Impacts into Deep and Shallow Water / G. Gisler, R. Weaver, M. Gittings // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. P. 1187–1198.
30. **Ward, S.N., Asphaug E.** Asteroid impact tsunamis: A probabilistic hazard assessment / S.N. Ward, E. Asphaug // Icarus. 2000. V. 145. № 1. P. 64–78.
31. **Glimsdal, S., Pedersen G.K., Langtangen H.P.** Tsunami generation and propagation from the Mjølner asteroid impact / S. Glimsdal [et al.] // Meteoritics & Planetary Science. 2007. V. 42. № 9. P. 1473–1493.
32. **Weiss R., Wunnemann K., Bahlburg H.** Numerical modelling of generation, propagation and run-up of tsunamis caused by oceanic impacts: model strategy and technical solutions / R. Weiss, K. Wunnemann, H. Bahlburg // Geophys. J. Int. 2006. V. 167. P. 77–88.
33. **Букреев, В.И., Гусев А.В.** Гравитационные волны при падении тела на мелкую воду / В.И. Букреев, А.В. Гусев // Прикладная механика и техническая физика. 1996. Т. 37. № 2. С. 90–98.
34. **Badescu, V., Isvoranu D.** Dynamics and Coastal Effects of Tsunamis Generated by Asteroids Impacting the Black Sea / V. Badescu, D. Isvoranu // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. P. 1813–1834.
35. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean // Earth, Moon and Planets. 1994. V. 65. P. 7–13.
36. **Тирский, Г.А.** Взаимодействие космических тел с атмосферами земли и планет // Соросовский образовательный журнал. 2000. Т. 6. № 5. С. 76–82.
37. **Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
38. **Зайцев А.И., Ковалев Д.П., Куркин А.А.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады Академии наук. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
39. **Kurkin A.A., Pelinovskii E.N., Choi B.H.** A comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian coast of the Sea of Japan based on numerical simulation / A.A. Kurkin [et al.] // Oceanology. 2004. T. 44. № 2. C. 163–172.

*Дата поступления
в редакцию 05.05.2014*

A.S. Kozelkov^{1,2}, A.A. Kurkin², E.N. Pelinovsky^{2,3}

TSUNAMI OF COSMOGENIC ORIGIN

FSUE «RFNC – VNIIEF»¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Institute of applied physics of the Russian Academy of sciences³

Purpose: In this paper the tsunamis of cosmogenic origin are discussed.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models of cosmogenic tsunamis.

Results: A brief analysis of potentially hazardous near-Earth objects, their likelihood and possible consequences of a collision with Earth is presented.

Application domain: Presented results can be used to develop improved models of cosmogenic tsunamis.

Key words: cosmogenic tsunamis, meteors, asteroids, physical-mathematical and numerical models.

УДК 532.5

Р.В. Шамин, А.В. Юдин, К.И. Кузнецов

**ЧАСТОТА ОБНАРУЖЕНИЯ АНОМАЛЬНО БОЛЬШИХ
ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОЛН НА ОСНОВЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ В ЗАДАННОЙ ТОЧКЕ ОБЛАСТИ**Сахалинский государственный университет, г. Южно-Сахалинск,
Российский университет дружбы народов, Москва**Цель:** В работе обсуждаются аномально большие поверхностные волны.**Метод:** В основе исследования лежит метод вычислительных экспериментов по моделированию плоского поверхностного волнения на основе полных нелинейных уравнений.**Результаты:** Созданы и апробированы новые методики вычислительных экспериментов, которые позволяют проводить расчеты на потенциально неограниченном временном интервале и для достаточно широкой пространственной области, что необходимо для исследования аномально больших поверхностных волн в океане. Исследована статистика возникновения волн-убийц в зависимости от параметров начального волнения.**Область применения:** Представленные результаты могут быть применены для оценки времени ожидания волны-убийцы в заданной точке.*Ключевые слова:* волна-убийца, вычислительный эксперимент, гидродинамика идеальной жидкости.**Введение**

Среди катастрофических явлений в океане волны-убийцы занимают особое место. Это одиночные волны, которые возникают внезапно и могут достигать значительной амплитуды (известны случаи до 30 м) [1]. Именно внезапность обуславливает серьезность опасности этих волн для судов и морских сооружений. Изучение таких волн ведется с помощью натуральных измерений и лабораторных опытов [2], также получены интересные результаты в теоретическом анализе аномальных краевых волн [3–7]. Но наибольший прогресс в последнее время был достигнут при использовании вычислительных экспериментов [8–15].

В настоящей статье рассматриваются вычислительные эксперименты, основанные на полных нелинейных уравнениях гидродинамики идеальной жидкости со свободной поверхностью. В этих экспериментах мы моделируем распространение поверхностных волн в условиях бесконечной глубины. В различных сериях экспериментов варьировался квадрат средней крутизны и дисперсия. В результате этих экспериментов получена статистика экстремальных поверхностных волн.

Уравнения в конформных переменных, описывающие волны на воде

В настоящей работе моделирование волн-убийц основано на численном решении уравнений, описывающих нестационарное течение идеальной жидкости со свободной поверхностью. Мы будем рассматривать плоское течение с бесконечно глубоким дном. По горизонтальной переменной мы будем рассматривать 2π -периодические условия. Такие предположения являются естественными для моделирования волн-убийц.

Будем использовать уравнения в конформных переменных. Идея использовать конформные переменные для описания нестационарного течения идеальной жидкости со свободной поверхностью впервые была предложена в работах [16, 17]. Для численного моделирования уравнения в конформных переменных использовались в работах [18 – 20] и многих других. Мы рассмотрим вариант этих уравнений, предложенный в работе [21]. Пусть идеальная жидкость занимает бесконечную область в переменных (x, y) , ограниченную криволинейной границей. Мы вводим комплексную плоскость $z = x + iy$. Эту область мы можем

(по теореме Римана) конформно отобразить на нижнюю полуплоскость с переменными $w = u + iv$.

Обратное конформное отображение выражается аналитической функцией

$$z = z(t, w).$$

Эта функция является также функцией времени, поскольку мы рассматриваем нестационарную задачу. Зная функцию $z(t, u)$, мы можем восстановить профиль свободной поверхности. Для описания потенциального течения идеальной жидкости необходимо также знать потенциал скоростей. Поскольку потенциал является гармонической функцией, то все его значения могут быть описаны значением этого потенциала лишь на границе области. Пусть $\psi(t, x)$ – значение потенциала скоростей на свободной поверхности. Соответственно через $\Phi(t, z)$ мы обозначим аналитическую в нижней полуплоскости функцию такую, что $\text{Re } \Phi(t, z) = \psi(t, x)$. Будем рассматривать функцию $\Pi(t, w) = \Phi(t, z(t, w))$, которая также будет аналитичной в нижней полуплоскости. Теперь введем новые переменные:

$$R(t, w) = \frac{1}{z'(t, w)}, \quad V(t, w) = i \frac{\Pi'(t, w)}{z'(t, w)}.$$

Здесь и далее штрихом мы обозначаем производную по переменной w . Эти функции являются аналитическими в нижней полуплоскости и удовлетворяют краевым условиям:

$$\begin{aligned} R(t, w) &\rightarrow 1, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty, \\ V(t, w) &\rightarrow 0, \quad \text{Im } w \rightarrow -\infty. \end{aligned}$$

Поскольку мы рассматриваем поверхностные волны 2π -периодические по переменной x , то и функции R и V также будут 2π -периодическими по переменной u . Тогда функции R и V можно представить в виде рядов Фурье:

$$\begin{aligned} R(t, w) &= 1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t) e^{-ikw}, \\ V(t, w) &= \sum_{k=1}^{\infty} v_k(t) e^{-ikw}. \end{aligned}$$

Функции R и V полностью описывают динамику поверхностных волн идеальной жидкости. При этом нам достаточно знать лишь значения этих функций на вещественной оси (при $v = 0$), поэтому в дальнейшем мы будем рассматривать аргумент u вместо w .

Покажем, как с помощью этих функций восстановить свободную поверхность и значение потенциала на свободной поверхности. Для функции R^{-1} имеет место представление

$$R^{-1} = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) e^{-iku}.$$

Значения коэффициентов c_k несложно получить рекуррентно из соотношения

$$\left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} c_k(t) e^{-iku} \right) \left(1 + \sum_{k=1}^{\infty} r_k(t) e^{-iku} \right) = 1.$$

Умножением рядов можно получить разложение

$$-i \frac{V(t, u)}{R} = \sum_{k=1}^{\infty} d_k(t) e^{-iku}.$$

Теперь восстановим функцию $z(u, t)$ следующим образом:

$$z(t, u) = u + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{-ik} c_k(t) e^{-iku},$$

а функцию $\Pi(u, t)$ – по формуле $\Pi(t, u) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{-ik} d_k(t) e^{-iku}$.

Свободную поверхность получим как геометрическое место точек по следующему правилу:

$$\Gamma(t) = \{(\operatorname{Re} z(t, u), \operatorname{Im} z(t, u)): u \in (0, 2\pi)\}.$$

Значение потенциала на свободной поверхности находится по формуле

$$\Psi(t, u) = \operatorname{Re} \Pi(t, u).$$

Функции R и V удовлетворяют следующей системе уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{R}(t, u) &= i(U(t, u)R'(t, u) - U'(t, u)R(t, u)), \\ \dot{V}(t, u) &= i(U(t, u)V'(t, u) - B'(t, u)R(t, u)) + g(R(t, u) - 1), \\ 0 < u < 2\pi, 0 < t < T, \\ R(t, 0) &= R(t, 2\pi), V(t, 0) = V(t, 2\pi), 0 < t < T, \\ R(0, u) &= R_0(u), V(0, u) = V_0(u), 0 < u < 2\pi. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь функции U и B вычисляются по формулам:

$$U = P(\overline{VR} + \overline{VR}), \quad B = P(\overline{V\overline{V}}), \quad P = \frac{1}{2}(I + iH).$$

Функция $F(t, u)$ в правой части представляет собой плотность внешней силы, действующей на свободную поверхность.

Математическая корректность рассмотренных уравнений была установлена в цикле работ [8 – 13]. В этих работах были установлены существование и единственность решений уравнений (1), предложены эффективные численные методы и доказана сходимость численных методов.

Вычислительные эксперименты

Была получена статистика возникновения аномально больших поверхностных волн вычислительных экспериментов. Постановка этих вычислительных экспериментов соответствовала экспериментам из работы [22]. В этих экспериментах рассматривались динамика поверхностных волн, распространяющихся в одну сторону, что соответствует морской зыби.

В качестве динамической модели использовали уравнения (1). Начальные условия для задачи (1) определялись как ансамбль бегущих в одну сторону волн со средним значением волнового числа $K_0 = 25$. Предполагалось, что начальное возмущение поверхности задается суммой гармоник со случайными фазами

$$\eta_0(x) = \sum_{-\frac{1}{2}K_{\max}}^{\frac{1}{2}K_{\max}} \varphi(k - k_0) \cos(kx - \xi_k),$$

где K_{\max} – полное число спектральных мод; ξ_k – случайная величина, равномерно распределенная на интервале $-\frac{1}{2}K_{\max} < k < \frac{1}{2}K_{\max}$. Начальные значения поля скоростей предполагались связанными с формулами линейной теории. Функция $\varphi(k)$ определялась по формуле

$$\varphi(k) = \begin{cases} \delta_k, & |k| > K_w; \\ \kappa \exp(-\alpha k^2) + \delta_k, & |k| \leq K_w. \end{cases}$$

Здесь δ_k – независимые случайные параметры, равномерно распределенные на интервале $-\frac{1}{2}K_{\max} < k < \frac{1}{2}K_{\max}$. Число $1 \leq K_w \leq 10$ определяло спектральную ширину, κ , α – «внутренние» параметры спектра, определенные так, чтобы «внешние» параметры – квадрат средней

крутизны $\mu^2 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \eta_x^2 dx$ и дисперсия $D = \frac{\int_{-K_w}^{K_w} k^2 e^{-\alpha k^2} dk}{\int_{-K_w}^{K_w} e^{-\alpha k^2} dk}$ принимали заданные значения.

Вклад в полную энергию случайного шума составлял не более трех процентов.

Регистрация волн-убийц производилась с помощью амплитудного критерия

$$v(t) = \frac{H_{\max}(t)}{H_s(t)} > 2,1,$$

где H_{\max} – амплитуда самой высокой волны; H_s – существенная высота волн, т.е. средняя амплитуда одной трети самых высоких волн.

Обнаружение волн-убийц в заданной точке расчетной области

Были проведены масштабные вычислительные эксперименты для различных параметров, на основе которых формировалось начальное волнение. В наших экспериментах исследовалась статистика возникновения аномально больших волн. Использование диссипации и накачки в настоящих вычислительных экспериментах позволяет проводить достаточно длительные расчеты, причем в случае возникновения волны-убийцы эксперимент не прекращался. Таким образом, в ходе одного вычислительного эксперимента аномально большие волны могли возникать неоднократно.

Как отмечалось в работах [2, 22], возникновение экстремальных поверхностных волн может быть приближенно описано с помощью распределения Пуассона. Единственным параметром распределения Пуассона является интенсивность, которую, согласно закону Литтла, можно быть вычислить по формуле $\lambda = \frac{N}{T}$, где N – количество волн-убийц, зарегистрированных в течение времени T .

В табл. 1 приведены графики интенсивности возникновения волн-убийц для различных значений расчетной области d .

Таблица 1

Интенсивность возникновения и время ожидания волн-убийц
в зависимости от размера расчетной области

d , м	$\lambda(d')$, с · м ⁻¹	T , ч
6250	$3,75 \times 10^{-5}$	7,4
12500	$7,5 \times 10^{-5}$	3,7
25000	$1,5 \times 10^{-4}$	1,85

Мы видим, что при двукратном увеличении расчетной области интенсивность примерно удваивается. Это указывает на то, что методика наших экспериментов может быть использована для получения оценки вероятности возникновения волн-убийц в периодическом бассейне заданной длины.

Для примера рассмотрим волны зыби с длиной 250 м и периодом 12 с. С помощью наших экспериментов получено среднее время жизни экстремальных волн τ . Это значение не зависит от размера области и равно $\tau = 108$ с, т.е. в среднем в течение времени жизни волна-убийца проходит расстояние $d' = 2250$ м, и в этом случае $\lambda(d') = 1,3 \times 10^{-5}$ с · м⁻¹. Таким образом, в заданной точке волна-убийца будет регистрироваться в среднем один раз в течение 20,5 ч. Этот результат примерно совпадает с данными натурных экспериментов, приведенными в [2].

Заключение

В статье представлен подход к исследованию экстремальных поверхностных волн (так называемых волн-убийц), на основе вычислительных экспериментов. Были созданы и апробированы новые методики вычислительных экспериментов по моделированию плоского поверхностного волнения на основе полных нелинейных уравнений, которые позволяют прово-

дить расчеты на потенциально неограниченном временном интервале и для достаточно широкой пространственной области, что необходимо для исследования аномально больших поверхностных волн в океане. Полученные результаты могут быть применены для оценки времени ожидания волны-убийцы в заданной точке.

Библиографический список

1. **Куркин А.А., Пелиновский Е.Н.** Волны-убийцы: факты, теория и моделирование / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: НГТУ, 2004. – 120 с.
2. **Зайцев А.И., Малашенко А.Е., Пелиновский Е.Н.** Аномально большие волны вблизи южного побережья о. Сахалин / А.И. Зайцев, А.Е. Малашенко, Е.Н. Пелиновский // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2011. Т. 4. №4. С. 35–42.
3. **Дубинина В.А., Куркин А.А., Полухина О.Е.** Фокусировка краевых волн на шельфе моря / В.А. Дубинина, А.А. Куркин, О.Е. Полухина // *Изв.РАН. Физика атмосферы и океана*. 2003. Т. 39. № 6. С. 839–848.
4. **Дубинина В.А., Куркин А.А., Пелиновский Е.Н.** Слабонелинейные периодические краевые волны Стокса / В.А. Дубинина [и др.] // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2004. Т. 49. № 4. С. 525–530.
5. **Куркин, А.А.** Динамика нестационарных краевых волн стокса // *Океанология*. 2005. Т. 45. № 3. С. 325–331.
6. **Дубинина В.А., Куркин А.А., Полухина О.Е.** Нелинейная динамика краевых волн над линейно наклонным дном / В.А. Дубинина, А.А. Куркин, О.Е. Полухина // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41. № 2. С. 124.
7. **Куркин А.А., Пелиновский Е.Н., Полухина О.Е.** Вариации амплитуды краевых волн при медленном вдольбереговом изменении параметров шельфа / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, О.Е. Полухина // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2006. Т. 42. № 3. С. 384–392.
8. **Шамин, Р.В.** Описание динамики волн на воде на основе дифференциальных включений // *Доклады Академии наук*. 2011. Т. 438. № 4. С. 453–455.
9. **Шамин, Р.В.** Об одном численном методе в задаче о движении идеальной жидкости со свободной поверхностью // *Сибирский журнал вычислительной математики*. 2006. Т. 9. № 4. С. 379–389.
10. **Шамин, Р.В.** К вопросу об оценке времени существования решений системы Коши-Ковалевской с примерами в гидродинамике со свободной поверхностью // *Современная математика. Фундаментальные направления*. 2007. Т. 21. С. 133–148.
11. **Шамин, Р.В.** Вычислительные эксперименты в моделировании поверхностных волн в океане / Р.В. Шамин. – М.: Наука, 2008. – 133 с.
12. **Шамин Р.В.** Динамика идеальной жидкости со свободной поверхностью в конформных переменных // *Современная математика. Фундаментальные направления*. 2008. Т. 28. С. 3–14.
13. **Шамин, Р.В.** Поверхностные волны на воде минимальной гладкости // *Современная математика. Фундаментальные направления*. 2010. Т. 35. С. 126–140.
14. **Чаликов, Д.В.** Статистика экстремальных ветровых волн // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2009. Т. 5. Вып. 3. С. 4 – 24.
15. **Куркин А.А., Полухина О.Е.** Нелинейная фокусировка аномальных волн Россби в океане: численные эксперименты / А.А. Куркин, О.Е. Полухина // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 2005. Т. 41. № 1. С. 105–113.
16. **Whitney, J.C.** The numerical solution of unsteady free-surface flows by conformal mapping // In: *Proc. Second Inter. Conf. on Numer. Fluid Dynamics* (ed. M. Holt), 1971. Springer-Verlag. P. 458 – 462.
17. **Овсянников Л.В.** К обоснованию теории мелкой воды // *Динамика сплошной среды: сб. науч. тр. / Акад. наук СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики. – Новосибирск, 1973. Вып.15. С. 104–125.*
18. **Дьяченко, А.И.** О динамике идеальной жидкости со свободной поверхностью // *ДАН*. 2001. Т. 376. № 1. С. 27–29.
19. **Chalikov D., Sheinin D.** Modeling of Extreme Waves Based on Equations of Potential Flow with a Free Surface / D. Chalikov, D. Sheinin // *Journ. Comp. Phys*. 2005. V. 210. P. 247–273.

20. **Ruban, V.P.** Water waves over a time-dependent bottom: Exact description for 2D potential flows // Phys. Lett. A. 2005. V. 340. №. 1–4. P. 194–200.
21. **Zakharov V.E., Dyachenko A.I., Vasilyev O.A.** New method for numerical simulation of a nonstationary potential flow of incompressible fluid with a free surface / V.E. Zakharov, A.I. Dyachenko, O.A. Vasilyev // Eur. J. Mech. B Fluids. 2002. V. 21. P. 283–291.
22. **Захаров В.Е., Шамин Р.В.** О вероятности возникновения волн-убийц / В.Е. Захаров, Р.В. Шамин // Письма в ЖЭТФ. 2010. Т. 91. Вып. 2. С. 68–71.

*Дата поступления
в редакцию 05.05.2014*

R.V. Shamin, A.V. Yudin, K.I. Kuznetsov

THE FREQUENCY OF DETECTION OF ANOMALOUSLY LARGE SURFACE WAVES ON THE BASIS COMPUTATIONAL EXPERIMENTS AT A GIVEN POINT OF THE REGION

Sakhalin state university, Yuzhno-Sakhalinsk,
Peoples' friendship university of Russia, Moscow

Purpose: In this paper the abnormally large surface waves are discussed.

Method: The study is based computational simulation experiments flat surface waves on the basis of the full nonlinear equations.

Results: New methods of computational experiments that allow you to perform calculations on a potentially unlimited time interval and for a sufficiently wide spatial area, that is necessary for the study anomalously large surface waves in the ocean, are created and tested. Statistics of the freak-waves, depending on the parameters of the initial excitement, is studied.

Application domain: These results can be used for estimate waiting time freak-waves at a predetermined point.

Key words: freak-wave, numerical experiment, hydrodynamics of an ideal fluid.

УДК 551.465

Р.Х. Мазова¹, Х.Ф. Рамирес², Н.А. Баранова¹, А.Г. Рассадин¹

КАТАСТРОФИЧЕСКИЕ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ И ЦУНАМИ В ЧИЛИ. СВИДЕТЕЛЬСТВА ОПРАВДАВШЕГОСЯ ПРОГНОЗА

¹Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,²Инженерный центр по чрезвычайным природным ситуациям, Антофагаста, Чили²

Цель работы: В работе анализируются катастрофические сейсмические события у побережья Чили 27 февраля 2010 г. магнитудой 8,8 в 150 км на северо-запад от Консепсьона и 1 апреля 2014 г. к северу от г. Икике с магнитудой 8,2 и генерированные ими цунами. Отмечается, что произошедшее 1 апреля 2014 г. событие было спрогнозировано в работе [1], где анализировались все сильнейшие чилийские цунамигенные землетрясения с источниками у побережья Чили. Анализ катастрофических землетрясений и цунами в данном регионе, локализации очага исторических землетрясений и характера генерированных ими волн цунами позволили авторам сделать вывод о возможности повторения катастрофического землетрясения и цунами через 10-20 лет, т.е. события около г. Арики в апреле 2014 г. хорошо укладываются в этот временной интервал. Таким образом, в данной работе подтверждается предварительный прогноз, сделанный авторами в 1999 г.

Научный вклад: Подтверждение предварительного прогноза появления катастрофического землетрясения и сильного цунами в районе г. Арика, Чили до 2019 г.

Результат: Используя результаты работы, полученные и опубликованные в 1999 г., и анализируя события 27 февраля 2010 г. и 1 апреля 2014 г. и более детально последних месяцев по землетрясениям и цунами около чилийского побережья, сделан вывод о реализации предварительного прогноза о появлении катастрофического цунамигенного землетрясения у берегов Чили, в центральной части в районе г. Арика в первые 10-20 лет 21 столетия.

Новизна: На основании данных последних катастрофических землетрясений, происшедших в XXI в., проведено численное моделирование этих событий. Подтвержден реализованный предварительный прогноз катастрофического цунами 1 апреля 2014 г.

Ключевые слова: цунами, сейсмическая и цунами опасность, цунамигенные землетрясения, волны цунами, численное моделирование, Чилийское побережье.

Введение

Как было предсказано ранее рядом авторов (например [2]), сейсмическая активность по периметру Тихого океана будет существенно возрастать к концу XX и в начале XXI столетий. Так, произошла целая серия катастрофических землетрясений, сопровождавшихся цунами: в Индийском океане около острова Суматра 26 декабря 2004 г. с магнитудой 9,1; землетрясение и цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатском регионе, катастрофическое землетрясение с магнитудой 8,8, произошедшее в средней части Чили 27 февраля 2010 г.; цунамигенное катастрофическое землетрясение около Японии 11 марта 2011 г. с магнитудой 9,2; мега-землетрясение и цунами в северной части Чили 1 апреля 2014 г. с магнитудой 8,2. Характер генерированных волн цунами для каждого из этих событий, их распространение и поведение в береговой зоне, в литературе достаточно подробно проанализированы [3-10]. Однако геодинамические причины возникновения подобных землетрясений и влияние их на формирование очага цунами исследованы недостаточно полно. Необходимость рассматривать очаг землетрясения более сложной формы, адекватной реализации афтершоков при землетрясении, была показана в наших предыдущих работах [11, 12].

Хорошо известно, что в зонах субдукции сильнейшие землетрясения с $M \geq 7$, как правило, генерируют цунами. События последних лет показали, что разрушения и гибель населения происходят, главным образом, не за счет колебаний поверхности во время самого землетрясения, а в результате следующего за ним цунами [13]. Цунами представляет опасность не только для близлежащего побережья, но и для побережий, расположенных на значительном удалении от области их генерации.

Большинство источников цунамигенных землетрясений в тихоокеанском сейсмическом поясе расположены на террасах континентального склона глубоководных желобов [14], и их свойства существенно определяются типом зоны субдукции. Согласно современным представлениям геотектоники [14, 15], существуют два типа зон субдукции: чилийский тип и марианский тип. Чилийский тип характеризуется глубоководным желобом и сильной связью между континентальной и океанической литосферной плитами в процессе субдукции, и сейсмическая активность в зонах субдукции чилийского типа приводит к сильным цунами. Примерами зон субдукции чилийского типа являются области Курило-Камчатского и Японского глубоководных желобов.

Сейсмическая активность в Чилийской зоне субдукции приводит к появлению сильных цунами, которые не раз накатывались на побережье Чили и приносили большие разрушения и человеческие жертвы [16,17]. Так, исторические записи свидетельствуют, что у побережья Чили произошел ряд катастрофических цунамигенных землетрясений [3,4]. Чили расположено в одном из наиболее сейсмически активных районах мира, с 15-30 слабыми толчками ежедневно в северном Чили. Этот высокий уровень сейсмической активности обусловлен геологической структурой северного Чили, где глубоководный желоб (до 3000 м глубиной) расположен вблизи берега. Однако есть также очень плавный континентальный склон, простирающийся на 150 км от берега до желоба, формируя террасу.

Хорошо известно, что цунамигенные землетрясения, которые происходят около северного побережья Чили, создают опасность для местных берегов и берегов на тысячи километров вне этого побережья. Цунами, возникшие при чилийском землетрясении 1868 г. достигли берегов Новой Зеландии. Аналогично, цунами, вызванное чилийским землетрясением 1960 г., дошло до берегов Камчатского полуострова, Курильских островов и Японии. Исторические записи свидетельствуют, что в XIX в. у северного побережья Чили произошел ряд катастрофических цунамигенных землетрясений [16, 17]. Одно из них 13 августа 1868 г. с предельной магнитудой $M = 8,5$ в районе южного Перу с очагом землетрясения, вытянутым к северному побережью Чили, близ города Арика, вызвавшее большое цунами, впоследствии именовавшееся Арикским. Эпицентр землетрясения находился менее чем в 100 км от берега, на террасе глубоководного желоба и почти во всех береговых пунктах, где было зарегистрировано цунами, оно начиналось с отхода воды от берега, за которым следовал волновой цуг, в котором вторая волна была наиболее разрушительной [1, 18]. Предположительно подвижки были направлены вниз и сопровождались горизонтальными подвижками блоков-клавишей. Подвижки вниз в области сейсмического источника были обращены к побережью Чили. Волны цунами, генерированные этим землетрясением, достигали максимальной высоты заплеска на берегу до 21 м. очевидцы, оставшиеся в живых, так описывали это цунами: «Со стороны океана с громоподобным шумом нахлынула огромная стена фосфоресцирующей и пенящейся воды» или «Океан нахлынул на берег в виде страшной волны, ...несшей на своем гребне суда». Также с очагом у северного побережья Чили 10 мая 1877 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой $M = 8,8$, которое сопровождалось катастрофическим цунами. В литературе это цунами носит название как цунами Икике. В самом городе Икике высоты волн на берегу достигали 4,8 м, а в различных пунктах побережья Южной Америки волны цунами накатывались на берег с высотой 24 м. Были смыты и разрушены целые кварталы городов. Только в г. Икике погибло 30 человек.

В XX столетии на побережье Чили также произошли три катастрофических землетрясения, сопровождавшихся цунами, из которых два были локализованы на севере Чили. Так, 16 августа 1906 г. в северной части чилийского побережья произошло землетрясение с магнитудой 7,8. Наибольшие разрушения были в г. Вальпараисо. Максимальные высоты волн цунами по побережью достигали 3,5 м. Накат на берег происходил спокойно, в виде подтопления берега. 22 мая 1960 г. произошло разрушительное мега-землетрясение с очагом в южной части среднего Чили с магнитудой $M = 9,5$. Максимальный подъем воды на побережье Чили достигал 25 м. В июле 1995 г. на севере Чили, около г. Антофагаста, произошло разрушительное цунамигенное землетрясение с магнитудой $M = 8,1$.

В XXI в. сильнейшие землетрясения произошли в средней и северной части побережья Чили уже в начале столетия (табл. 1). Так, 27 февраля 2010 г. у берегов Чили произошло катастрофическое землетрясение с магнитудой 8,8, генерировавшее мощное цунами [18, 19]. Очаг землетрясения ($35,909^\circ$ ю.ш., $72,733^\circ$ з.д.) располагался в море на глубине 35 км под земной корой в 17 км от прибрежных населенных пунктов Куранипе и Кобкекура, в 90 км от столицы Био-Био Консепсьон, в 150 км на северо-запад от Консепсьона и в 63 км к юго-западу от Каукенеса. Чилийское землетрясение вызвало мощное цунами - через двадцать минут после подземного толчка морская волна высотой в два с лишним метра обрушилась на побережье Чили. 1 апреля 2014 г. в северном Чили, произошло землетрясение магнитудой 8,2. Это землетрясение произошло в области исторической сейсмической брешы, называемой северной Чилийской, или Икикской сейсмической брешью. Как показано в работе [1], этому землетрясению с $M = 8,2$ предшествовало землетрясение, которое произошло в этой сейсмической брешии 13 августа 1868 г. с $M = 8,5$, сопровождавшееся катастрофическим цунами в г. Арика.

Таблица 1

Землетрясения и цунами на побережье Чили за 2000-2014 гг.

Дата и время	Координаты эпицентра	Магнитуда	Регион, близлежащие города, высоты волн цунами
1	2	3	4
2014-04-03 02:43:14 UTC	20.518° ю.ш. 70.498° з.д.	7,7	Север Чили. Это землетрясение являлось афтершоком для землетрясения 1 апреля 2014 г. с магнитудой $M=8,2$. Близлежащие города: 1) 49 км на северо-запад от города Икике, 2) 177 км к северу от города Токопильи, 3) 227 км к югу от города Арика, 4) 269 км на северо-запад от города Калама. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Икике – 0,8 м; Альто Хосписио – 0,8 м; Чукумата – 0,8 м; Патинос – 0,7 м; Пунта Негро – 0,6 м; Токопилье – 0,3 м; Арика – 0,2 м
2014-04-01 23:57:57 UTC	19.898° ю.ш. 70.924° з.д.	6,9	Север Чили. Близлежащие города: 1) 89 км от города Икике, 2) 170 км от города Арика. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Икике – 0,6 м; Арика – 0,2 м
2014-04-01 23:46:46 UTC	19.642° ю.ш. 70.817° з.д.	8,2	Север Чили. Близлежащие города: 1) 95 км на северо-запад от города Икике, 2) 139 км от города Арика. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Писагуа - 1,7 м; Юнин - 1,7 м; Икике – 1,6 м; Пунта Негра – 1,6 м; Альто Хосписио – 1,6 м; Кьюкумата – 1,3 м; Арика – 0,7 м
2014-03-16 21:16:30 UTC	19.925° ю.ш. 70.628° з.д.	6,7	Север Чили. Близлежащие города: 1) 60 км от города Икике, 2) 164 км от города Арика, 3) 216 км от города Танка, Перу, 4) 244 км от города Токопильи. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Писагуа - 0,1 м; Юнин - 0,1 м; Икике – 0,1 м; Пунта Негра 0,1 м
2012-04-17 03:50:16 UTC	32.701° ю.ш. 71.484° з.д.	6,7	Центральная часть севера Чили. Близлежащие города: 1) 42 км от города Вальпараисо, 2) 81 км от города Лос Ангес. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Консон – 0,1 м; Лас Рамадитас – 0,1 м; Ла Лагуна – 0,1 м; Ритокюе – 0,1 м; Вальпараисо – 0,1 м

Окончание табл. 1

1	2	3	4
2011-02-11 20:05:30 UTC	36.344° ю.ш. 72.959° з.д.	6,8	Центральная часть Чили. Близлежащие города: 1) 55 км от города Консепсион, Био-Био, 2) 70 км от города Каукьюнес, Мавуле, 3) 80 км от города Чилиан, Био-Био. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Талкахуано – 0,1 м; Эль Потон – 0,1 м; Серо-Верди – 0,1 м; Сан-Висенте – 0,1 м
2010-02-27 06:34:14 UTC	35.909° ю.ш. 72.733° з.д.	8,8	Центральная часть Чили. Близлежащие города: 1) 95 км от города Чили, 2) 105 км от города Консепсион, 3) 115 км от города Талка. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Вальпараисо – 2,61 м; Талькауано – 1,81 м; Кокимбо – 1,64 м; Коррал - 1,44 м; Арика - 1,18 м; Кальдера – 0,9 м; Икике – 0,68 м; Антофагаста и Сан-Педро – 0,47 м
2007-11-14 15:40:50 UTC	22.204° ю.ш. 69.869° з.д.	7,7	Север Чили. Близлежащие города: 1) 35 км от города Токопилья, 2) 100 км от города Калама. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах: Антофагаста – 0,255 м; Арика – 0,195 м; Икике – 19,3 м; Кальдера – 9,5 м

Землетрясение и цунами у берегов Чили 27 февраля 2010 г. Постановка задачи

В данной главе рассматривается наиболее оптимальная модель реализации катастрофического чилийского землетрясения 27 февраля 2010 г. на основании изученных работ [19-21]. Оценка механизма источника землетрясения была проведена в ряде работ (например [21]), где также был сделан анализ дальнеполевых и ближнеполевых воздействий вызванного им цунами. На данный момент имеется несколько моделей очага землетрясения, базируемых на сейсмологических данных. Для численного моделирования цунами мы использовали модель 1 из работы [21].

Область океана, подверженная таким смещениям, генерирующая цунами, имеет примерно эллиптическую форму, в котором разлом занимает главную ось. Основываясь на изложенных предположениях по вертикальным смещениям океанского дна, исходная высота цунами в генерирующей области оценивается максимум в 1,5–1,7 м выше невозмущенного уровня моря.

Основываясь на геологических и макросейсмических наблюдениях, можно заключить, что землетрясение 27 февраля 2010 г. включало множественные вспарывания смежных разломов и различные вертикальные смещения океанского дна. Наибольшая часть вспарывания землетрясения 2010 г. произошла в первые 60 с, но меньшие смещения продолжались до 200 с. В течение первых 134 с после начала вспарывания и в течение 1 мин только непосредственная область вокруг действительного эпицентра оказалась активной. Во вторую минуту зона активности двигалась на север к Сантьяго. После этого область на север от Консепсьона стала активной на короткое время.

Численное моделирование цунами 27 февраля 2010 г.

Для проведения численного моделирования цунами от сейсмического очага, локализованного вдоль чилийского побережья, была использована расчетная область, выбранная в квадрате 90° з.д. - 60° з.д., 10° ю.ш. – 60° ю.ш. с сеткой, включающей в себя число узлов, равное $1798 \times 2995 = 5385010$. Для моделирования использовалась батиметрия Тихого океана с

разрешением 1 мин. Моделирование проводилось с временным шагом 1с. В последней мористой точке на глубине 10 м поставлено условие полного отражения (вертикальная стенка), позволяющее зафиксировать на этой глубине максимальную и минимальную величины смещения волнового уровня. Моделирование проводилось в рамках нелинейных уравнений мелкой воды [12, 13].

Исходя из принятых предположений по реализации землетрясения, было проведен расчет генерации очага цунами сейсмическим источником при учете только вертикальной составляющей смещения дна. Расчет проводился на базе клавишной модели очага землетрясения [14, 15]. На основании модели, предложенной в [21], был сформирован сейсмический очаг (рис. 1). В связи со сложной структурой предполагаемой модели, очаг был разбит на девять блоков–клавиш. В зависимости от данных по интенсивности афтершоков, указанной в работе [21], при численном моделировании данного землетрясения вертикальное движение блоков задавалось в диапазоне от 2 до 6 м (табл. 2).



Рис. 1. Модель сейсмического очага расчетного землетрясения

Таблица 2

Параметры блоков-клавиш, принятые для данного моделирования

Номер блока	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Координаты блока $X_1 (E)$	287	286,75	287	287,6	286,5	286,25	286,8	286	286
$Y_1 (N)$	-34	-34,5	-34,5	-34,5	-25	-35,5	-35,5	-36	-36,5
$X_2 (E)$	287	286,75	287	287,6	286,5	286,25	286,8	286	286
$Y_2 (N)$	-34,5	-35	-35	-35	-35,5	-36	-36,2	-36,5	-36,8
$X_3 (E)$	287,75	287	287,6	287,75	287,35	286,8	287,15	286,8	286,75
$Y_3 (N)$	-34	-34,5	-34,5	-34,5	-35	-35,5	-35,5	-36	-36,5
$X_4 (E)$	287,75	287	287,6	287,75	287,35	286,8	287,15	286,8	286,75
$Y_4 (N)$	-34,5	-35	-35	-35	-35,5	-36	-36,2	-36,5	-36,8
Начало движения T_0, c	160	130	80	100	50	20	0	190	220
Время останковки T, c	190	160	100	130	80	50	20	220	250
Высота подъема $B, м$	2	3	5	3	4	4	6	3	2

При выбранном сценарии очаг цунами формируется за 250 с после начала землетрясения. Наибольшая интенсивность в очаге землетрясения была в первые 60 с, при этом были задействованы блоки 7, 3, 5, ориентированные в сторону побережья, а затем активность сейсмического очага переместилась на север (табл. 2).

Расчетная акватория и формирование очага цунами, согласно представленной табл. 2, для девяти моментов времени приведены на рис. 2.

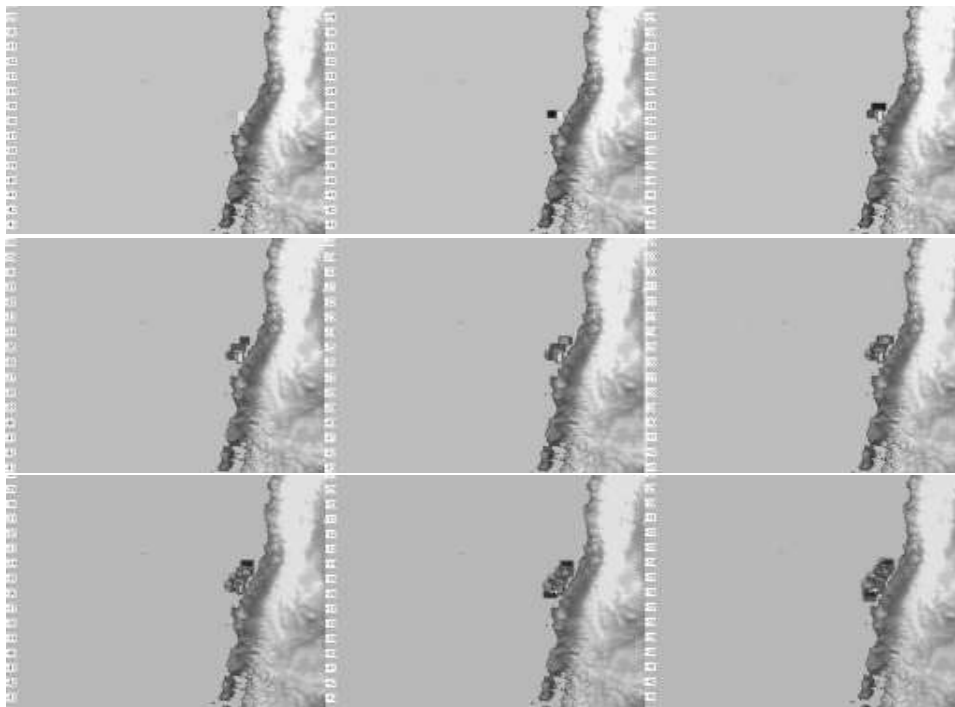


Рис. 2. Генерация очага цунами сейсмическим очагом

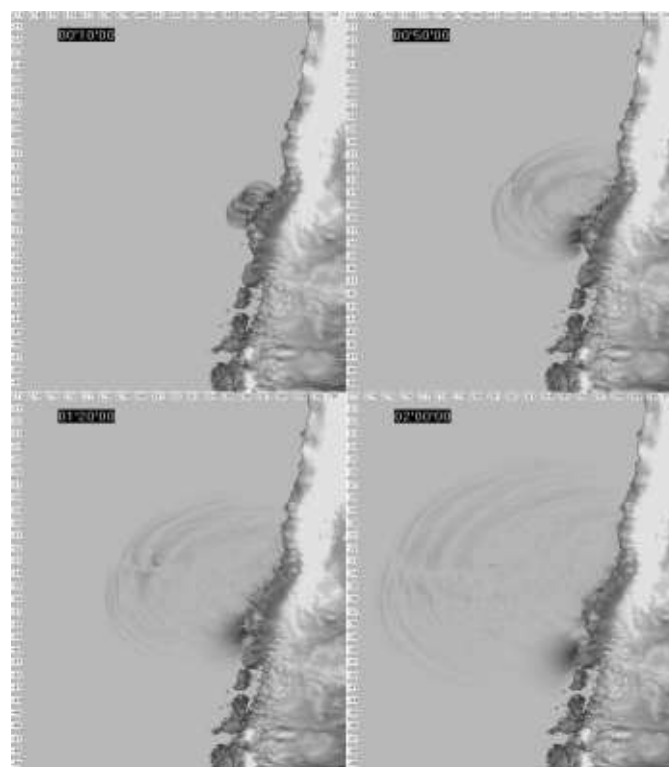


Рис. 3. Генерация волн цунами и их распространение по расчетной акватории при реализации данного сценария

На рис. 3 приведены характерные моменты при распространении волн по акватории для четырех моментов времени. Для данной постановки задачи рассматривается процесс распространения волны только по части акватории Тихого океана – вдоль побережья Чили.

Для данного сценария на рис. 4 приведено максимальное распределение высот волн по части расчетной акватории. Можно видеть, что наибольшие высоты волн локализованы в области очага землетрясения, в то время как вдоль побережья на 10-метровой изобате возможны высоты волн 5-6 м. Проведенное сравнение с данными работ [19-22] показывает, что применение более сложного очага позволяет получить более точные данные по распределению максимальных высот волн по ближайшему побережью. Анализ полученных результатов показывает, что в центральной части акватории были зафиксированы наибольшие высоты волн.

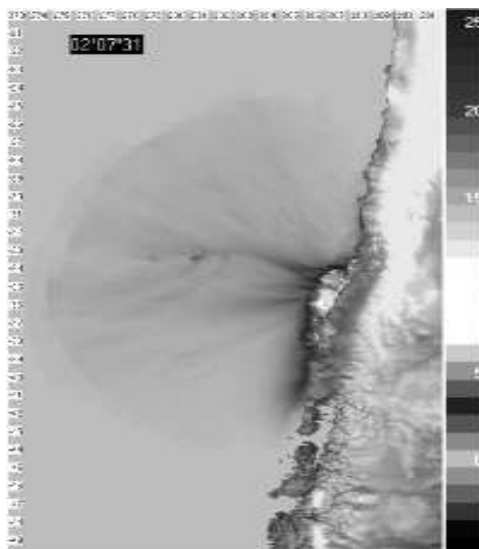


Рис. 4. Распределение максимальных высот волн для части данной акватории по результатам численного моделирования

Землетрясение и цунами 1 апреля 2014 г.

1 апреля 2014 г. в северной части Чили произошло катастрофическое землетрясение в районе г. Икике с магнитудой 8,2. Эпицентр землетрясений находился в районе 20.518° ю.ш. и 70.498° з.д. Волны цунами были зарегистрированы на побережье Чили в городах:

Писагуа – 1,7 м; Юнин - 1,7 м; Икике – 1,6 м; Пунта Негра – 1,6 м; Альто Хосписио – 1,6 м; Кьюкумата – 1,3 м; Арика – 0,7 м.

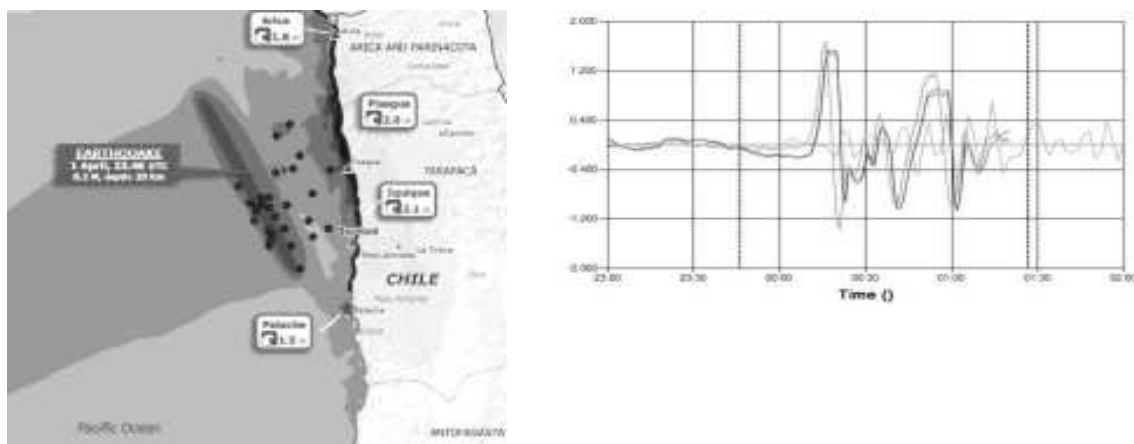


Рис. 5. Локализация очага землетрясения и расположение автershоков в ближайшие два дня после основного толчка и данные с мареографа в п. Патачи (интернет ресурс ECDM_20140402_Chile_Earthquake)

На рис. 5 приведены локализация очага землетрясения и расположение афтершоков в ближайшие два дня после основного толчка и данные с мареографа в п. Патачи.

На рис. 6 приведены формы сейсмического очага при моделировании данного землетрясения по двум сценариям, подобранным согласно направлению сейсмической активности. Для проведения численного моделирования цунами от сейсмического очага, локализованного вдоль чилийского побережья, была использована та же расчетная область, что и при моделировании землетрясения 27 февраля 2010 г.

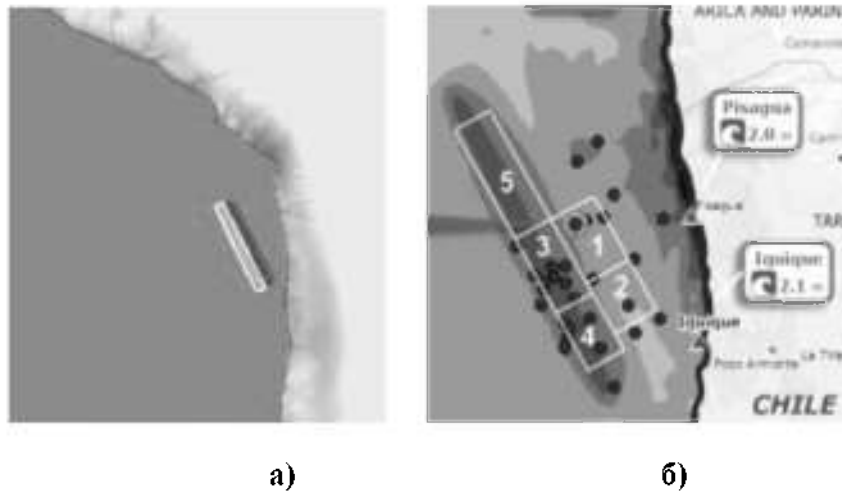


Рис. 6. Форма очага землетрясения 1 апреля 2014 г. для двух сценариев расчета

Первый сценарий выбран в виде узкого длинного дипольного очага, понижением обращенного к берегу. На рис. 7 показаны четыре момента положения фронтов волн при генерации данным очагом (рис. 6, а), а на рис. 8 – мареограмма в п. Патачи, полученная при расчете по первому сценарию.

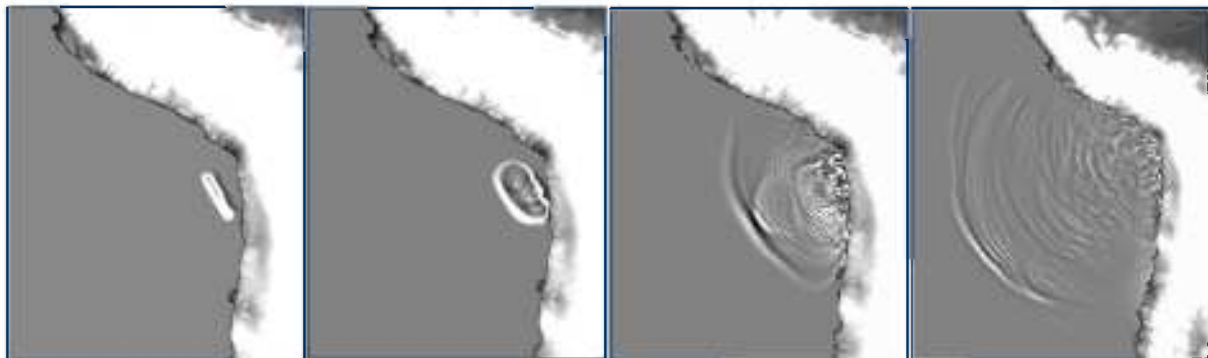


Рис. 7. Генерация очага цунами сейсмическим очагом при расчете по первому сценарию

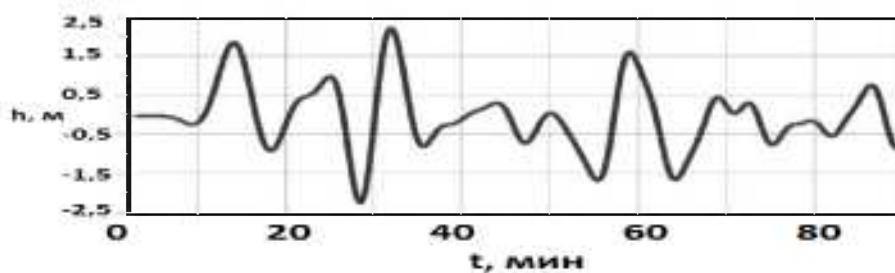


Рис. 8. Мареограмма при расчете по первому сценарию

Хорошо видно, что, хотя первая волна отрицательная, а высота второй совпадает с высотой на реальной мареограмме, но дальнейший вид кривой отличается существенно. Для более детального описания процесса необходимо подобрать форму очага, отвечающую направлению сейсмической интенсивности процесса (см. рис. 6, б).

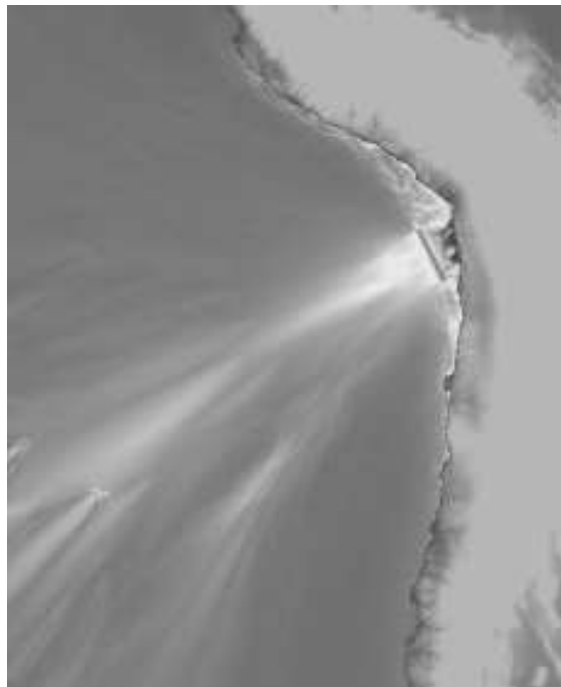


Рис. 9. Распределение максимальных высот волн для части данной акватории по результатам численного моделирования по первому сценарию

Заключение

Проведенное на основе численного моделирования исследование генерации и распространения волн цунами при сильнейших землетрясениях около побережья Чили 27 февраля 2010 г. и предварительный расчет для землетрясения 1 апреля 2014 г. позволяют оценить максимальные высоты наката на всем побережье расчетной акватории, возникшие в результате этих сильнейших землетрясений. Цунами нанесло реальный ущерб на многих участках тихоокеанского побережья Чили - центральной части для землетрясения 2010 г. и северной части при землетрясении 2014 г. Предварительные результаты, полученные в этой работе, позволили получить дополнительные данные по влиянию размеров, направления и интенсивности сейсмических очагов землетрясения в Чили 27 февраля 2010 г. и 01 апреля 2014 г. на параметры вызванного им разрушительного цунами в Тихом океане. Для численного моделирования были использована клавишная модель очагов землетрясения, разработанная на основе дополнительных данных по мониторингу в реальном времени пиков излучения сейсмической энергии [13]. Проведенное численное моделирование очага с разбиением на блоки-клавиши позволило изучить особенности формирования волнового поля как в ближнеполевой, так и в дальнеполевой областях. Сопоставление высот волн цунами, полученных на побережье в результате расчета, и высот, зафиксированных при цунами у берегов Чили в 2010 г., показало реальность полученных данных. Следует особо отметить тот факт, что предварительный прогноз, приведенный в работе [1], оправдался с точностью до отсутствия значительного материального ущерба на побережье и сохранения человеческих жизней, в отличие от землетрясения 1868 г., сравнение с которым и ожидалось в первом-втором десятилетии этой эры.

Библиографический список

1. **Mazova R.Kh, Ramirez J.F.** Tsunami waves with an initial negative wave on the Chilean coast R.Kh. Mazova, J.F. Ramirez // *Natural Hazards*. 1999. № 20. P. 83–92.
2. **Mazova R.Kh. Soloviev S.L.** On influence of sign of leading tsunami wave on runup height on the coast / R.Kh. Mazova, S.L. Soloviev // *Sci.Tsunami Hazards*. 1994. № 12. P. 25–31.
3. **Ammon C.J., C.Ji, H.-K. Thio.** Rupture Process of the Great Sumatra-Andaman Earthquake / C.J. Ammon [et al.] // *Science*. 2005. № 308. P. 1133–1139.
4. **Lay T., Kanamori H., Ammon C.J.** The Great Sumatra-Andaman Earthquake of 26 December 2004 / T. Lay [et al.] // *Science*. 2005. № 30. P. 1127–1133.
5. **Tsuji, T.** Potential tsunamigenic faults of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake / T. Tsuji [et al.] // *Earth Planets Space Lett*. 2011. № 63. P. 831–834.
6. **Nakata, T.** Active faults along Japan Trench and source faults of large earthquakes / T. Nakata [et al.] // in *Proc.of Int. Symp.on eng.lessons learned from the Great East Japan earthquake (March 1-4, 2012)*. – Tokyo, Japan. 2012. P. 67.
7. **Зайцев А.И., Куркин А.А., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Ялчинер А., Троицкая Ю.И., Ермаков С.А.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2005. № 402. С. 388–392.
8. **Зайцев А.И., Ковалев Д.П., Куркин А.А., Левин Б.В., Пелиновский Е.Н., Чернов А.Г., Ялчинер А.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2008. № 421. С. 249–252.
9. **Kurkin A.A., Pelinovsky E.N., Choi B.H., Lee J.S.** A comparative estimation of the tsunami hazard for the Russian coast of the sea of Japan based on numerical simulation / A.A. Kurkin [et al.] // *Oceanology*. 2004. № 44. P. 163–172.
10. **Fujii, Y.** Tsunami source of the 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake // *Earth Planets Space Lett*. 2011. № 63. P. 815–820.
11. **Mazova R., Kisel'man B., N Varanova and L Lobkovsky.** The Indian Ocean tsunami 26 December 2004: analysis of seismic source mechanism / R. Mazova [et al.] // *Sci.Tsunami Haz*. 2012. № 31. P. 112–128.
12. **Лобковский Л. И., Мазова Р. Х., Кисельман Б. А., Морозова А. О.** Численное моделирование и спектральный анализ цунами 15 ноября 2006 г. в Курило-Камчатском регионе / Л. И. Лобковский [и др.] // *Океанология*. 2010. № 50. С. 1–10.
13. **Mazova R.Kh., Varanov B.V., Lobkovsky L.I., Varanova N.A., Dozorova K.A., Chaykina O.N.** Numerical Model Study of Possible Earthquake –Generated Tsunami in Komandorsky Seismic Gap, Western Aleutian Island Arc / R. Kh. Mazova [et al.] // *Sci.Tsunami Haz*. 2014. № 32. P. 131–155.
14. **Лобковский, Л.И.** Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит / Л.И. Лобковский. – М.: Наука, 1988. – 253 с.
15. **Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е.** Текущие проблемы геотектоники и геодинамики / Л.И. Лобковский, А.М. Никишин, В.Е. Хаин. – М.: Научный Мир, 2004. – 611 с.
16. **Мурти, Т.С.** Сейсмические морские волны цунами / Т.С. Мурти. – Л.: Гидрометеиздат, 1981. – 342 с.
17. **Пелиновский Е.Н., Соловьев С.Л., Мазова Р.Х.** Статистические данные о характере наката волн цунами / Е.Н. Пелиновский, С.Л. Соловьев, Р.Х. Мазова // *Океанология*. 1983. № 23. С. 932–937.
18. **Голубцова Т.С., Мазова Р.Х.** Накат волны переменной формы / Т.С. Голубцова, Р.Х. Мазова // *Колебания и волны в механике сплошной среды*. – Горький: ГПИ, 1989. С. 52–63.
19. **Pararas-Carayannis, G.** The earthquake and tsunami of 27 February 2919 in Chile - Evaluation of source mechanism and of near- and far-field tsunami effects // *Sci.Tsunami Hazards*. 2010. № 29. P 96–126.

20. **Pritchard M. E., Simons M., Rosen P. A., S. Hensley and F. H. Webb.** Co-seismic slip from the 1995 July 30 Mw =8.1 Antofagasta, Chile, earthquake as constrained by InSAR and GPS observations / M. E. Pritchard [et al.] // *Geophys. J. Int.* 2002. № 150. P. 362–376.
21. **Hamlington, B.D., R.R. Leben, O.A. Godin, J.F. Legeais, E. Gica, and V.V. Titov.** Detection of the 2010 Chilean tsunami using satellite altimetry / B.D. Hamlington [et al.] // *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, doi: 10.5194/nhess-11-2391-2011. 2011. P. 2391–2406.
22. **Paula Dunbar, Kelly Stroker, Heather McCullough.** Do the 2010 Haiti and Chile earthquakes and tsunamis indicate increasing trends? / P. Dunbar, K. Stroker, H. McCullough // *Geomatics, Natural Hazards and Risk* 1. 2010. P. 95–114.

*Дата поступления
в редакцию 10.05.2014*

R.Kh. Mazova¹, J. R. Fernandez², N.A. Baranova¹, A.G. Rassadin¹

CATASTROPHIC EARTHQAKES AND TSUNAMI IN CHILE. EVIDENCE FOR REALIZED PROGNOSIS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Engineering Center for Natural Disaster Mitigation CIMCN²

Purpose: Catastrophic seismic events near Chilean coast and generated by them tsunami are analyzed: 27 February 2010 with magnitude 8.8 in 150 km towards north-east of Concepcion and 1 April 2014 to north of Iquique with magnitude 8.2. It is noted that event occurred 1 April 2014 was predicted in work [1], where there were analyzed all strongest Chilean tsunamigenic earthquakes with sources near the Chilean coast. Analysis of catastrophic earthquakes and tsunamis in given region, localization of source of historical earthquakes and character of generated by them tsunami waves permit authors to make conclusion about possibility of repeated catastrophic earthquake and tsunami in near 10-20 years. The events near Arica in April 2014 are in this time period. Thus, the evidences, presented in given work, support preliminary prognosis made by authors in 1999.

Approach: Confirmation of preliminary prognosis of appearance of catastrophic earthquake and strong tsunami in the region of Arica, Chile to 2019.

Findings: Using results of work obtained and published in 1999 and analyzing events in 27 February 2010 and 1 April 2014, and in more details of last months on earthquakes and tsunamis near the Chilean coast, it was made conclusion about realization of preliminary prognosis about appearance of catastrophic tsunamigenic earthquake near the central part of the Chilean coast, in region of Arica in first 10-20 years of 21 century.

Originality: On the basis of data for last catastrophic earthquake, occurred in 21 century, it was performed a numerical simulation of these events. The confirmation for realized preliminary prognosis of catastrophic tsunami 1 April 2014.

Key words: tsunami, seismic and tsunami dangers, tsunamigenic earthquakes, tsunami waves, numerical simulation, Chilean coast.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 62.50

Р.Н. Жучков

СТАБИЛИЗАЦИЯ СЕТЕВЫХ ОБЪЕКТОВ НА ОСНОВЕ МАРКОВСКИХ МОДЕЛЕЙ ПОТЕРИ ПАКЕТОВ И ПРИНЦИПОВ ПРОГНОЗИРУЮЩЕГО УПРАВЛЕНИЯ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева

Проводится сравнение двух методов построения стабилизирующего управления в сетевых объектах, где канал обмена данными вносит возмущения в контур управления. В качестве возмущений рассматриваются потери пакетов данных при пересылке от объекта управления регулятору и обратно. Проведено сравнение двух подходов: первый основан на идее представления процесса потери пакетов данных как стационарной Марковской цепи с известной матрицей вероятности переходов; второй использует идеи прогнозирующего управления.

Ключевые слова: сетевые системы управления, потери пакетов данных, стабилизирующее управление, линейные матричные неравенства, прогнозирующее управление, стационарные цепи Маркова.

Многие системы в современном обществе можно описать как сети с огромным количеством взаимодействующих элементов. Примеры, идущие из промышленности, включают транспортные, электрические, водопроводные сети, Интернет.

Основными выигрышными особенностями сетевых систем управления являются: низкая стоимость, гибкость, робастность. В силу этих причин можно ожидать, что влияние сетевого подхода в теории управления в ближайшие годы будет увеличиваться.

Основной особенностью систем сетевого управления является то, что исходная система управления, состоящая из сенсоров, регуляторов, объекта управления, дополняется новым объектом - сетью, который описывает соединения и взаимодействия традиционных объектов. Сеть становится важным фактором, так как передача данных может происходить не мгновенно, а сопровождаться запаздыванием или потерями пакетов данных, кроме того, сеть обладает ограниченной пропускной способностью.

Теория сетевого управления находится на пересечении теории управления и теории связи [1]: теория управления изучает динамические системы, соединенные идеальными каналами связи; в то время как теория связи изучает каналы данных. Для моделирования сетевых систем управления необходимо комбинировать методы из обеих областей. В данной работе рассмотрены методы синтеза стабилизирующего управления в условиях потерь пакетов данных в канале обмена данными.

Модель потери пакетов данных

Прежде чем решать задачу нахождения стабилизирующего управления для сетевых систем, необходимо определить модель обмена данными и потери данных в такой системе.

Говоря о сетевых системах с потерями пакетов данных, при определении канала обмена данными часто используются цепи Маркова с двумя структурными состояниями: пакет успешно передан; пакет потерян. Комбинацию модели состояния системы и такого типа канала обмена данными можно рассматривать как дискретную Марковскую систему [2].

Таким образом, предлагаемая система состоит из следующих компонентов:

- объект управления и регулятор, описываемые линейной дискретной системой уравнений;
- канал обмена данными с известной вероятностью потери пакета данных. Процесс потери пакетов данных рассматривается как стационарная Марковская цепь;
- в качестве сетевого протокола предполагается использование UDP как более быстрого, но менее надежного.

Схематично процесс переключений может быть представлен следующим образом:

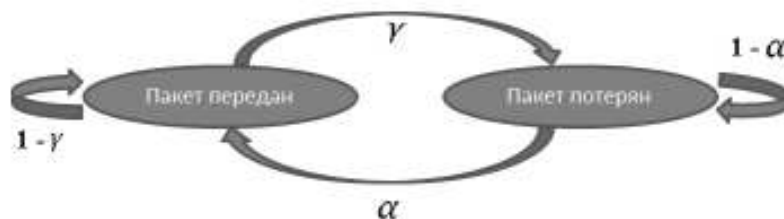


Рис. 1. Схема переключения сетевой системы управления:

γ - вероятность потери пакета данных; α - вероятность того, что система вернется к функционированию в штатном режиме

Считается, что для выбранного сетевого канала известна вероятность потери пакетов данных, и она не зависит от времени. Таким образом, для моделирования потерь пакетов данных используется стационарная Марковская цепь.

Синтез стабилизирующего управления для сетевых систем с переключениями

Рассмотрим линейную дискретную систему, описываемую разностными уравнениями:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k, \\ y_k &= Cx_k, \end{aligned} \quad (1)$$

где x_k - n -мерный вектор состояния; u_k - m -мерный вектор управления; y_k - l -мерный вектор измерений; k - дискретное время; $A \in R^{n \times n}$, $B \in R^{n \times m}$, $C \in R^{l \times n}$ - матрицы перехода вектора состояния, управления и измерений соответственно. Закон управления формируется в виде обратной связи по оценке вектора измерений:

$$u_k = -G\hat{x}_k. \quad (2)$$

Оценку вектора состояния будем искать в следующем виде:

$$\hat{x}_{k+1} = A\hat{x}_k + Bu_k + K(y_k - C\hat{x}_k). \quad (3)$$

Как уже было отмечено, обмен информацией между объектом (1) и регулятором (2) осуществляется через сетевой канал связи, в котором может происходить потеря пакетов данных (рис. 2). Предполагается, что потерянный пакет не может позднее поступить ни на сторону объекта, ни на сторону регулятора, т.е. происходит абсолютная потеря. Задача состоит в нахождении такой матрицы усиления G , при которой управление в (2) обеспечивает устойчивость замкнутой системы при указанных условиях потери пакетов данных.

При сделанных предположениях в каждый дискретный момент времени рассматриваемая система может находиться в одном из двух структурных состояний. В первом обмен информацией между объектом и регулятором осуществляется нормально, во втором пакет теряется либо при передаче на сторону объекта, либо при передаче на сторону регулятора. Будем считать, что в случае потери пакета данных управление на объект не подается и, что переход из одного структурного состояния в другое описывается Марковской цепью с известной матрицей переходов. Таким образом, модель системы с учетом возможных потерь пакетов можно описать следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}
 S1: \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ \tilde{x}_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A-BG & BG \\ 0 & A-KC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \tilde{x}_k \end{bmatrix} \\
 S2: \begin{bmatrix} x_{k+1} \\ \tilde{x}_{k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} A & 0 \\ 0 & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_k \\ \tilde{x}_k \end{bmatrix}
 \end{aligned} \quad (4)$$

где $\tilde{x}_k = x_k - \hat{x}_k$.

Структурные состояния S1 и S2 будем рассматривать как возможные состояния Марковской цепи r_k , $k=0,1,\dots$ с вероятностями перехода $p_{ij} = P[r_{k+1} = S_j | r_k = S_i]$. Поскольку модель (4) является стохастической, необходимо соответствующим образом ввести понятие устойчивости. Достаточно сильным и адекватным рассматриваемой задаче является понятие экспоненциальной устойчивости в среднем квадратическом (ЭУСК) [3].



Рис. 2. Схема сетевой системы управления

Применим принцип разделения переменных x и \hat{x} для того, чтобы получить отдельные соотношения для матриц G и K . Этот принцип, справедливый для линейных систем постоянной структуры, в рассматриваемом случае нуждается в проверке, поскольку устойчивость понимается в стохастическом смысле. После нахождения матриц K и G необходимо подставить их в (4) и проверить ЭУСК замкнутой системы. Такой подход представляется вполне обоснованным с точки зрения эффективности использования аппарата линейных матричных неравенств.

Можно показать [4], что для нахождения матриц K и G необходимо решить следующую систему матричных неравенств:

$$\begin{bmatrix} -X_1 & \sqrt{p_{11}}\Gamma(X_1, Y_1)^T & \sqrt{p_{12}}\Gamma(X_1, Y_1)^T \\ \sqrt{p_{11}}\Gamma(X_1, Y_1) & -X_1 & 0 \\ \sqrt{p_{12}}\Gamma(X_1, Y_1) & 0 & -X_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} -X_2 & \sqrt{p_{21}}X_2A^T & \sqrt{p_{22}}X_2A^T \\ \sqrt{p_{21}}X_2A & -X_1 & 0 \\ \sqrt{p_{22}}X_2A & 0 & -X_2 \end{bmatrix} < 0$$

$$\begin{bmatrix} -\tilde{H}_1 & \sqrt{p_{11}}\Lambda(\tilde{H}_1, Y)^T & \sqrt{p_{12}}\Lambda(\tilde{H}_1, Y)^T \\ \sqrt{p_{11}}\Lambda(\tilde{H}_1, Y) & -\tilde{H}_1 & 0 \\ \sqrt{p_{12}}\Lambda(\tilde{H}_1, Y) & 0 & -\tilde{H}_2 \end{bmatrix} < 0 \quad (6)$$

$$(\tilde{H}_1 p_{21} + \tilde{H}_2 p_{22}) - \tilde{H}_2 < 0$$

где $\Gamma(X_1, Y_1) = AX_1 - BY$, $\Lambda(\tilde{H}_1, Y) = \tilde{H}_1 A - YC$, $X_1 = H_1^{-1}$, $X_2 = H_2^{-1}$, $Y = X_1 G$, $Y_1 = \tilde{H}_1 K$,

$Y_2 = \tilde{H}_2 K$ и $H_1, \tilde{H}_1, H_2, \tilde{H}_2$ - неизвестные симметричные положительно определенные матрицы.

Разрешимость полученных неравенств зависит от значений p_{ij} . Может оказаться, что при определенных значениях этих вероятностей построение стабилизирующего управления невозможно.

Синтез стабилизирующего управления для сетевых систем с использованием принципов прогнозирующего управления

Модель прогнозирующего управления относится к классу алгоритмов управления, которые используют модели предсказания будущих реакций системы. Изначально подход разрабатывался для удовлетворения специфических потребностей управления электростанций и нефтеперерабатывающих заводов. В настоящее время прогнозирующее управление можно найти в самых различных областях применения: пищевой, автомобильной и аэрокосмической промышленности.

Суть подхода в следующем: на каждом интервале управления алгоритм пытается оптимизировать будущее поведение системы путем вычисления последовательности будущих управлений. Последовательность управлений рассчитывается таким образом, чтобы оптимизировать будущее поведение системы в течение интервала времени, получившего название горизонта предсказаний. Первое управление из полученной последовательности отправляется объекту, и в следующий момент времени задача управления решается заново, используя обновленные измерения.

В предыдущем пункте потеря пакетов данных рассматривалась как одно из структурных состояний сетевой системы управления. Однако, если говорить об объекте управления, то в такие моменты он не переходит в какое-то новое состояние, продолжая функционировать в обычном режиме. Переключение сконструированной системы управления в другое структурное состояние характеризует не сам объект, для которого строится контур управления, но информацию о нем. С этой точки зрения применение принципов прогнозирующего управления очень привлекательно из-за нахождения системы в одном структурном состоянии, когда информация о ней доступна. Хотя нужно помнить, что иногда эта информация будет предсказанной, а не истинной.

Пусть имеется сетевая система управления, изображенная на рис. 3. Работа ее построена следующим образом:

- объект управления формирует измерения в виде текущего измерения и предсказанных измерений на несколько шагов вперед;
- объект управления пересылает сформированный пакет системе управления;
- если потери пакета не произошло, принятый пакет записывается в буфер, если произошла потеря, берутся предсказанные для этого шага измерения из буфера;
- строится наблюдатель;
- формируется пакет из оценки состояния на текущий момент и предсказанные состояния на несколько шагов вперед;
- пакет пересылается объекту управления;
- на стороне объекта управления, если не произошло потери пакета, полученный пакет записывается в буфер;
- управление берется либо с текущего момента, либо используются предсказания с предыдущих шагов.

В работе [5] показано, что система (1) с расширенным вектором состояния может быть записана следующим образом:

$$\begin{aligned} A_+ X_{k+1} &= A_0 X_k + B_0 u_k, \\ Y_k &= C_0 X_k, \end{aligned} \quad (7)$$

$$A_+ = \begin{bmatrix} I & 0 & \dots & 0 & 0 \\ -A & I & 0 & \dots & 0 \\ 0 & -A & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & -A & I \end{bmatrix}, \quad A_0 = \begin{bmatrix} A & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_0 = \begin{bmatrix} B & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & B & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & B \end{bmatrix},$$

где

$$C_0 = \begin{bmatrix} C & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & C & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & C & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix}, \quad X = [x_k \quad x_{k+1} \quad \dots \quad x_{k+N}], \quad Y = [y_k \quad y_{k+1} \quad \dots \quad y_{k+N}],$$

N – размер буфера (горизонта предсказаний).

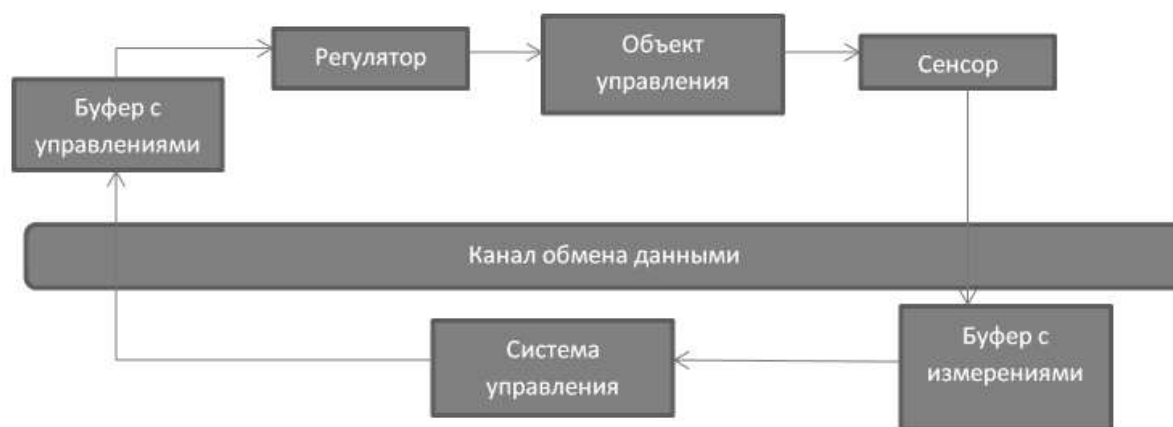


Рис. 3. Сетевая система управления с использованием принципов прогнозирующего управления

Обратим внимание, что в векторе измерений Y только измерения y_k являются действительным выходом системы (1), остальной набор $y_{k+1} \dots y_{k+N}$ – это предсказанные измерения, которые могут быть сформированы из оценки расширенного вектора состояния. Для определения оценки состояния системы (1) будем использовать уравнения линейного фильтра Калмана. Отметим здесь, что внутри горизонта предсказаний прогнозируемые состояния и измерения выбираются для каждой системы индивидуально. Они могут зависеть от таких факторов, как динамика системы и уровень внешнего воздействия. Еще раз напомним здесь основную идею прогнозирующего управления – внутри горизонта предсказаний модель поведения системы выбирается исходя из желаемого поведения системы, поэтому может варьироваться в довольно широких пределах.

Построение стабилизирующего управления полетом квадрокоптера

Рассматривается задача построения стабилизирующего управления полетом квадрокоптера в условиях потери пакетов данных в канале обмена данными между объектом и системой управления. Линейная система, характеризующая малые отклонения от положения равновесия по каналу угла крена и нулевого положения в пространстве, может быть записана следующим образом:

$$\ddot{\phi} = \frac{1}{I} u, \quad (8)$$

$$\ddot{x} = -g\phi + \frac{1}{Lm} u_t,$$

где m - масса квадрокоптера; I - момент инерции относительно оси X ; L - расстояние от плоскости винтов до двигателя; g - ускорение свободного падения.

Введем новый вектор неизвестных $X = [\phi \ \dot{\phi} \ x \ \dot{x}]$ и положим в качестве измеряемых величин $\dot{\phi}$ и x . В качестве параметров системы (8) выберем следующие значения: $m = 6$ кг, $L = 200$ мм, $I = 0,24$ кг \cdot м². Шаг дискретизации примем $dt = 0,02$ с.

В случае использования методов систем с переключениями были рассмотрены вероятности потери пакета 0,05, 0,2 и 0,25. Собственные значения и переходные процессы замкнутой системы близки для всех рассмотренных случаев. Рис. 4 содержат графики переходных процессов моделируемой системы для вероятности потери пакета данных 20%. В данном случае систему не удалось стабилизировать.

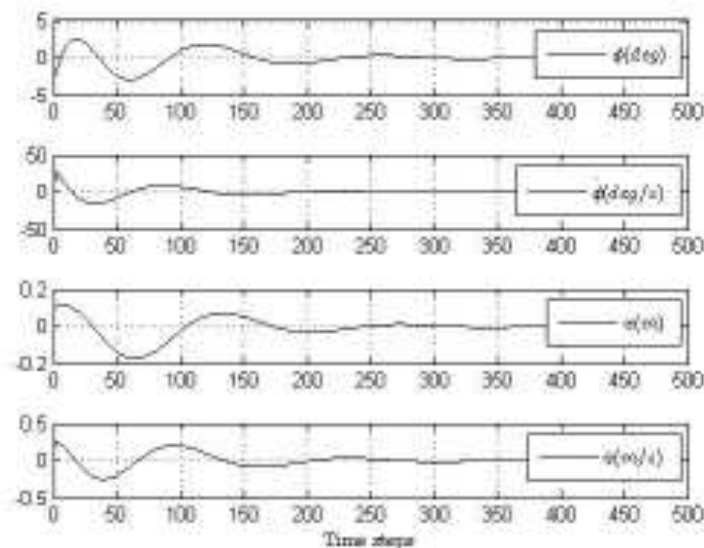


Рис. 4. Траектории стабилизированной системы

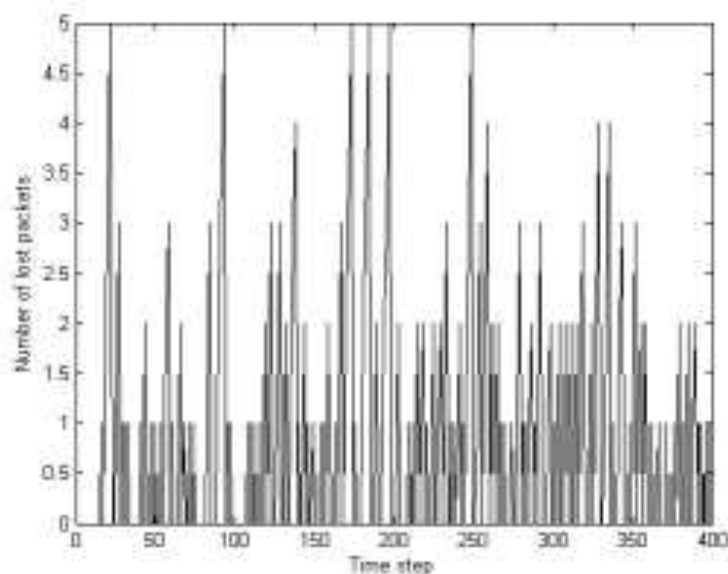


Рис. 5. Количество потерянных пакетов данных

В случае применения принципов прогнозирующего управления использовалась более «агрессивная» модель потери пакетов данных. Рис. 5 содержит график величины последовательно потерянных пакетов данных.

В этом распределении ненулевые величины показывают количество потерянных пакетов данных, начиная с последней удачной передачи. В приведённом примере количество потерянных пакетов составляет около 50% от их общего числа.

На рис. 6 приведены траектории стабилизированной системы.

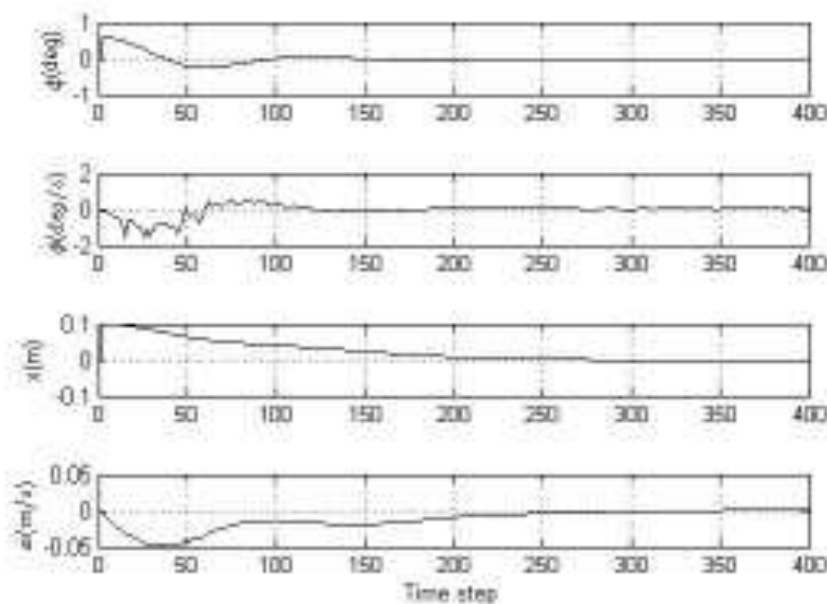


Рис. 6. Траектории стабилизированной системы

Видно, что система стабилизирована, несмотря на большое количество потерянных пакетов данных.

Выводы

Сравнивая результаты двух методов построения стабилизирующего управления, можно видеть, что использование принципов прогнозирующего управления позволяет добиваться устойчивости замкнутой системы при больших потерях информации в канале обмена данными. Так, для рассматриваемого примера стабилизирующего управления квадрокоптером их количество не превысило 20% в случае использования Марковской цепи для моделирования смены состояний системы и составило более 50% при использовании принципов прогнозирующего управления. Объяснено это может быть тем фактом, что в подходе с использованием Марковской цепи одним из структурных состояний являлась разомкнутая система, и искомые матрицы усиления обратной связи для управления и наблюдения должны были обеспечивать устойчивость системе, которая с некоторой вероятностью находилась в разомкнутом состоянии. В рассмотренном примере было показано, что при использовании предложенного метода данное условие может быть выполнено для относительно небольшого количества потерянных пакетов данных.

Следует, однако, помнить, что при использовании методов прогнозирующего управления ключевым элементом является степень соответствия построенного прогноза истинному состоянию системы. Неудачно выбранная модель может не позволить стабилизировать рассматриваемую динамическую систему.

Библиографический список

1. **Hespanha, J.P** Survey of recent results in networked control systems // Proceedings of IEEE. 2007. V. 95(1). P. 138–162.
2. **Smith, S.C.** Estimation with lossy measurements: jump estimators for jump systems / S.C. Smith, P. Seiler // Automatic Control IEEE Transactions. 2003. V. 48. № 12. P. 2163–2171.
3. **Пакшин, П.В.** Дискретные системы со случайными параметрами и структурой / П.В. Пакшин. – М.: Физматлит, 1994.
4. **Жучков, Р.Н.** Стабилизирующее сетевое управление линейными дискретными системами в условиях потери пакетов данных / Р.Н. Жучков, П.В. Пакшин // Управление большими системами. 2011. Вып. 33. С. 113–126.
5. **Жучков, Р.Н.** Применение идей прогнозирующего управления в синтезе стабилизирующего управления сетевыми объектами // Управление большими системами. 2013. Вып. 46. С. 147–162.

*Дата поступления
в редакцию* 22.04.2014

R.N. Zhuchkov

JUMP LINEAR SYSTEMS AND PREDICTIVE CONTROL APPROACHES IN STABILIZING NETWORKED CONTROL

Arzamas polytechnic institute (branch)
of the state Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Two approaches in networked control systems with data packet loss are compared.

Design/methodology/approach: Basic concepts of two approaches are reviewed. Efficiency of both methods is checked in quadcopter stabilization problem.

Findings: Predictive control approach allows to have more dropped data packets in network control system. It is important in remote control cases.

Originality/value: Reviewed approaches allow solving stabilizing control problem using simple mathematical technique.

Key words: networked control, jump linear systems, predictive control, Kalman filtering, linear matrix inequalities.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

ПОЛИНОМИАЛЬНАЯ АППРОКСИМАЦИЯ ЛИНИЯМИ И ПОВЕРХНОСТЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Тема работы: Построение аппроксимационных линий и поверхностей.**Цель работы:** Разработка алгоритмов приближения полиномиальными линиями и поверхностями.**Метод решения:** Равномерный и взвешенный методы наименьших квадратов.**Оригинальность:** Использован блочный способ расчета коэффициентов полиномов.**Выводы:** Получены алгоритмы конструирования аппроксимационных полиномов.*Ключевые слова:* полином, интерполяция, аппроксимация, матрица, функционал невязки.

Данная работа продолжает серию статей [1-2], посвященных блочному методу конструирования полиномиальных линий. На сей раз мы будем строить *аппроксимационные* линии, которые в меру своих изгибательных способностей, присущих степени полинома, проходят максимально близко к заданным узловым точкам, а через некоторые из них даже могут проходить точно. Полученные результаты будут распространены на поверхности.

Необходимость в полиномиальной аппроксимации возникает, по меньшей мере, в двух случаях, реализуемых понижением степени полинома m от ее интерполяционного значения n ;

- для уменьшения межузловых осцилляций, присущих интерполяционным полиномам высоких степеней;
- для сглаживания шумов, содержащихся в координатах узловых точек.

Вспомним, как задача полиномиальной интерполяции решается блочным методом.

Вектор коэффициентов полиномиальной функции

$$\mathbf{p}(t) = \mathbf{s}_0 + \mathbf{s}_1 t + \dots + \mathbf{s}_m t^m = \mathbf{S} \mathbf{T}_m(t) \quad \forall t \in [t_0, t_n], \quad (1)$$

совпадающей в отсчетах параметра t_0, t_1, \dots, t_n с вершинами узловой сети $\mathbf{u}_0, \mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_n$ и записанной с помощью вектора базовых функций $\mathbf{T}_m(t) = [1 \ t \ t^2 \ \dots \ t^m]^T$ в виде разложения по степеням параметра t , находится решением системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ)

$$\mathbf{S} \mathbf{W} = \mathbf{U} \quad (2)$$

с блочной матрицей Вандермонда $\mathbf{W} = [\mathbf{T}_m(t_0) \ \mathbf{T}_m(t_1) \ \dots \ \mathbf{T}_m(t_n)]$, составленной из $m+1$ -й степени $n+1$ -го узлового отсчета параметра t , и блочным вектором узловых точек $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \dots \ \mathbf{u}_n]$. При $m=n$ СЛАУ (2) с невырожденной $(n+1) \times (n+1)$ -матрицей \mathbf{W} имеет интерполяционное решение

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \mathbf{W}^{-1}, \quad (3)$$

обращающее в нуль квадратичный функционал невязки

$$\mathfrak{J} = \sum_{i=0}^n |\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{u}_i|^2 = (\mathbf{S} \mathbf{W} - \mathbf{U})(\mathbf{S} \mathbf{W} - \mathbf{U})^T. \quad (4)$$

Для уменьшения межузловых осцилляций, присущих полиномам высоких степеней $m \geq 7 \div 8$, можно задавать значение m меньше числа интервалов n ценой уменьшения изгибательности линии и потери ею интерполяционных свойств. Система (2) с числом неизвестных $m+1$, меньшим числа уравнений $n+1$, становится *переопределенной*, а ее МНК-решение [3]

$$\mathbf{S} = \mathbf{U} \mathbf{H}, \quad \text{где } \mathbf{H} = \mathbf{W}^T (\mathbf{W} \mathbf{W}^T)^{-1}, \quad (5)$$

доставляет критерию (4) минимальное значение

$$\mathfrak{Z}_{\min} = |\mathbf{U}\mathbf{H}\mathbf{W} - \mathbf{U}|^2 = \mathbf{U}(\mathbf{I}_{n+1} - \mathbf{H}\mathbf{W})\mathbf{U}^T > 0.$$

Получаемая в результате аппроксимационная полиномиальная линия (1) не проходит точно ни через один узел. Это расплата за уменьшение межузловых осцилляций, которыми грешат интерполяционные полиномы высоких степеней при большом числе узлов. Иллюстрацией сказанного служат аппроксимационные полиномы степеней $m=1\div 6$, построенные на детерминированной сетке с числом интервалов $n=7$ (рис. 1, а, б).

При выборе $m=n$ решение (5) сводится к (3), сумма (4) достигает абсолютного минимума $\mathfrak{Z}_{\min}=0$, а полиномиальная аппроксимация превращается в интерполяцию — точное прохождение линии через все узлы с максимальными осцилляциями (рис. 1, в). Для преодоления плохой обусловленности матрицы $\mathbf{W}^T(\mathbf{W}\mathbf{W}^T)^{-1}$, при $m=n$ теоретически равной \mathbf{W}^{-1} , следует заменить ее расчет прямым обращением матрицы \mathbf{W} .

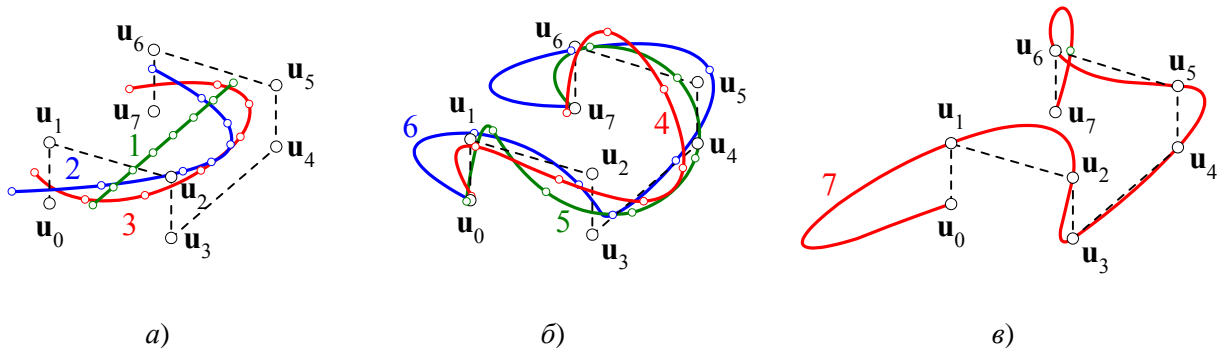


Рис. 1. Полиномиальные линии

Часто координаты вершин узловой сети зашумлены случайными помехами. Допустим, у некоторой эталонной полиномиальной зависимости $\mathbf{p}_3(t)$ степени m_3 модель измерения

$$\mathbf{u}_i = \mathbf{p}_3(t_i) + \xi_i \quad \forall i = \overline{0, n} \tag{6}$$

содержит вектор случайного смещения ξ_i с равномерно распределенными элементами $rnd(2\sigma) - \sigma \in (-\sigma, \sigma)$. В результате интерполяционная линия $\mathbf{p}(t)$ степени $m=n$, стремясь пройти через все точки $\mathbf{u}_0 \div \mathbf{u}_n$, приобретает хаотические изгибы (рис. 2, а).

Аппроксимационный полином степени $m < n$ обладает замечательной способностью сглаживать осцилляции стохастического характера. По мере увеличения степени линия $\mathbf{p}(t)$ проходит все ближе и ближе к узлам \mathbf{u}_i (рис. 2, б), а значение функционала (4) уменьшается, достигая нуля при $m=n$, когда сглаживающий эффект исчезает. Наибольший спад зависимости $\mathfrak{Z}(m)$ при разных параметрах разброса σ стабильно наблюдается по достижении степени $m=m_3$ (рис. 2, в). Эту закономерность можно использовать для идентификации неизвестной степени полинома $\mathbf{p}_3(t)$.

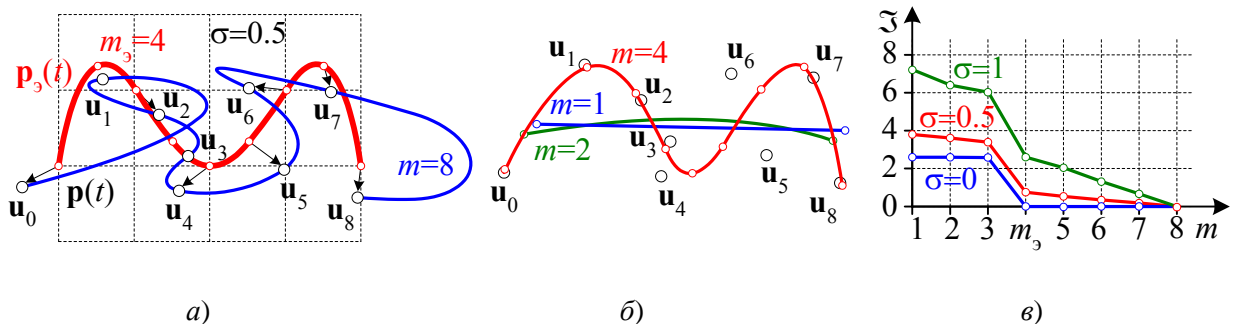


Рис. 2. Стохастическая МНК-аппроксимация

Суммирование в (4) квадратичных невязок в равных пропорциях приводит к получению линии, примерно одинаково приближенной ко всем узловым точкам, независимо от ошибок их измерения. Однако во многих практических задачах узловые точки могут быть известны с разными погрешностями. Точные данные несут больше информации о неизвестной зависимости и вызывают больше доверия. Большие ошибки измерений приводят к чрезмерному «вилянию» интерполяционной линии, стремящейся пройти через каждый узел. Алгоритм аппроксимации должен давать решение, проходящее тем ближе к узловой точке, чем точнее она измерена.

Усовершенствуем метод (5) так, чтобы можно было регулировать близость линии (1) к вершинам узловой сети с учетом ошибок их измерения. Для этого введем в функционал (4) весовые коэффициенты $\varphi_i \geq 0$, входящие в диагональную матрицу $\Phi = \text{diag}[\varphi_1 \ \varphi_2 \ \dots \ \varphi_n]$ и обратно пропорциональные дисперсиям погрешностей измерения точек \mathbf{u}_i :

$$\mathfrak{J} = \sum_{i=0}^n \varphi_i |\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{u}_i|^2 = (\mathbf{S}\mathbf{W} - \mathbf{U})\Phi(\mathbf{S}\mathbf{W} - \mathbf{U})^T \rightarrow \min_{\mathbf{S}}. \quad (7)$$

При задании некоторого коэффициента $\varphi_k = 0$ вклад невязки $|\mathbf{p}(t_k) - \mathbf{u}_k|$ в общую сумму исчезает, что делает линию $\mathbf{p}(t)$ полностью независимой от расположения точки \mathbf{u}_k . Напротив, при $\varphi_k \rightarrow \infty$ расстояние между точкой $\mathbf{p}(t_k)$ и узлом \mathbf{u}_k должно стремиться к нулю.

Выполним минимизацию функционала (7) взвешенным методом наименьших квадратов (ВМК). Из условия $d\mathfrak{J}/d\mathbf{S} = 2\mathbf{S}\mathbf{W}\Phi\mathbf{W}^T - 2\mathbf{U}\Phi\mathbf{W}^T = \mathbf{O}_{m+1}$ вытекает решение задачи — вектор полиномиальных коэффициентов

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{H}, \quad (8)$$

где $\mathbf{H} = \Phi\mathbf{W}^T(\mathbf{W}\Phi\mathbf{W}^T)^{-1}$. Подставив его в (7), получим минимальное значение функционала невязки

$$\mathfrak{J}_{\min} = \mathbf{U}(\mathbf{I}_{n+1} - \mathbf{H}\mathbf{W})\Phi\mathbf{U}^T.$$

Очевидно, что функционал (4) и минимизирующее его решение (5) представляют собой частный случай взвешенной задачи (7) с единичной матрицей Φ .

Иллюстрацией работы описанного алгоритма взвешенной аппроксимации служат линии разных степеней на рис. 3, построенные на эталонных узлах $\mathbf{p}_3(t_i)$ из рис. 2, смещенных по (6) с разными максимальными отклонениями $\sigma_0 \div \sigma_8$. Точки \mathbf{u}_0 и \mathbf{u}_3 сгенерированы при малых отклонениях $\sigma = 0,01$, точки выбросов \mathbf{u}_1 и \mathbf{u}_5 имеют большое значением $\sigma = 1$, а остальные узлы созданы при $\sigma = 0,1$. Весовые коэффициенты функционала (7) задавались равными $\varphi_i = \sigma_i^{-2}$.

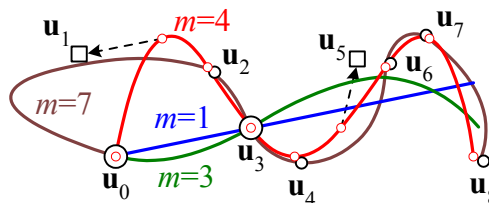


Рис. 3. Взвешенная МНК-аппроксимация

При любом выборе конечных весовых коэффициентов $\varphi_0 \div \varphi_n$ линия $\mathbf{p}(t)$, минимизирующая функционал (7), всегда будет аппроксимационной, поскольку для точного попадания в некоторый узел \mathbf{u}_k нужно задать недостижимое значение коэффициента $\varphi_k = \infty$. К то-

му же с ростом отношения $\varphi_{\max}/\varphi_{\min}$ ухудшается обусловленность обращаемой в (8) матрицы $\mathbf{W}\Phi\mathbf{W}^T$, что уменьшает вычислительную устойчивость ВМНК.

В рамках метода наименьших квадратов существует возможность совместить в приближающей линии как интерполяционные, так и аппроксимационные свойства, т. е. зафиксировать в некотором множестве узловых точек \mathbf{u}_i желаемые состояния $\mathbf{p}(t_i)$, направления $\mathbf{p}'(t_i)$ или ускорения $\mathbf{p}''(t_i)$, а вокруг остальных узлов \mathbf{u}_j дать возможность линии вести себя менее связано. Например, при конструировании линий, составленных из сегментов невысоких порядков, нужно обеспечить непрерывное и гладкое сопряжение сегментов, что достигается закреплением их концов в определенных точках и направлениях.

Поставим задачу построения *приближающего* полинома $\mathbf{p}(t)$ степени m на сетке узлов $\{t_i, \mathbf{u}_i\} \forall i=0, n$, который обладал бы следующими свойствами (рис. 4):

- был закреплен в крайних узлах \mathbf{u}_0 и \mathbf{u}_n , т. е. являлся *интерполяционным* решением системы из $v=2$ уравнений

$$\mathbf{S}[\mathbf{T}_m(t_0) \ \mathbf{T}_m(t_n)] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_n] \text{ или } \mathbf{S}\mathbf{W}_и = \mathbf{U}_и. \tag{9}$$

Можно задать и другие v условий фиксации узловых состояний, скоростей и ускорений путем надлежащего формирования блочных матрицы $\mathbf{W}_и \in \mathbb{R}^{(m+1) \times v}$ и вектора $\mathbf{U}_и \in \mathbb{R}^v$. Например, система из $v=4$ -х уравнений, фиксирующая концевые точки $\mathbf{p}(t_0)=\mathbf{u}_0$, $\mathbf{p}(t_n)=\mathbf{u}_n$ и векторы направлений $\mathbf{p}'(t_0)=\mathbf{V}_0$, $\mathbf{p}'(t_n)=\mathbf{V}_n$, имеет вид

$$\mathbf{S}[\mathbf{T}_m(t_0) \ \mathbf{T}_m(t_n) \ \mathbf{T}'_m(t_0) \ \mathbf{T}'_m(t_n)] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_n \ \mathbf{V}_0 \ \mathbf{V}_n];$$

- проходил в окрестности внутренних узлов $\mathbf{u}_1 \div \mathbf{u}_{n-1}$, т. е. являлся *аппроксимационным* решением системы из $\mu=n-1$ приближенных уравнений:

$$\mathbf{S}[\mathbf{T}_m(t_1) \ \dots \ \mathbf{T}_m(t_{n-1})] \approx [\mathbf{u}_1 \ \dots \ \mathbf{u}_{n-1}] \text{ или } \mathbf{S}\mathbf{W}_а \approx \mathbf{U}_а. \tag{10}$$

Число μ и состав аппроксимируемых узлов могут быть изменены путем формирования соответствующих блочных матрицы $\mathbf{W}_а \in \mathbb{R}^{(m+1) \times \mu}$ и вектора $\mathbf{U}_а \in \mathbb{R}^\mu$.

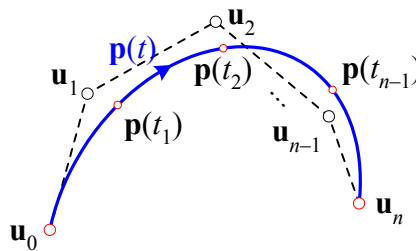


Рис. 4. Приближающая линия

В случае иного, чем в (9) и (10), состава матрицы $\mathbf{W}_и$ и $\mathbf{W}_а$ должны быть **полноранговыми** и не иметь одинаковых столбцов. Другими словами, условие $\mathbf{S}\mathbf{T}_m(t_i)=\mathbf{u}_i$ должно входить лишь в одну из двух систем, а узел \mathbf{u}_i должен быть либо интерполяционным, либо аппроксимационным, что является вполне естественным требованием. В зависимости от соотношений между числом неизвестных коэффициентов $m+1$ и размерностями v и μ обе системы могут быть различных типов определенности, поэтому выбор подходящей формулы вычисления вектора \mathbf{S} не однозначен.

Алгоритм решения общей задачи условной аппроксимации — минимизации квадратичного функционала невязок

$$\mathfrak{J} = \sum_{i=1}^{n-1} |\mathbf{p}(t_i) - \mathbf{u}_i|^2 = (\mathbf{S}\mathbf{W}_а - \mathbf{U}_а)(\mathbf{S}\mathbf{W}_а - \mathbf{U}_а)^T \rightarrow \min_{\mathbf{S}} \tag{11}$$

в подпространстве решений системы $\mathbf{S}\mathbf{W}_и = \mathbf{U}_и$ использует операцию *псевдообращения* матриц любых размерностей и рангов. Применительно к некоторой прямоугольной матрице $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{n \times m}$ полного ранга $r = \min\{n, m\}$ псевдообратная матрица $\mathbf{A}^+ \in \mathbb{R}^{m \times n}$ вычисляется как

$$\mathbf{A}^+ = \begin{cases} \mathbf{A}^T (\mathbf{A}\mathbf{A}^T)^{-1} & \text{при } n < m; \\ \mathbf{A}^{-1} & \text{при } n = m; \\ (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T & \text{при } n > m. \end{cases}$$

Псевдообращение матрицы неполного ранга выполняется методами ортогонального или сингулярного разложений. В частности, нулевая матрица $\mathbf{A} = \mathbf{O}_{n \times m}$ имеет нулевую псевдообратную матрицу $\mathbf{A}^+ = \mathbf{O}_{m \times n}$.

Как показано в [3], решение линейной задачи наименьших квадратов с ограничениями–равенствами в принятых здесь обозначениях имеет вид

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}_и \mathbf{W}_и^+ + (\mathbf{U}_а - \mathbf{U}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а) (\mathbf{W}_а - \mathbf{W}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а)^+ . \quad (12)$$

Первое слагаемое $\mathbf{S}_и = \mathbf{U}_и \mathbf{W}_и^+$ представляет собой нормальное (минимальной длины или нормы) псевдорешение системы $\mathbf{S}\mathbf{W}_и = \mathbf{U}_и$, а второе слагаемое сдвигает вектор $\mathbf{S}_и$ в точку минимума функционала (11).

Путем изъятия из общей задачи одной из систем уравнений получим два частных случая задачи полиномиального приближения:

- в отсутствие аппроксимационной СЛАНУ $\mathbf{S}\mathbf{W}_а \approx \mathbf{U}_а$ – задачу *интерполяции* с решением

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}_и (\mathbf{W}_и^T \mathbf{W}_и)^{-1} \mathbf{W}_и^T ,$$

которое при $\mathbf{U}_и = \mathbf{U}$, $m = n$ и $\mathbf{W}_и = \mathbf{W}$ превращается в (3);

- в отсутствие интерполяционной СЛАНУ $\mathbf{S}\mathbf{W}_и = \mathbf{U}_и$ задачу *аппроксимации* с решением

$$\mathbf{S} = \mathbf{U}_а \mathbf{W}_а^T (\mathbf{W}_а \mathbf{W}_а^T)^{-1} ,$$

переходящим в (5) при $\mathbf{U}_а = \mathbf{U}$ и $\mathbf{W}_а = \mathbf{W}$.

С помощью перестановок блоков выражение (12) вектора \mathbf{S} через подмножества узлов $\mathbf{U}_и$ из (9) и $\mathbf{U}_а$ из (10) можно записать в типовом виде $\mathbf{S} = \mathbf{U}\mathbf{H}$ с регулярным вектором узлов $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \dots \ \mathbf{u}_n]$:

$$\mathbf{S} = [\mathbf{U}_и \ \mathbf{U}_а] \begin{bmatrix} \mathbf{W}_и^+ - \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а (\mathbf{W}_а - \mathbf{W}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а)^+ \\ (\mathbf{W}_а - \mathbf{W}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а)^+ \end{bmatrix} = \\ = \mathbf{U} \begin{bmatrix} 1 & 0 & \mathbf{O}_{1, n-1} \\ \mathbf{O}_{n-1, 1} & \mathbf{O}_{n-1, 1} & \mathbf{I}_{n-1} \\ 0 & 1 & \mathbf{O}_{1, n-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{W}_и^+ - \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а (\mathbf{W}_а - \mathbf{W}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а)^+ \\ (\mathbf{W}_а - \mathbf{W}_и \mathbf{W}_и^+ \mathbf{W}_а)^+ \end{bmatrix} .$$

Условие единственности решения [3] – равенство ранга составной матрицы $[\mathbf{W}_и \ \mathbf{W}_а]$ числу $m+1$ коэффициентов приближающего полинома, которое (а это условие существования решения) не должно быть меньше числа интерполяционных уравнений:

$$v \leq m+1 \leq v+\mu .$$

Для матриц $\mathbf{W}_и$ и $\mathbf{W}_а$ из (9) и (10) эти условия сводятся к неравенству $1 \leq m \leq n$.

По изложенному алгоритму на рис. 5 построены семейства приближающих полиномов разных степеней m с концами, зафиксированными в крайних узлах. Утолщением выделены интерполяционные линии степеней $m = n$, обладающие наибольшими осцилляциями.

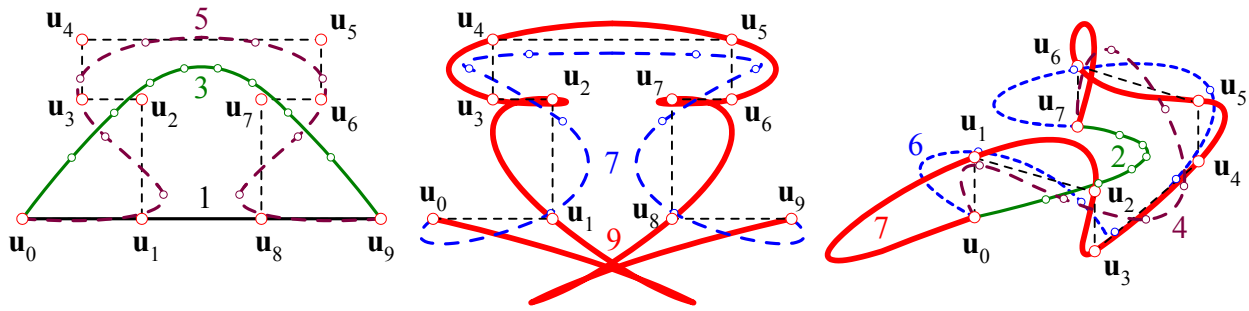


Рис. 5. Примеры приближающих линий

Распространим полученные достижения на трехмерный графический объект — поверхность, описываемую аналогичной (1) бипараметрической векторной функцией

$$\mathbf{p}(t, \tau) = \sum_{i=0}^v \sum_{j=0}^{\mu} \mathbf{s}_{ij} t^i \tau^j = \mathbf{T}_v^T(t) \mathbf{S} \mathbf{T}_\mu(\tau) \quad \forall t \in [t_0, t_n], \tau \in [\tau_0, \tau_m]. \quad (13)$$

Скелетной основой построения поверхности служит матрично организованная узловая сеть $\mathbf{U} = \{\mathbf{u}_{ij}\}$ с индексами вершин $i = \overline{0, n}$, $j = \overline{0, m}$. Матрица полиномиальных коэффициентов \mathbf{S} , минимизирующая аналогичный (4) функционал невязки

$$\mathfrak{S} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m |\mathbf{p}(t_i, \tau_j) - \mathbf{u}_{ij}|^2 \rightarrow \min_{\mathbf{S}}, \quad (14)$$

находится следующим образом:

- на узловых отсчетах параметров $\{t_0, t_1, \dots, t_n\}$ и $\{\tau_0, \tau_1, \dots, \tau_m\}$ формируются матрицы Вандермонда:

$$\mathbf{W} = [\mathbf{T}_v(t_0) \quad \mathbf{T}_v(t_1) \quad \dots \quad \mathbf{T}_v(t_n)] \in \mathbb{R}^{(v+1) \times (n+1)},$$

$$\mathbf{\Omega} = [\mathbf{T}_\mu(\tau_0) \quad \mathbf{T}_\mu(\tau_1) \quad \dots \quad \mathbf{T}_\mu(\tau_m)] \in \mathbb{R}^{(\mu+1) \times (m+1)};$$

- при $v < n$ и $\mu < m$ эти матрицы не квадратны и аналогично (5) получим *аппроксимационное* МНК-решение

$$\mathbf{S} = \mathbf{H}^T \mathbf{U} \mathbf{N}, \quad \text{где } \mathbf{H} = \mathbf{W}^T (\mathbf{W} \mathbf{W}^T)^{-1}, \quad \mathbf{N} = \mathbf{\Omega}^T (\mathbf{\Omega} \mathbf{\Omega}^T)^{-1}, \quad (15)$$

доставляющее функционалу (14) минимум

$$\mathfrak{S}_{\min} = \text{tr}((\mathbf{W}^T \mathbf{S} \mathbf{\Omega} - \mathbf{U})(\mathbf{W}^T \mathbf{S} \mathbf{\Omega} - \mathbf{U})^T);$$

- в предельном случае $v = n$ и $\mu = m$ матрицы \mathbf{W} и $\mathbf{\Omega}$ становятся квадратными, аппроксимационное решение (15) превращается в интерполяционное $\mathbf{S} = (\mathbf{W}^{-1})^T \mathbf{U} \mathbf{\Omega}^{-1}$, а функционал невязки достигает абсолютного минимума $\mathfrak{S}_{\min} = 0$.

Пример. Методом трехмерной аппроксимации построить полиномиальную модель поверхности, сглаживающей набор точек с зашумленными координатами.

Решение. Возьмем, например, квадратичную поверхность гиперболического параболоида $x^2 - 4y - z^2 = 0$ с эталонной параметрической моделью

$$\mathbf{p}_3(t, \tau) = \left[t \quad \frac{t^2 - \tau^2}{4} \quad \tau \right], \quad t \in [-3, 3], \quad \tau \in [-2, 2]. \quad (16)$$

Сформируем узловые отсчеты параметров $t_i = i - 3 \quad \forall i = \overline{0, 6}$, $\tau_j = j - 2 \quad \forall j = \overline{0, 4}$ и сгенерируем вершины узловой сети с координатами

$$\mathbf{p}_{ij} = \mathbf{p}_3(t_i, \tau_j) + [rnd(2\sigma) - \sigma \quad rnd(2\sigma) - \sigma \quad rnd(2\sigma) - \sigma] \quad \text{при } \sigma = 0,3. \quad (17)$$

Построим на одной и той же зашумленной узловой сети набор полиномиальных поверхностей (13) для всех сочетаний степеней полинома $v \in \{1, 2, 6\}$ и $\mu \in \{1, 2, 4\}$ (рис. 6). Как и

полагается, билинейная модель с $\nu=\mu=1$ представляет собой косую плоскость, поверхности с $\nu=1$ имеют каркасные прямые в t -направлении, с $\mu=1$ — в τ -направлении, степени $\nu=2$ и $\mu=2$ создают параболические изгибы соответствующих каркасных линий.

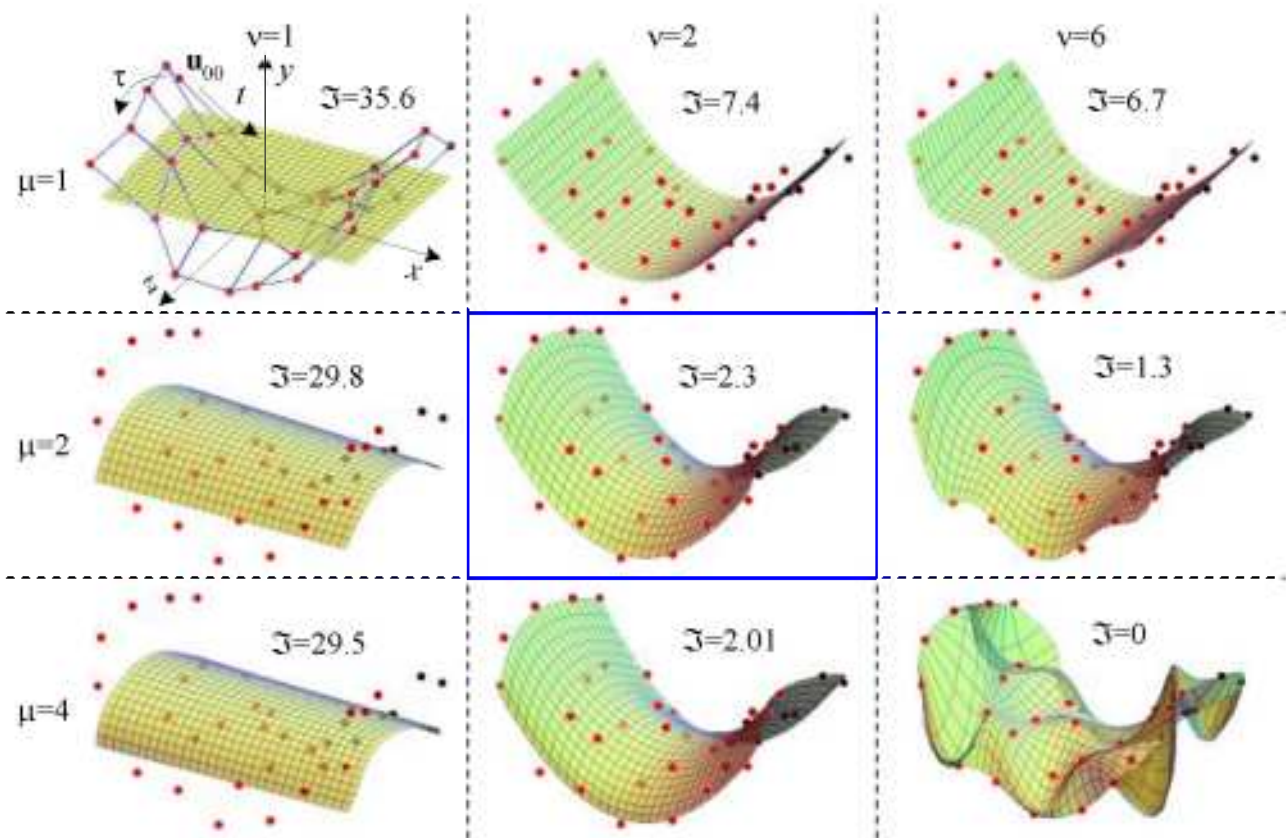


Рис. 6. Аппроксимационные поверхности

Анализируя форму поверхностей, замечаем, что аппроксимация со степенями $\nu=\mu=2$ наиболее гладко отражает общие тенденции расположения узловых точек (параболические выгинутости вверх вдоль оси x и вниз вдоль оси z) и в то же время малочувствительна к их случайным смещениям. К тому же функционал невязки на этой паре $\{\nu, \mu\}$ претерпевает наиболее резкое уменьшение до $Z \approx 2,3$ в сравнении с соседними парами. Дальнейшее увеличение степеней аппроксимационного полинома вплоть до интерполяционных значений $\nu=6$ и $\mu=4$ изгибает поверхность в локальных местах, приближая их к зашумленным узловым точкам и теряя общие закономерности их расположения.

По совокупности признаков заключаем, что **эталонная поверхность описывается биквадратичной полиномиальной моделью** (13) со степенями $\nu_3=\mu_3=2$. Численным расчетом была получена матрица векторных коэффициентов этой модели

$$S = \begin{bmatrix} [-0.028 & 0.052 & -0.082] & [0.052 & 0.066 & 0.988] & [0.053 & -0.246 & -0.023] \\ [1.018 & 0.044 & -0.028] & [0.018 & 0.011 & -0.018] & [0.012 & 0.017 & -0.012] \\ [-0.002 & 0.26 & 0.002] & [0.008 & 0.079 & -0.008] & [-0.003 & 0.003 & 0.003] \end{bmatrix},$$

тогда как эталонной модели (16) соответствует следующая матрица коэффициентов:

$$S_3 = \begin{bmatrix} [0 & 0 & 0] & [0 & 0 & 1] & [0 & -0.25 & 0] \\ [1 & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] \\ [0 & 0.25 & 0] & [0 & 0 & 0] & [0 & 0 & 0] \end{bmatrix}.$$

В системах обработки данных вершины узловой сети u_{ij} часто бывают измерены с разными погрешностями. Точно измеренные точки достоверно представляют неизвестную

поверхность, тогда как сильно зашумленные весьма от нее далеки. В результате суммирование в (14) квадратичных невязок с одинаковыми весами приводит к получению полиномиальной поверхности $\mathbf{p}(t, \tau)$, равномерно приближенной ко всем узловым точкам, независимо от погрешностей их измерения. Хотелось бы, однако, чтобы восстанавливаемая поверхность была тем ближе к узловой точке, чем точнее та измерена, а влияние на нее очевидных грубых выбросов было минимальным.

Усовершенствуем задачу (14) так, чтобы можно было регулировать близость поверхности (13) к вершинам узловой сети с учетом погрешностей их измерения. Для этого введем в квадратичный функционал невязки весовые коэффициенты $\varphi_{ij} \geq 0$, составляющие матрицу Φ и обратно пропорциональные дисперсиям погрешностей измерения точек \mathbf{u}_{ij} :

$$\mathfrak{S} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \varphi_{ij} \left| \mathbf{p}(t_i, \tau_j) - \mathbf{u}_{ij} \right|^2 \rightarrow \min. \tag{18}$$

При задании некоторого коэффициента $\varphi_{kl} = 0$ вклад невязки $|\mathbf{p}(t_k, \tau_l) - \mathbf{u}_{kl}|$ в общую сумму аннулируется, что делает поверхность полностью независимой от расположения точки \mathbf{u}_{kl} .

Выполним минимизацию функционала (18) взвешенным МНК. Из-за произвольности весовых коэффициентов φ_{ij} представление взвешенной суммы квадратов невязок с помощью матриц Φ , \mathbf{S} , \mathbf{W} и Ω отсутствует (при всех $\varphi_{ij} = 1$ функционал (14) может быть записан как $\text{tr}((\mathbf{W}^T \mathbf{S} \Omega - \mathbf{U})(\mathbf{W}^T \mathbf{S} \Omega - \mathbf{U})^T)$), но существует в поэлементной форме

$$\mathfrak{S} = \sum_{i,j} \varphi_{ij} \left| \sum_{k,l} s_{kl} t_i^k \tau_j^l - \mathbf{u}_{ij} \right|^2 \quad \forall i = \overline{0, n}, j = \overline{0, m}, k = \overline{0, v}, l = \overline{0, \mu}.$$

Из условий $\partial \mathfrak{S} / \partial s_{kl} = 0 \quad \forall k, l$ составим систему из $N = (v+1)(\mu+1)$ линейных уравнений относительно такого же числа элементов матрицы \mathbf{S} :

$$\sum_{\kappa, \lambda} s_{\kappa \lambda} \underbrace{\sum_{i,j} \varphi_{ij} t_i^{k+\kappa} \tau_j^{l+\lambda}}_{a_{kl \kappa \lambda}} = \underbrace{\sum_{i,j} \varphi_{ij} t_i^k \tau_j^l \mathbf{u}_{ij}}_{\mathbf{b}_{kl}} \quad \forall \kappa = \overline{0, v}, \lambda = \overline{0, \mu}. \tag{19}$$

Для решения этой СЛАУ развернем построчно прямоугольную матрицу \mathbf{S} размерности $(v+1) \times (\mu+1)$ в N -вектор

$$\vec{\mathbf{S}} = [s_{00} \dots s_{0\mu} | s_{10} \dots s_{1\mu} | \dots | s_{v0} \dots s_{v\mu}]. \tag{20}$$

Используя принятые в (19) обозначения индексированных коэффициентов $a_{kl \kappa \lambda}$ и \mathbf{b}_{kl} , получим векторно-матричную СЛАУ N -го порядка:

$$\vec{\mathbf{S}} \mathbf{A} = \mathbf{B},$$

где

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{00} & \dots & \mathbf{A}_{0v} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{A}_{v0} & \dots & \mathbf{A}_{vv} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_{k\kappa} = \begin{bmatrix} a_{k0\kappa 0} & \dots & a_{k\mu\kappa 0} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{k0\kappa \mu} & \dots & a_{k\mu\kappa \mu} \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{B} = [\mathbf{b}_{00} \dots \mathbf{b}_{0\mu} | \mathbf{b}_{10} \dots \mathbf{b}_{1\mu} | \dots | \mathbf{b}_{v0} \dots \mathbf{b}_{v\mu}].$$

Решением этой системы, полностью определенной при ненулевой весовой матрице Φ , является вектор полиномиальных коэффициентов

$$\vec{\mathbf{S}} = \mathbf{B} \mathbf{A}^{-1},$$

который по (20) сворачивается в матрицу \mathbf{S} , после чего по (13) строится аппроксимационная поверхность.

Иллюстрацией описанного алгоритма взвешенной аппроксимации служат поверхности на рис. 7, построенные на эталонной узловой сети из Примера, вершины которой смещены по (17) с разными максималь-

ными отклонениями равномерного распределения σ_{ij} . Точки \mathbf{u}_{00} , \mathbf{u}_{06} , \mathbf{u}_{23} и \mathbf{u}_{46} , обозначенные символом \circ , сгенерированы при малых отклонениях $\sigma = 0,05$, точка выброса \mathbf{u}_{40} с большим значением $\sigma = 5$ обозначена \square , а остальные точки \mathbf{u}_{ij} соответствуют $\sigma = 0,5$. Весовые коэффициенты функционала (18) задавались равными $\varphi_{ij} = \sigma_{ij}^{-2}$. Анализ форм поверхностей предоставляется читателю.

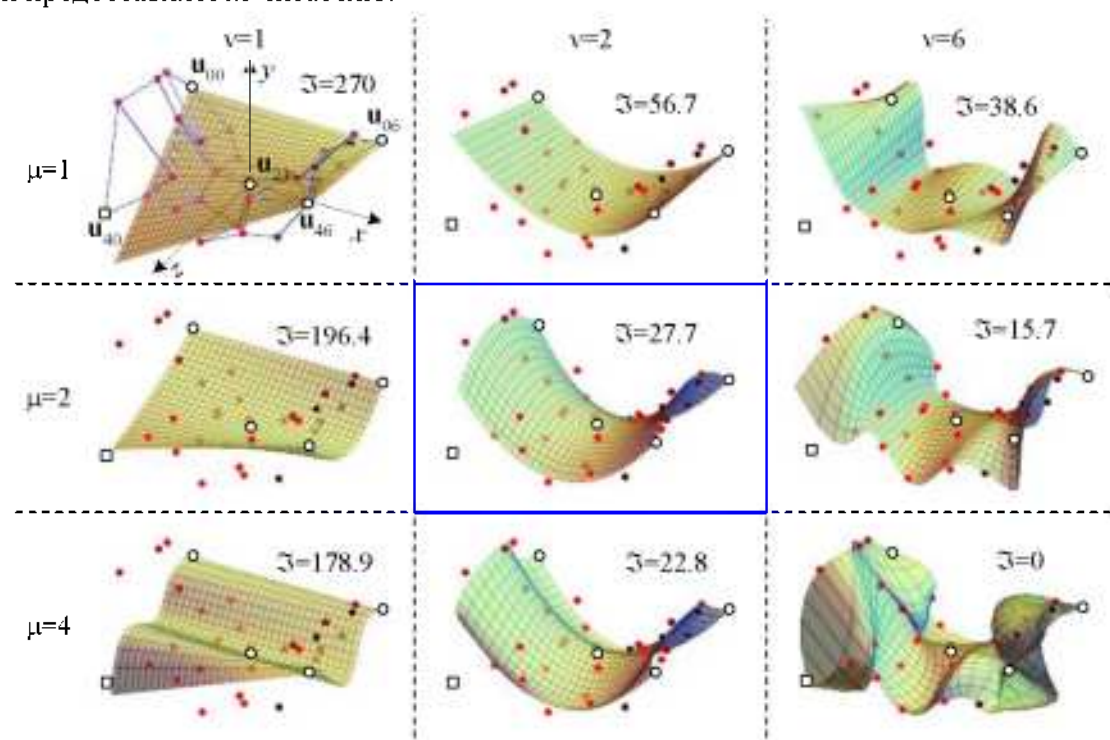


Рис. 7. Взвешенная МНК-аппроксимация

Библиографический список

1. Никулин, Е.А. Построение составных линий с различными свойствами сопряжения и произвольными условиями фиксации сегментов // Труды НГТУ. 2006. Т. 58. Вып. 11. С. 5–12.
2. Никулин, Е.А. Прямой параметрический синтез сплайновых линий // Системы обработки информации и управления // Труды НГТУ. 2007. Т. 65. Вып. 14. С. 123–130.
3. Лоусон, Ч. Численное решение задач метода наименьших квадратов / Ч. Лоусон, Р. Хенсон. – М.: Наука, 1986.

Дата поступления
в редакцию 22.04.2014

Е.А. Nikulin

POLYNOMIAL APPROXIMATION BY LINES AND SURFACES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject: Construction of approximation lines and surfaces.

Purpose: Design of algorithms for polynomial approximation lines and surfaces.

Methodology: Uniform and weighted least squares methods.

Originality: Block method of calculating the coefficients of polynomials is used.

Findings: Algorithms of constructing approximation polynomials are obtained.

Key words: polynom. interpolation. approximation, matrix, the residual functional.

УДК 004.932

Е.О. Богачева, Д.В. Дмитриев, О.Н. Корелин

ОСОБЕННОСТИ СЖАТИЯ ФОРМАТА DjVu ДЛЯ ЭКОНОМИИ СЕТЕВОГО ТРАФИКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ СЕГМЕНТАЦИИ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведена сравнительная характеристика форматов JPEG и DjVu для сжатия изображений с текстовой информацией. Подробно рассмотрен алгоритм сжатия изображений с текстовой информацией DjVu. Выявлены недостатки формата DjVu. Проведено сравнение альтернативных методов выделения связанных компонент на изображении с помощью сегментации.

Ключевые слова: формат сжатия изображений, DjVu, JPEG, сегментация изображений.

Большая часть знаний в виде культурного и образовательного материала существующего сегодня доступна лишь в бумажной форме. Внедрение данного информационного богатства в цифровую область в схожем с оригиналом виде, с лёгким доступом и поиском, является основным шагом к созданию Всемирной Интернет Библиотеки.

Для экономии трафика при передаче оцифрованных изображений с текстом по вычислительным сетям могут использоваться различные форматы, одним из них является DjVu. Создание электронных архивов – качественно новый уровень хранения информации. Но в каком виде желательно хранить и передавать оцифрованные изображения, чтобы при этом были соблюдены два взаимоисключающих требования – минимальные объемы хранения и передачи с точным соответствием сохраняемого изображения оригиналу?

Один из наиболее известных форматов сжатия изображений с потерями данных JPEG, сжатие основывается на дискретно-косинусоидальном преобразовании. Получаемое после сжатия изображение имеет определенные отличия от оригинала. Если рассматривать JPEG в качестве формата для хранения текстовой информации, то основной задачей является не просто получение изображения, сжатого до требуемого значения, а подбор необходимого баланса между выходным объемом и получаемым при этом качеством сжатого изображения.

При JPEG-сжатии изображений с текстом возможно возникновение следующих проблем:

- Резкое искажение первоначальной цветовой палитры;
- Появление на изображении бесформенных цветных пятен с однородной заливкой;
- Появление каймы вокруг литер текста и других границ с резким переходом «цвет-цвет».

Таким образом, применимость формата JPEG для сжатия цветных и черно-белых изображений с текстовой информацией достаточно ограничена.

Формат сжатия изображений DjVu использует радикально отличный от JPEG принцип обработки изображений. DjVu относится к группе форматов, основанных на технологии MRC (Mixed raster content), перед сжатием изображение необходимо «разделить на слои».

DjVu (от фр. *déjà vu* – «уже виденное») – технология сжатия изображений с потерями, разработанная специально для хранения сканированных документов – книг, журналов и рукописей. Формат является эффективным решением для передачи всех нюансов оформления, например, исторических документов, где важное значение имеет не только содержание, но и цвет и фактура бумаги; дефекты пергамента: трещинки, следы от складывания; исправления, кляксы, отпечатки пальцев; следы, оставленные другими предметами и т. д. Архивы всего мира накопили огромное число исторических бумаг с неповторимыми особенностями такого рода.

Технологии, используемые в DjVu, можно разделить на две основные группы: сегментация и сжатие. Основная идея DjVu состоит в том, чтобы отделить текст от фона и изображения, а также использовать различные методы для сжатия полученных компонент. Исходное изображение разделяется на три составляющие:

1) фоновый слой содержит иллюстрации и текстуру страницы. Разрешение слоя по умолчанию понижается для экономии места до 100 точек на дюйм. Фон кодируется, используя вейвлетный алгоритм сжатия IW44;

2) маска содержит изображение текста и высоко контрастные компоненты картинок, используется как трафарет (указывает, является ли соответствующий пиксел в изображении основным или фоновым). Сохраняется с разрешением 300 точек на дюйм и сжимается с помощью алгоритма сжатия чёрно-белых изображений JB2 или DjVuBitonal;

3) передний план содержит цвет текста и рисунков (цветовую информацию о маске, как правило, большие участки смежных пикселей с почти одинаковыми цветами), разрешение обычно понижается до 25 точек на дюйм, так как символы текста имеют одинаковые или близкие друг к другу цвета. Кодируется, используя тот же алгоритм IW44.

Основная идея JB2 – найти отдельные фигуры на странице (например, символы), а также использовать алгоритм кластеризации формы, чтобы найти сходство между ними. Формы, которые являются репрезентативными для каждого кластера, кодируются как отдельные изображения методом, аналогичным JBIG1 (стандарт сжатия изображений без потерь). Слой-маска перед упаковкой JB2 претерпевает оптимизацию с целью освобождения от "случайных" штрихов и "шума сканера". Пиксель декодированного изображения строится следующим образом: если соответствующий пиксель в изображении маски равен 0, то пиксель имеет значения соответствующего пикселю фонового изображения, если маска пикселя равна 1, то цвет пикселя берется из цвета фонового слоя.

Для кодирования фона и переднего плана используется прогрессивный вейвлетный алгоритм сжатия IW44 или DjVuPhoto. Формат IW44 близок к новому стандарту JPEG2000, но менее требователен к системным ресурсам при декомпрессии изображения во время просмотра: декодер занимает меньше памяти и оптимизирован для работы в 3 раза быстрее, чем быстрый режим JPEG-2000. IW44 предлагает множество преимуществ перед существующими методами сжатия однотонных изображений.

В результате работы был разработан кодер и декодер алгоритмов сжатия изображений с потерями: из PGM (простой формат хранения полутоновых изображений portable pixmap) в JPEG и DjVu. Сравнение алгоритмов проводилось на тестовом наборе черно-белых изображений. Результаты показали, что DjVu показывает более успешные результаты сжатия, выходной файл DjVu составляет 3–7% от оригинала, JPEG: 14–217% (превышение 100% означает, что исходное изображение имеет размер меньше результирующего).

При оценке применимости JPEG важно помнить о целевой ориентации формата. Изначально он создавался для сжатия изображений полутонового типа, т.е. состоящих из большого объема плавных переходов одного цвета в другой. Для изображений «текст с иллюстрациями» характерна другая особенность – наличие заметного количества резких переходов «цвет-цвет» на границе отдельных литер текста и общего фона страницы.

DjVu показывает лучшие результаты сжатия изображений «текст с иллюстрациями» и является более приоритетным форматом при выборе формата для хранения отсканированных изображений, но проблемы, возникающие при работе с форматом DjVu, являются обратной стороной его преимуществ:

- ресурсоемкость процесса;
- качество разделения изображения на отдельные слои.

Вторая проблема вытекает из того, что одним из ключевых критериев для определения принадлежности данных к тому или иному слою принимается вид перехода между соседствующими цветами. Это могут быть как резкие переходы между литерами текста и фоном страницы, между цветами, которыми залиты отдельные участки плаката/карты, между линиями диаграмм и окружающим фоном, так и плавные переходы, характерные для фотографии, рисунка, фоновой части страницы.

Существует множество способов разделения исходного изображения на три слоя: передний план, задний план и черно-белая маска. Одни алгоритмы предлагают следующую по-

следовательность: сегментация документов на визуально различимые регионы, классификация этих регионов в тексте чертежей, изображений или полутонов. Этот подход хорошо работает для двухуровневых или цветных документов с равномерным фоном, где образы четко отделены от текста. Другие алгоритмы, следуя схеме снизу вверх, пытаются найти текст, на основе локальных особенностей. Как правило, они используют отличительные особенности текста, которые выделяют его из фона. Например, текст на переднем плане идентифицируется по определенной регулярности и ориентации, и его пространственное единство (символы из одной строки имеют аналогичную высоту и ориентацию).

Сегментация делит изображение на составные части и объекты. Степень детализации этого деления зависит от решаемой задачи. Сегментация сложных изображений является весьма нетривиальной задачей обработки изображений.

На ранней стадии DjVu сегментация была заложена в идее цветной кластеризации, которая пришла из компьютерного зрения. Сначала в основу сегментации входил двухцветный алгоритм кластеризации, он не рассматривал задачу как "сегментация" или "поиск" текста, напротив применялся гораздо более общий алгоритм классификации переднего плана / фона. Изображение разбивалось на квадратные блоки пикселей. Алгоритм кластеризации k-means находил два доминирующих цвета в каждом блоке. Далее каждый пиксель назначался к переднему плану, если его цвет ближе к прототипу кластера переднего плана, чем прототипу кластера фона. Несмотря на свою простоту, этот алгоритм находил текст (как и многие другие объекты) в сложных цветных изображениях с очень хорошей точностью. Однако могли возникать проблемы при определении принадлежности к переднему или заднему плану у неравномерно отсканированных изображений, а метод DjVu должен был обрабатывать любой тип сканируемого документа.

Сегментация опирается на следующие стратегии разложения:

- 1) извлечение компонент: определение компонент связности или групп пикселей, которые должны принадлежать к фону или переднему плану;
- 2) фильтрация: принятие решения для каждого компонента, как предпочтительней его закодировать, в качестве переднего плана или фона. Вместо того, чтобы выполнять полное сжатие, необходимо полагаться на оценку стоимости бита, полученную с помощью простых измерений по компоненте и ее окрестности.

Сейчас MDL (minimum description length) принцип управляет сегментацией в формате DjVu. Каждое принятое решение сводит к минимуму общую стоимость кодирования. В качестве простейшей параметрической модели для разделения слоев в DjVu используется двумерная модель Маркова. В шаге фильтрации конкурируют две стратегии, связанные с различными схемами кодирования. Предпочтительной схемой кодирования является та, которая дает низкую общую стоимость кодирования. MDL принцип используется, чтобы сделать только одно решение для каждого компонента, что позволяет избежать трудоемкой минимизации комплекса целевой функции.

Компонент классифицируется как передний план, если

$$C_{fg}^{col} + C_{bg|fg}^{col} + C_{mask}^{bin} - C_{bg}^{col} \leq 0$$

и в качестве фона в противном случае.

- 1) при кодировании маски стоимость бита C_{mask}^{bin} примерно пропорционально периметру компонента. Эта схема не предполагает потерь, так как в DjVu потеря при черно-белом кодировании едва заметны;

2) предполагается, что цвет переднего плана однородный, кодируемую часть C_{fg}^{col} , которая является значением этого цвета, можно считать незначительной до тех пор пока несоответствие C_{fg}^{col} составляет разницу между пикселями переднего плана и их средним значением.

3) Для фона, чтобы избежать вычислений над всем изображением, мы должны вычислить разницу в стоимости $C_{bg}^{col} - C_{bg|fg}^{col}$. Схема кодирования фона оптимизирована для однотонных изображений и обычно требует больше битов для кодирования резких переходов.

Точность сегментации во многом определяет успех сжатия конечного изображения. По этой причине повышенное внимание должно быть уделено надежности первичной сегментации.

Как правило, алгоритмы сегментации монохромных изображений основаны на одном из двух базовых свойств яркости изображения: разрывности и однородности. В первом случае подход состоит в разбиении изображения на части исходя из резких перепадов значений яркости, которые происходят, например, на границах объектов. Вторая группа методов осуществляет разделение изображений на области, однородные в смысле определенных, заранее заданных критериев.

В рамках работы были рассмотрены альтернативные способы выделения компонент:

- методы выделения краев – задача решается путем обнаружения границ областей на основе разрыва яркости;
- методы пороговой обработки – совершаются пороговые преобразования, которые используют распределение определенных характеристик пикселей;
- методы сегментации на отдельные области, основанные на прямом поиске подходящих областей.

В большинстве методов выделения контуров и основанных на этих методах алгоритмов используются линейные операторы с последующей пороговой обработкой. Основная идея обнаружения перепадов базируется на поиске мест изображения, где яркость меняется быстро с помощью следующих двух критериев:

- найти места, где первая производная превосходит по модулю некоторый заранее заданный порог;
- найти места, где вторые производные яркости имеют пересечения нулевого уровня.

Задача выделения контуров требует использования операторов над соседними элементами, которые чувствительны к изменениям и подавляют области постоянных уровней яркости. Таким образом, формируется изображение признака, в котором те части изображения, где возникают изменения, становятся светлыми, в то время как остальные части остаются темными.

Математическое обоснование методов заключается в вычислении производных, представленных для цифровых изображений в виде дискретных приближений градиента.

Градиентом двумерной функции $f(x, y)$ называется вектор $\nabla f = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial f}{\partial x} \\ \frac{\partial f}{\partial y} \end{bmatrix}$.

Модуль вектора градиента равен $\nabla f = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}$.

Основное свойство вектора градиента заключается в том, что он указывает в сторону максимального роста изменения функции f в точке (x, y) . Угол наклона этого вектора равен $\alpha(x, y) = \arctg(G_y/G_x)$.

В качестве градиентных методов выделяют операторы, представляющие собой матричные маски:

- детектор Собела;
- детектор Превитта;
- детектор Робертса;

Производные аппроксимируются разностями значений пикселей в малой окрестности изображения. На рис. 1, а показана окрестность размерами 3×3 , где \mathbf{z} – значения пикселей. Приближение частной производной в направлении x (вертикальном) по отношению к центральной точке окрестности (т.е. \mathbf{z}_5) определяется разностной формулой $G_x = (\mathbf{z}_7 + \mathbf{z}_8 + \mathbf{z}_9) - (\mathbf{z}_1 + \mathbf{z}_2 + \mathbf{z}_3)$. Аналогично, частная производная по направлению y приближается разностным выражением $G_y = (\mathbf{z}_3 + 2\mathbf{z}_6 + \mathbf{z}_9) - (\mathbf{z}_1 + 2\mathbf{z}_4 + \mathbf{z}_7)$. Обе эти величины вычисляются во всех точках изображения с двумя масками, приведенными на рис. 1, б и в. После этого приближение градиентного изображения получается сложением абсолютных величин двух фильтрованных изображений.

Детектор Превитта обнаруживает края с помощью приближений Превитта первых производных, заданных на рис. 2. Детектор краев Робертса обнаруживает края с помощью приближений Робертса первых производных, заданных на рис. 3.

а)		
z_1	z_2	z_3
z_4	z_5	z_6
z_7	z_8	z_9

б)		
-1	-2	-1
0	0	0
1	2	1

в)		
-1	0	1
-2	0	2
-1	0	1

Рис. 1. Окрестность (маска) (а), маски Собела (б и в)

-1	-1	-1
0	0	0
1	1	1
$G_x = (z_7 + z_8 + z_9) - (z_1 + z_2 + z_3)$		

-1	0	1
-1	0	1
-1	0	1
$G_y = (z_3 + 2z_6 + z_9) - (z_1 + 2z_4 + z_7)$		

Рис. 2. Маски Превитта и формулы приближения первых производных

-1	-0
0	1
$G_x = z_9 - z_5$	

0	-1
1	0
$G_y = z_8 - z_6$	

Рис. 3. Маски Робертса и формулы приближения первых производных

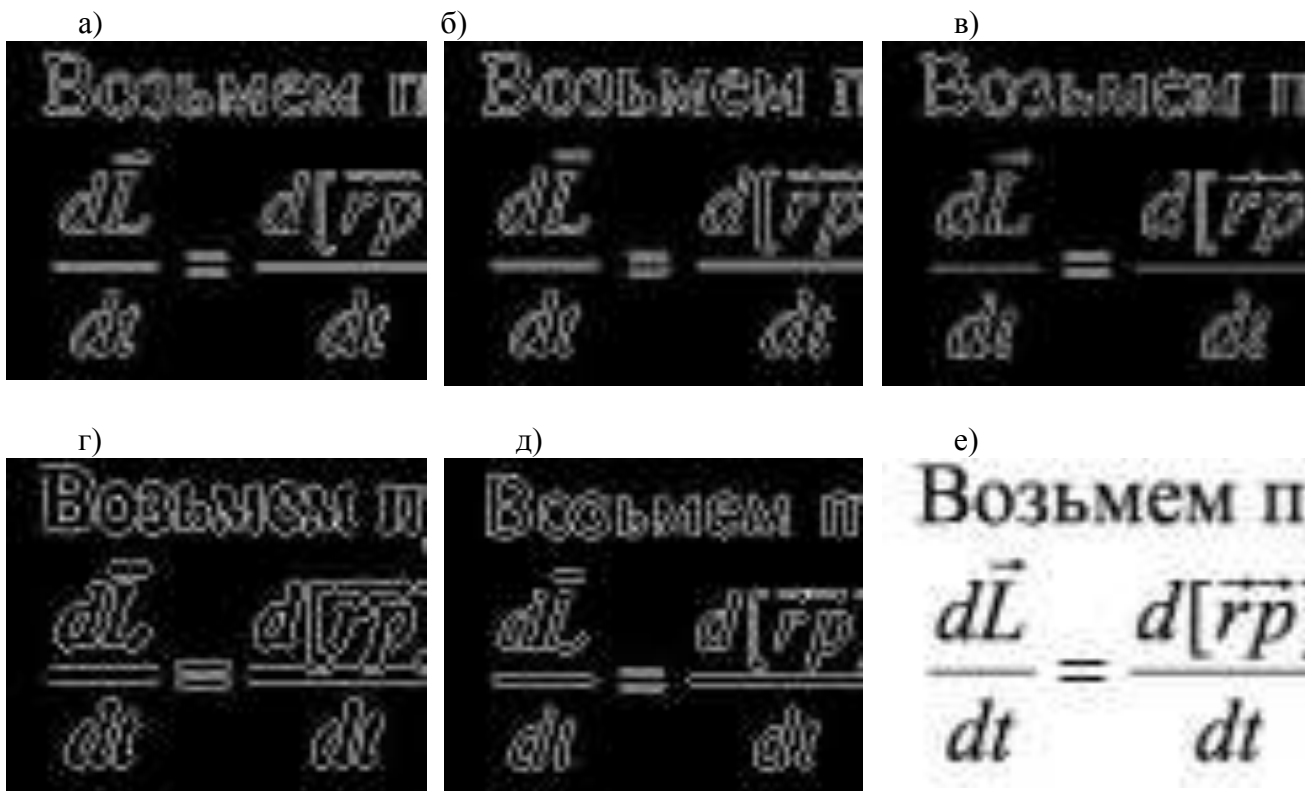


Рис. 5. Детектор краев Собела (а), детектор краев Превитта (б), детектор краев Робертса (в), детектор Лапласиан гауссиана (г), детектор Канны (д); исходное изображение (е)

В качестве методов, основанных на производной второго порядка, выделяют оператор Лапласиана. Данный оператор обнаруживает границы в местах смены знака производной функции яркости. Использование модуля лапласиана приводит к удвоению контуров, что дает нежелательный результат (рис. 5, з). Часто используют лапласиан в сочетании со сглаживанием, например по методу Гаусса, с целью уменьшения влияния шума. Такое сочетание называют детектором Лапласиан гауссиана. Детектор Лапласиан гауссиана обнаруживает края, выполняя поиск пересечений нулевого уровня после фильтрации $f(x, y)$ гауссианом.

В рассмотренных методах имеется возможность указать, к каким именно перепадам чувствительна данная оценка: к горизонтальным, вертикальным или перепадам обоих типов. Так как исследования связаны с изображениями с текстовой информацией, необходимо учитывать оба типа перепадов (текст содержит горизонтальные и вертикальные прямые).

Сравнение проводилось на шести изображениях с текстом, имеющих в своем составе формулы или рисунки. На рис. 5 показаны результаты сравнения обнаружения краев на примере одного изображения.

В результате сегментации нам необходимо получить замкнутые области для последующего выделения алфавита и обработки алгоритмом сжатия JВ2. Градиентные методы с простой пороговой обработкой уступают по качеству выделения контуров методу Канни, который обнаруживает края, выполняя поиск локальных максимумов градиента $f(x, y)$. Градиент вычисляется от гауссиана.

Детектор Канни можно описать следующим образом:

1) изображение сглаживается гауссовым фильтром с заданным стандартным отклонением σ для сохранения шума;

2) в каждой точке изображения вычисляется градиент $g(x, y) = [G_x^2 + G_y^2]^{1/2}$ и направление края (направление градиента) $\alpha(x, y) = \text{arctg}(G_y/G_x)$. Направления градиента используется для уточнения контуров. Точки перепада определяются как точки локального максимума градиента;

3) точки перепада, определенные в п.2, вызывают рост гребней на изображении модуля градиента. Алгоритм отслеживает верхнюю часть этих гребней и присваивает нулевое значение точкам, которые не лежат на гребне. В результате на выходе строится тонкая линия. Затем пиксели гребня подвергаются пороговой обработке с использованием двух порогов $T1$ и $T2$, причем $T1 < T2$. Пиксели гребня, величина которых больше $T2$, называются «сильными», а пиксели, значения которых попадают в интервал $[T1, T2]$, называются «слабыми».

4) алгоритм совершает соединение, добавляя к сильным пикселям слабые, которые δ -связаны с сильными.

В идеале рассмотренные методы должны обнаруживать только пиксели, принадлежащие краям и перепадам яркости. Однако на практике выделенные пиксели редко относятся только к этой категории в силу многих причин: воздействия шума, разрыва краев из-за неравномерного освещения и других факторов, которые вносят ложные перепады яркости в изображения. Также методы не удовлетворяют требованиям непрерывности и минимальной толщины контурных линий, поэтому за алгоритмом обнаружения краев обычно следует процедура компоновки выделенных пикселей краев в настоящие, осмысленные линии и краевые сегменты.

Методы пороговой обработки занимают центральное место в прикладных задачах сегментации изображений, благодаря интуитивно понятным свойствам и простоте реализации. Однако они не дают желаемого результата, если фон изображения сильно неоднороден по яркости. В таких случаях необходимо применять предварительную обработку для компенсации перепадов фоновой яркости, после чего можно совершать глобальное пороговое преобразование.

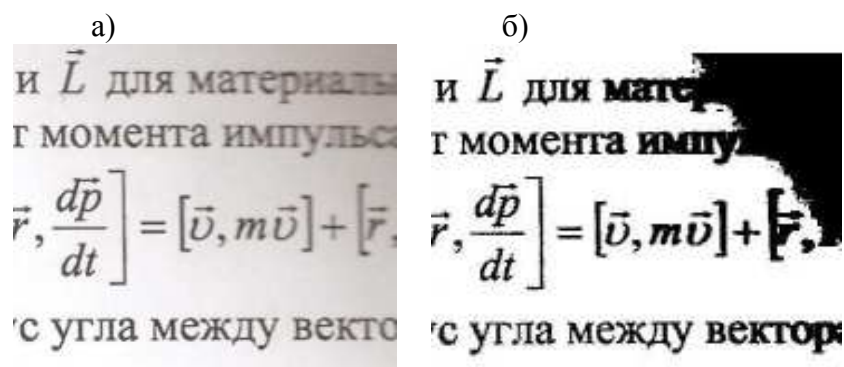


Рис. 6. Исходное изображение (а) и результат пороговой обработки (б)

Сегментация на отдельные области делит изображение таким образом, чтобы каждый пиксел принадлежал какому-либо сегменту. Существует большое число алгоритмов, конечной целью которых является разбиение изображения на области, самый распространенный метод – преобразование водораздела (рис. 7). Метод водораздела заключается в поиске линий, разделяющих локальные минимумы и максимумы значений яркостей элементов изображения. Данный вид сегментации является не пригодным для изображений с текстом, так как основной задачей является отделение переднего плана от заднего.

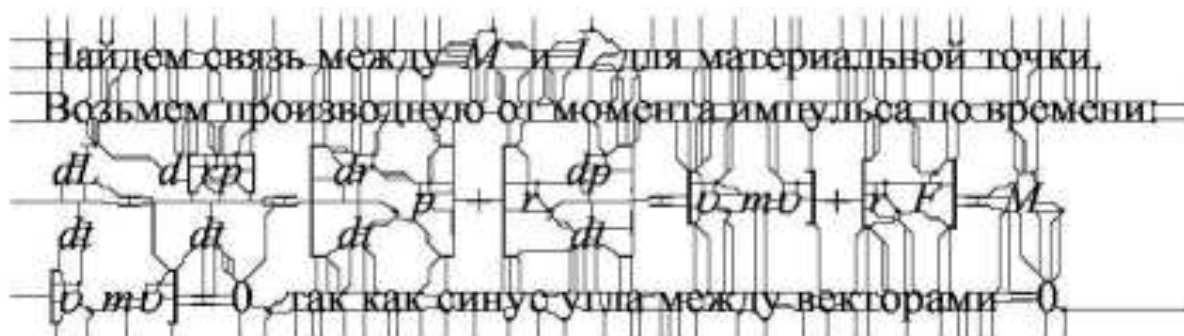


Рис. 7. Результат сегментации преобразованием водораздела

Конечный результат анализа изображений во многом определяется качеством сегментации, а степень детализации выделяемых характеристик зависит от конкретной задачи. Поэтому не существует отдельного метода или алгоритма, подходящего для решения всех типов задач сегментации, каждый из методов имеет свои достоинства и недостатки. В большинстве случаев выбирается один или несколько алгоритмов и модифицируются под специфические условия задачи.

В рамках проведенного сравнения лучшие результаты были получены после применения к изображению детектора Канни, пороговая сегментация и сегментация преобразованием водораздела не подходят для решения задачи выделения компонент из изображения с текстовой информацией.

С DjVu цветная страница отсканированного журнала в 300dpi обычно занимает от 40KB до 80KB, то есть примерно от 5 до 10 раз меньше, чем JPEG для подобного уровня четкости. Преобразование электронных документов в DjVu предлагает существенные преимущества; технология основывается на классификации каждого пикселя: на передний план (текст, графика) или на фон (картинки, текстуры бумаги и цвет), тем самым создавая сегментационные слои, которые сжимаются отдельно.

Библиографический список

1. High quality document image compression with djvu / L. Bottou [et al.] // Journal of Electronic Imaging. 1998. № 7(3). P. 410–428.
2. **Haffner, P.** A general segmentation scheme for DjVu document compression / P. Haffner, L. Vincent // International Symposium on Mathematical Morphology, 2002.
3. **Гонсалес, Р.** Цифровая обработка изображений в среде MATLAB / Р. Гонсалес, Р. Видс, С. Эддинс. – М.: Техносфера, 2006. – 616 с.
4. **Яне, Б.** Цифровая обработка изображений / Б. Яне. – М.: Техносфера, 2007. – 584 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

E. Bogacheva, D. Dmitriev, O. Korelin

**FEATURES OF DjVu FORMAT COMPRESSION FOR NETWORK TRAFIFIC
SAVING AND RESEARCH OF IMAGES SEGMENTATION METHODS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Compare formats of image compression JPEG and DjVu with text information; Examine the algorithm and features of DjVu compression format in detail, analyze limitations of algorithm; review segmentation methods for the problem of separation foreground and background of image with text information.

Design/methodology/approach: JPEG and DjVu formats coders were developed as a result of research, segmentation methods were realized. Comparison was realized for black-white tests images with text and graphics information (pictures and formulas).

Findings: DjVu shows best results of compression of images "text with illustrations" and is the more prioritized format when selecting of format for scanned images storage than JPEG. The quality of separation to particular layers is the one of complexity of DjVu format. Alternative methods of segmentation were examined: contour, threshold and segmentation to particular parts. Best results were obtained after applying of Kanny's filter, threshold segmentation and watershed transform segmentation are not suitable for solving the problem of allocation of component images with text information.

Key words: image compression format, DjVu, JPEG, image segmentation.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК621.9

Ю.Г. Кабалдин, А.М. Кузьмишина

АТОМНЫЙ ПОДХОД К ПРОЦЕССАМ ДЕФОРМАЦИИ И РАЗРУШЕНИЯ СРЕЗАЕМОГО СЛОЯ ПРИ РЕЗАНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложен атомный подход к процессам деформации и разрушения стружки при резании. Установлена связь сопротивления сдвигу вида стружки с параметрами, характеризующими энергетическое состояние кристаллической решетки, ее ЭДУ, теплоту плавления. Приведены результаты квантово-механических расчетов, показывающих роль примесей в процессах деформации и формирования вида стружки, а также изменение дислокационной структуры при сдвиге элемента стружки. Показано, что постоянство сдвигу при изменении режимов резания связано с достижением в кристаллической решетке в плоскости сдвига предельной плотности дислокаций. Указаны пути повышения эффективности процесса резания.

Ключевые слова: атомная структура металлов, дислокации, резание, деформация, сопротивление сдвигу, примеси, квантово-механические расчеты.

Проблема повышения эффективности процессов механообработки обуславливает необходимость углубленных исследований физических закономерностей, сопровождающих отделение срезаемого слоя от заготовки. При резании процесс пластической деформации реализуется по схеме сжатия и простого сдвига [1]. При этом многочисленными исследованиями показано, что на верхней границе зоны стружкообразования и в зоне вторичной деформации (рис. 1) отдельные зерна согласовано формоизменяются и выстраиваются в цепочку в плоскости сдвига, образуя так называемую текстуру.

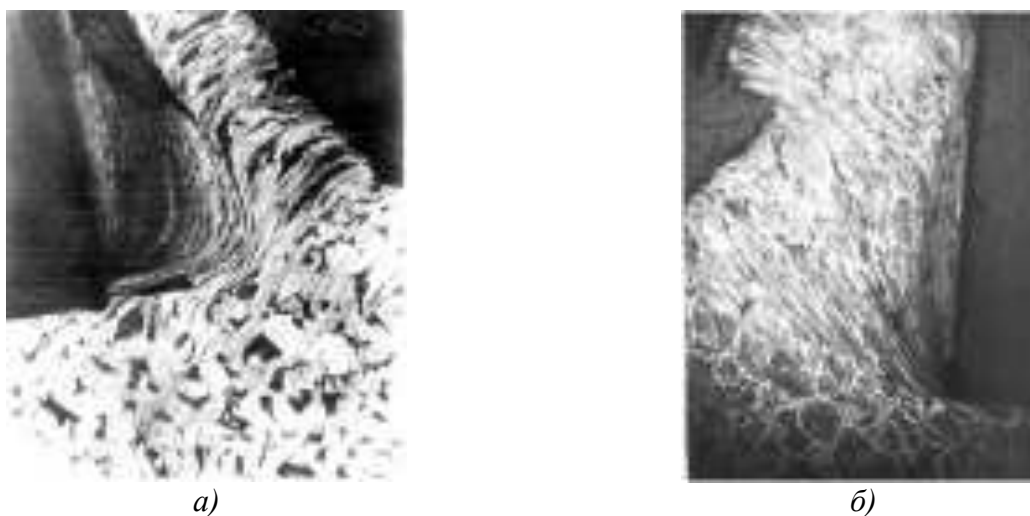


Рис. 1. Локализация деформации и текстура в корне стружки:

a - в зоне стружкообразования при резании стали 10 (видны зерна цементита, вытянутые вдоль плоскости сдвига) при $V = 30$ м/мин; *б* - при $V = 250$ м/мин (х 60)

Экспериментально установлено, что $\tau_{сдв}$ сопротивление пластическому деформированию в условной плоскости сдвига при обработке сталей оказывается постоянным, что связывается с деформационным насыщением, т.е. достижением предельного уровня деформации (упрочнения).

С ростом скорости при обработке сталей происходит последовательное изменение вида стружки – от элементной к сливной, а далее к сегментной (суставчатой). Следует отметить, что сегментная стружка образуется при обработке титановых и жаропрочных сплавов уже при низких скоростях резания. Причем при обработке титановых сплавов сегментная стружка может формироваться в широком диапазоне скоростей резания.

Одним из первых механизмов образования сегментной стружки при высоких скоростях резания изучал М.И. Клушин [1], который связал это с адиабатическими условиями деформаций, т.е. температурным разупрочнением. Иначе говоря, согласно [1], при высоких скоростях резания условия деформирования в зоне стружкообразования таковы, что теплота от деформации в зоне локализованного сдвига не успевает уйти, т.е. диффузионные процессы не могут реализоваться и $\tau_{сдв}$ снижается. Предполагают, что при резании [1] титанового сплава более низкие значения $\tau_{сдв}$ по сравнению с $\tau_{сдв}$ при резании сталей обусловлено именно этим обстоятельством. В работе [5] такой механизм формирования элемента стружки в зоне стружкообразования назван даже «разрушающим термопластическим сдвигом».

Возможность реализации адиабатического сдвига в работах [2-7] при резании также связывается, прежде всего, с низкими значениями теплопроводности и температуропроводности.

Однако экспериментальные данные указывают на постоянство сопротивления сдвигу в широком диапазоне скоростей резания, а низкие значения $\tau_{сдв}$ при обработке титановых сплавов, как показывают наши исследования, связаны с их низкой ЭДУ и охрупчиванием границ зерен примесями [9].

Следует заметить, что при обработке жаропрочных сплавов [2] $\tau_{сдв}$ оказывается высоким. При обработке закаленных сталей скорости резания, при которых происходит переход сливной стружки к сегментной, снижаются. Кроме того, сегментная стружка образуется и при резании алюминиевых сплавов, а также чистых материалов, т.е. материалов, не подвергающихся сильному деформационному упрочнению. Известно, что температуропроводность алюминиевых сплавов является высокой, а после термообработки сталей она не изменяется.

В работе [2] показано, что $f_{стр}$ – частота сегментного стружкообразования, толщина элемента стружки (сегмента) зависит от фрикционных свойств инструментального материала, в частности, при резании инструментом с покрытием наблюдалось увеличение $f_{стр}$ частоты стружкообразования и толщины стружки. Данные исследования показывают также, что контактные процессы в зоне вторичных деформаций стружки оказывают большое влияние на напряженно-деформированное состояние в зоне стружкообразования, угол сдвига, а также и на вид стружки.

Современный уровень достижений области физики твердого тела [9-11], физики металлов, квантовой механики позволяет рассмотреть процессы деформации и разрушения срезаемого слоя на атомном уровне, в частности, путем моделированием прочности межатомной связи в различных материалах, определяющих сопротивление сдвигу элемента стружки при резании.

Целью работы явилось исследование механизмов пластической деформации на атомном уровне и определение связи параметров, характеризующих сопротивление сдвигу при резании, с параметрами, определяющими механизмы деформации различных типов кристаллической решетки.

Традиционное рассмотрение пластической деформации [9, 10] предполагает начало пластического течения при напряжении τ_r текучести и учитывает только деформационное упрочнение. Это ошибочное описание является следствием того, что не учитываются в теории градиентов напряжения пластического течения. Неоднородность напряженного состояния в деформируемом кристалле обуславливает релаксационный характер пластического те-

чения. Гидростатические давления способствуют релаксации упругих напряжений на границах зерен. В соответствие с [9, 10], в случае высокой энергии дефекта упаковки (ЭДУ) материала зерно при деформировании поворачивается как целое. В основе этого явления лежит относительно высокая подвижность зернограницных дислокаций (ЗГД) и возникновения в нагруженном поликристалле моментных напряжений. Это эффект зависит от обрабатываемого материала и состояния границ зерен. Поворотные М моменты, обуславливающие поворот зерен (реализацию ротационной моды деформации), способствуют формированию цепочки зерен, вытянутых вдоль верхней границы стружкообразования с образованием текстуры (рис. 2), т.е. согласованный поворот зерен без нарушения сплошности при этом сохраняется непрерывность действия напряжений и деформации. В ряде работ показано, что процессы, сдерживающие сдвиговую деформацию зерен, сдерживают и скольжение по границам зерен. В результате сдвиг будет происходить не в единственной плоскости скольжения, а путем сдвига большого числа атомных плоскостей скольжения.

Образование текстуры свидетельствует о том, что в условиях специфического напряженного состояния в зоне стружкообразования реализуется эффективная релаксация концентраторов напряжений в стыках поворачивающихся зерен. В результате достигаются высокие степени деформации ($\varepsilon \sim 2 \dots 10$ [6]) и значительное внутриверенное упрочнение. Следовательно, в таких условиях работа источников деформации становится скорелированной и самоорганизованной, что обуславливает самоустановление [8] угла скольжения (сдвига) β и минимум затрачиваемой энергии.

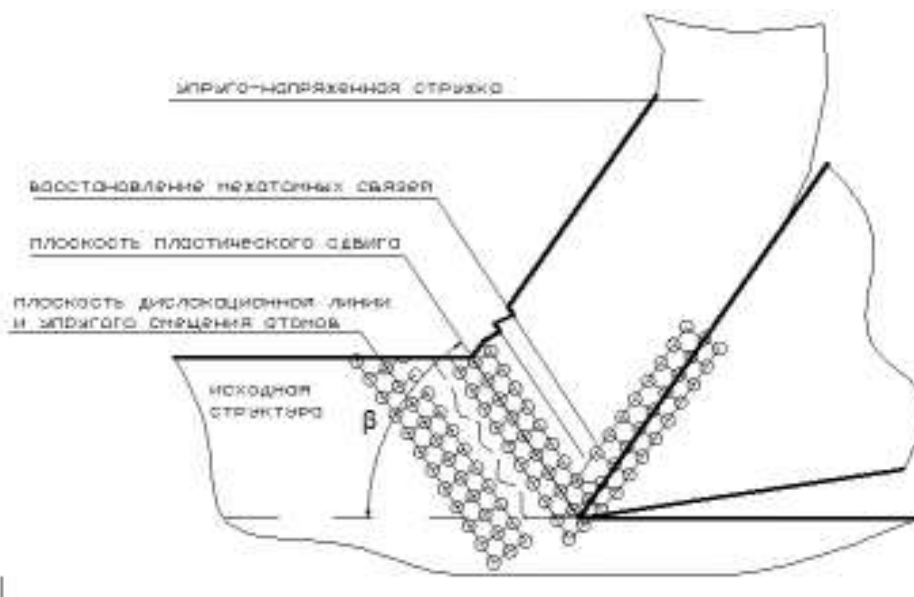


Рис. 2. Схема атомной структуры обрабатываемого материала на нижней и верхней границах зоны стружкообразования, а также в зоне вторичной деформации прирезцового слоя стружки (пластического контакта) и передней поверхности инструмента

На рис. 2 приведена упрощенная схема процесса резания, где условно показаны межатомные связи как на нижней границе сдвига стружки, так и на верхней, т.е. на плоскости сдвига. Следует отметить, что пластическая деформация, в противоположность упругой, столь значительна, что вызывает разрыв межатомных связей, которые до деформации были соседями. Пластическая деформация происходит в том случае, когда к разрыву межатомных связей приводит возрастание напряжений во всем деформированном объеме до величины, равной теоретической прочности, т.е. порядка $0,1B$ (B -модуль всестороннего сжатия). Однако в большинстве реальных материалов пластическая деформация имеет место при уровне напряжений более низком, чем теоретическая прочность, вследствие наличия в материалах дислокаций.

Наши исследования показывают, что на сопротивление пластической деформации срезаемого слоя большое влияние оказывает тип кристаллической решетки обрабатываемого материала, его ЭДУ, наличие примесей на границах зерен и способность материала релаксировать на границах зерен. Влияние этих параметров проявляется через виды диссипативных структур, формирующихся в процессе деформации срезаемого слоя и определяющих ее локализацию. В этой связи вид стружки будет существенно определяться указанными факторами.

На рис. 3, *а* представлена схема межатомной связи в кристаллической решетке с учетом приложения внешней силы F , где a параметр решетки. Существование дислокаций в кристалле приводит к появлению областей, где энергия, необходимая для разрыва группы атомных связей, получается за счет восстановления другой группы связей.

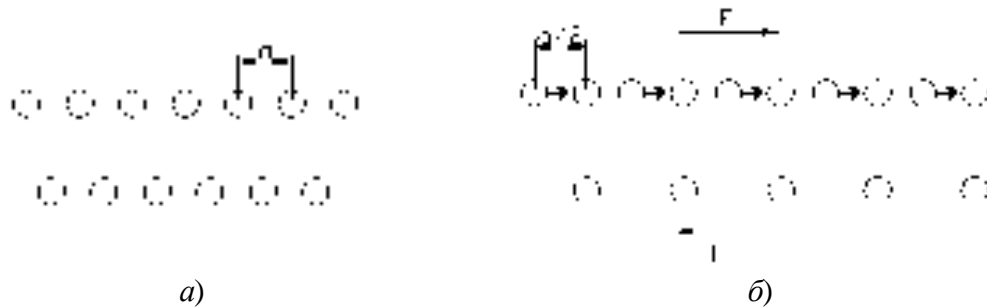


Рис. 3. Исходная атомная структура металла с межатомным расстоянием a (*а*) и смещение атомов при приложении внешней силы F (*б*)

На рис. 3, *б* показано, что при упругой деформации под воздействием внешней силы F верхний атомный ряд относительно нижнего атомного ряда смещается на величину половины межатомного расстояния a .

Пластическая деформация может возникнуть, если через кристалл пройдут не только имеющиеся в нем дислокации (исходная структура уже имеет определенное количество дислокаций), но и вновь образованные. Напряжения, необходимые для начала пластической деформации (в отсутствие дислокаций), т.е. путем разрыва межатомных связей, составляет около 10% от модуля сдвига G . Например, для железа межатомное расстояние равно $2,48 \text{ \AA}$. Энергия дислокации на это расстояние составит примерно 6 эВ, а прочность межатомной связи Fe-Fe равна 4,290 эВ. Иначе говоря, энергия дислокации превышает прочность межатомных связей Fe-Fe. Следовательно, движение дислокаций будет сопровождаться деформацией кристалла, т.е. разрывом связей. Поэтому для разрыва большого числа атомных связей нужен какой-то механизм непрерывного генерирования дислокаций, например, источник Франка-Рида, действие которого связано с образованием дислокационных петель диаметром в несколько межатомных расстояний. В кристалле энергия деформации составляет порядка $0,1Va$ на одно межатомное расстояние вдоль линии дислокации. Плоскость скольжения для дислокации определяется как плоскость, в которой лежат и вектор Бюргера самой дислокации, и линия дислокации.

При движении краевой дислокации по плоскости скольжения от одного узла решетки к другому, атомы ядра дислокации совершают перемещения. В результате дислокация перемещается на одно межатомное расстояние a . Винтовая дислокация может перемещаться из одной плоскости в другую. Важнейшая особенность всех видов дислокаций состоит в том, что сильные искажения кристаллической решетки сосредоточены в непосредственной близости дислокационной линии и ядре дислокации, имеющем свою атомную структуру.

Деформация при росте плотности ρ дислокаций определяется [15] $\epsilon \sim b\rho\bar{l}$, где \bar{l} длина пробега дислокаций. Иначе говоря, степень деформации зависит от ρ (плотности дислокаций) и \bar{l} (длины их пробега). Следовательно, для образования даже одной петли требуется энергия гораздо большая, чем энергия для разрыва межатомной связи. Рост темпера-

туры (термическая активация) в кристаллах с первичными связями не может быть источником этой энергии, а следовательно, оказывать влияние на сопротивление сдвигу $\tau_{сдв}$ при резании. Таким образом, она не зависит от температуры.

Дислокационные представления в резании металлов изложены в ряде работ. Современные методы исследования дислокационной структуры выполняют с использованием высоковольтной электронной микроскопии тонких фольг. На рис. 4 представлены микрофотографии дислокационной структуры с использованием микроскопии тонких фольг при резании стали 20 вблизи нижней и верхней границ зоны стружкообразования.

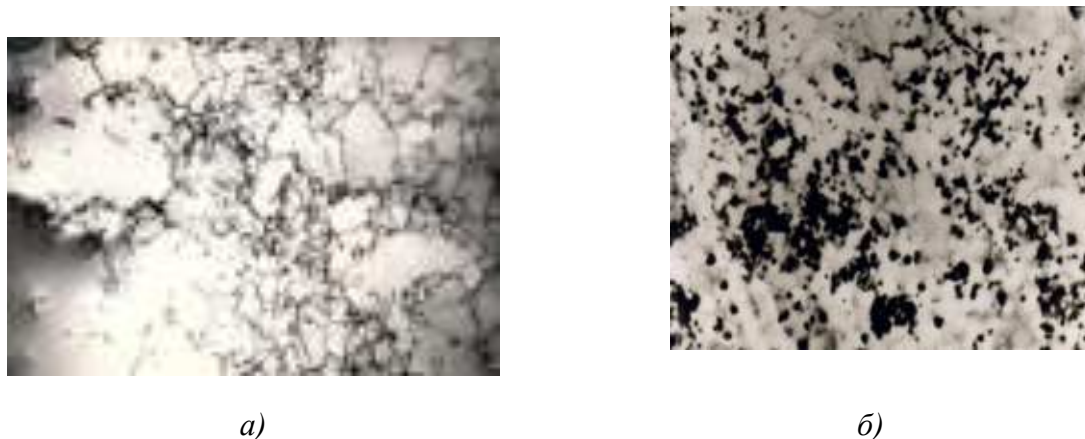


Рис. 4. Дислокационная структура стали 20 при резании:

a - на нижней границе (рис. 3); *б* - на верхней границе зоны стружкообразования (x15000)

На рис. 4, *a* видно хаотическое расположение дислокаций с плотностью $\rho = 2 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$, на рис. 4, *б* - фрагментированная дислокационная структура с плотностью $\rho = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$. Следовательно, в процессе деформации срезаемого слоя при резании происходит изменение вида дислокационной структуры и деформационное упрочнение, что сопровождается ростом плотности дислокаций и напряжений сдвигу.

Из теорий дислокаций можно записать, что при росте скорости резания, она связана с плотностью дислокаций зависимостью [15]

$$\dot{\epsilon} = \rho b \bar{v},$$

где b - вектор Бюргерса; ρ - плотность дислокаций; \bar{v} - скорость движения дислокаций.

Вектор Бюргерса указывает направление атомных плоскостей в кристалле, где возникает этот дефект. Поэтому вектор Бюргерса характеризует меру искаженности кристаллической решетки.

Исследователи отмечают слабое влияние скорости деформирования на $\tau_{сдв}$ при обработке легкоплавких металлов, например меди [1,6]. Это в значительной степени связано со способностью дислокаций к фрагментации и различием их скорости движения. В металлах с ГЦК решеткой (меди) \bar{v} дислокаций на 5...8 порядков выше, чем в металлах с ОЦК решеткой (сталей). При высоких скоростях деформации, близких к скорости деформации при резании, \bar{v} может достигать скорости звука.

Перед нижней границей зоны стружкообразования (рис. 2) обрабатываемый материал имеет как исходную (начальную) плотность дислокаций, так и электронную структуру. На нижней границе электронная структура обрабатываемого материала (рис.2) деформируется упруго (т.е. без разрыва межатомных связей). По мере деформации срезаемого слоя происходит разрыв межатомных связей и рост плотности дислокаций, т.е. обрабатываемый материал испытывает деформационное упрочнение. В работе указывается, что размер ячеистой структуры оказывается запрограммированным уже на пределе упругости. В этой связи обнаруживается и зависимость $\tau_{сдв}$ при резании от предела упругости.

В целом, склонность обрабатываемых материалов к деформационному упрочнению будет зависеть от их электронной и дислокационной структуры, ЭДУ, наличия примесей, скорости деформирования, температуры, типа кристаллической решетки и т.д., а также от скорости протекания процессов разупрочнения.

В углеродистых сталях основная примесь - это углерод, который, располагаясь на границах зерен, может способствовать их охрупчиванию. С ростом температуры диффузионная подвижность углерода возрастает, что облегчает проскальзывание зерен и изменяет форму стружки. Как уже отмечалось, дислокации не подтверждены термической активации, в результате степень деформации срезаемого слоя и силы резания снижаются

Степень деформационного упрочнения и $\tau_{сдв}$ при низких температурах в связи с ростом плотности дислокаций в зернах поликристалла зависят от их подвижности, которая определяется ЭДУ обрабатываемого материала, а также охрупчиванием границ зерен. Последнее будет определять и вид стружки, не сказываясь на $\tau_{сдв}$ при резании. Дело в том, что межзеренная деформация составляет не более 20% от внутривзеренной.

Установлено, чем выше ЭДУ металла, тем больше $\tau_{сдв}$ и степень деформационного упрочнения. Такая зависимость обусловлена влиянием ЭДУ на расщепление дислокаций и на их способность к фрагментации зерен. Чем выше ЭДУ, тем больше склонность дислокаций к расщеплению и фрагментации, что способствует повышению $\tau_{сдв}$. В металлах с ОЦК решеткой взаимодействие дислокаций с примесями (углеродом) очень сильное, а винтовые дислокации склонны к поперечному скольжению. Примеси, сегрегируя на субграницы дислокационной структуры, повышают их устойчивость и сопротивление скольжению дислокации. В результате $\tau_{сдв}$ при резании высокоуглеродистых сталей увеличивается (рис. 5). В этой связи низкие $\tau_{сдв}$ при резании титановых сплавов следует связать с наличием примесей (водорода и т.д.) на границах зерен и, прежде всего, с его низкой ЭДУ вследствие закрепления дислокаций примесями.

Сопротивление сдвигу $\tau_{сдв}$ зависит и от степени деформации ϵ . Это обусловлено тем, что металлы с низкой ЭДУ, по сравнению с металлами с высокой, имеют большую продолжительность в уровне упрочнения, достигаемом при деформации: чем ниже ЭДУ, тем позже наступает динамический возврат, тем при прочих равных условиях до более высоких значений может быть упрочнен металл или сплав при пластической деформации [14]. Поэтому при обработке низкоуглеродистых сталей наблюдаются наибольшие значения ϵ и наименьшие β углы сдвига [6]. С ростом скорости резания степень деформации срезаемого слоя снижается.

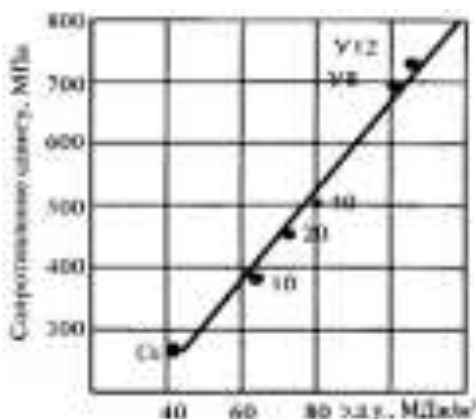


Рис. 5. Зависимость $\tau_{сдв}$ от ЭДУ материалов

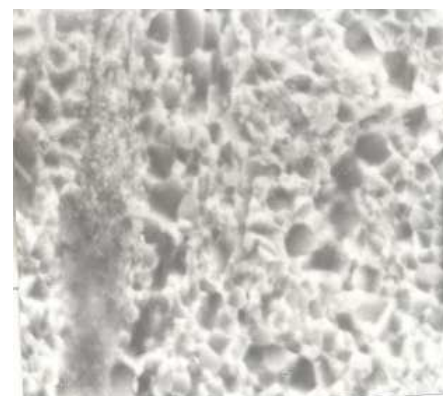


Рис. 6. Локализованный сдвиг в толще стружки (3000). Сталь 10

В работе [13] отмечается, что при высокой плотности дислокаций становится возможным возникновение нового типа субструктуры – полос скольжения, т.е. процесс пласти-

ческой деформации становится локализованным. На рис. 5 представлена зависимость $\tau_{сдв}$ от ЭДУ металлов.

Локализованные полосы скольжения экспериментально обнаруживаются в толще стружки (рис. 6).

Подобная эволюция дислокационной структуры от исходной к хаотической, далее к фрагментированной и последующее образование полос скольжения характерно для различных видов механических испытаний (при сжатии, растяжении, усталостных испытаниях и т.д.).

Показано [13], что за время действия нагрузки менее 10^{-3} с формируется дислокационный ансамбль, поведение которого при последующем нагружении уже нельзя прогнозировать лишь с учетом свойств, входящих в него индивидуальных дислокаций, так как он приобретает свойства солитона. Поэтому скопление дислокации с высокой плотностью ρ , перестроившихся в полосу скольжения (рис. 6), следует рассматривать как локализованный источник, т.е. солитон. В работе [13] даны решения эволюционных уравнений гидродинамического типа уединенной волны. Дополнительный анализ показал, что волновые решения, удовлетворяющие этим условиям, оказываются устойчивыми. Таким образом, следствием этих перестроек является локализованные пространственно-временные структуры (ЛПВС), которые имеют волновую природу. Скорость движения такого дислокационного образования оказывается высокой [13].

Ряд исследователей полагают [1, 6], что за время сдвига элемента стружки в деформированных объемах могут протекать разупрочняющие процессы, так как температура в зоне стружкообразования может превышать 300°C . Расчеты показывают, что времени t_d пребывания деформированных объемов в зоне вторичной деформации ($t_d = 10^{-3} \dots 10^{-5}$ с) достаточно для реализации разупрочняющих процессов за счет диффузии углерода, перехода его в жидкое состояние, затем происходит закалка и отпуск мартенсита. Образование аустенита резко интенсифицирует процессы диффузии углерода в железо. Причем они (структурные и фазовые превращения) могут протекать и в зоне первичной деформации материала при обработке жаропрочных сплавов на низких скоростях резания [2].

В первом приближении критериям оценки интенсивности протекания разупрочняющих процессов в зоне стружкообразования может служить фактор упрочнения как отношение $\tau_{сдв}/\tau_T$, где τ_T - предел текучести. Согласно [1], для титанового сплава $\tau_{сдв}/\tau_T \approx 1,26$, для сталей колеблется от 3,5 до 3,8, в закаленной стали (HRC 30...35) $\approx 1,07$, а жаропрочного сплава ЭИ 961-0,91 [3].

Как уже отмечалось, перестройка исходной дислокационной структуры из исходной в фрагментированную, совершается с запаздыванием ($\tau_p \sim 10^{-3}$). Время запаздывания τ_3 пластических деформаций будет определяться видом обрабатываемого материала и режимами резания. С ростом скорости резания, а следовательно, $\dot{\epsilon}$ скорости деформации перестройка дислокационной структуры будет существенно определяться диффузией точечных дефектов (вакансий) и реализуется путем переползания дислокаций [14]. В результате время запаздывания τ_3 будет возрастать. Поэтому отношение $\tau_{сдв}/\tau_T$ будет также характеризовать запаздывание пластических деформаций при резании вследствие протекания разупрочняющих процессов, а следовательно, и вид стружки при обработке углеродистых сталей.

Анализ показывает, что как $\tau_{сдв}$, так и q_F находятся в линейной зависимости от теплоты образования обрабатываемого материала. Теплота образования характеризует количество тепла, которое необходимо сообщить веществу, чтобы перевести его из кристаллического состояния в жидкое путем разрыва межатомных связей. Экспериментальные данные подтверждают высказанное положение. Подобно $\tau_{сдв}$, удельная q_F сила трения также является константой при варьировании условий резания [6].

Влияние охрупчивания границ зерен при сегрегации на них примесей, в частности углерода, в сталях на вид стружки изучалось путем моделирования на основе квантово-механических расчетов. Размер кластера обеспечивал необходимую точность воспроизведения

явления сегрегации и достаточное время расчетов. В качестве рассчитываемых характеристик были выбраны E_0 (общая энергия связи в кластере) и межатомные расстояния (табл. 1).

Таблица 1

Общая энергия, энергия на атом и межатомные расстояния в кластерах

Вид кластера	Число атомов	Энергия кластера, эВ	Энергия на один атом, эВ	Расстояние A между атомами	Энергия дислокации, эВ
атомы железа	30	-138,4	-4,61	1,56	6
железо-углерод	30	-142,2	-4,74	1,54	

Энергия связи кластера, взятая с обратным знаком, представляет собой энергию, которую нужно затратить на разрыв всех межатомных связей в кластер, т.е. разделить его на отдельные атомы. Энергия связи, приходящаяся на один атом, равна $E_a = E_0/n$, где n – число атомов в кластере. При этом расстояния между атомами должно стремиться к значениям, характерным для кристаллической решетки железа, определенной экспериментально. Железо с ОЦК решеткой и постоянной $a=2,87A$, расстояние между атомными слоями должно быть равно $a/2$. Таким образом, размер кластера составлял 30 атомов железа. При моделировании условий, при которых происходит сегрегация, полагали, что ширина граница между зернами равна постоянной решетке a .

Таким образом, рассматривалась кластерная модель из шести слоев с 30 атомами, где атомы железа в слоях замещены атомами углерода в несколько большем по размеру кластере, чем кластер только из Fe. Такая модель, безусловно, не учитывает все факторы, происходящие на границах зерен, в том числе и наличие здесь дислокаций. Однако она все же моделирует адсорбцию на свободную поверхность железа и сегрегацию углерода на межкристаллитные границы. В табл. 1 приведены результаты расчетов по оценке прочности межатомных связей и межатомного расстояния связей Fe-Fe и Fe-C в кластерах.

Из табл. 1 видно, что прочность связей межатомного взаимодействия Fe-C выше, чем у системы Fe-Fe, а длина связи в системе Fe-C также ниже по сравнению с длиной связи в системе Fe-Fe. Следовательно, границы зерен при наличии примесей припятствуют эстафетной передаче деформации из зерна в зерно. Деформация локализуется в микрообъемах, а сопротивление деформации возрастает. При этом атомы примеси закрепляют дислокации, повышая сопротивление пластическому течению по границам зерен, а следовательно, создают трудности поворота зерен. Таким образом, углерод уменьшает подвижность дислокаций и охрупчивает границы зерен в сталях, тем самым влияет на образование элементной стружки при низких скоростях резания.

С увеличением скорости, а следовательно, с ростом температуры, формируется сливная стружка. Этому способствуют диффузионные процессы на границах зерен, облегчающие поворот зерен и межзеренную деформацию. При дальнейшем росте скорости резания формирование элементной стружки связано с запаздыванием пластических деформаций. При обработке титановых сплавов и нержавеющей сталей и сплавов формирование элементной стружки обусловлено охрупчиванием границ зерен примесями, вид стружки с ростом скорости резания не изменяется.

Как отмечалось, при высоких скоростях резания происходит запаздывание пластических деформаций и деформированное состояние перестает соответствовать ее напряженному состоянию [5, 8]. Причем чем больше скорость резания, тем больше это несоответствие. Иначе говоря, с ростом скорости резания в зоне стружкообразования будут изменяться как напряженное состояние, так и деформированное. В зоне вторичной деформации стружки

разупрочняющие процессы будут протекать более активно, которые, во-первых, будут способствовать запаздыванию здесь пластических деформаций, торможению и уменьшению скорости движения стружки. Во-вторых, разупрочняющие процессы будут также снижать несущую способность стружки, длину контакта стружки с инструментом, а следовательно, изменять напряженное состояние в зоне стружкообразования. В результате угол сдвига β будет уменьшаться. Установлена линейная связь отношения C/a с углом сдвига, где C – длина контакта стружки с инструментом, a – толщина среза.

Поэтому с ростом скорости резания, а следовательно, температуры, механизм деформации и напряженное состояние в зоне стружкообразования изменяется. Локализация деформации в зоне стружкообразования при высоких скоростях резания в связи с увеличением температуры облегченно происходит в пограничных областях, что будет способствовать ускорению зернограничного проскальзывания и повороту зерен как целого. В результате размеры (длина и толщина) локализованного сдвига будут уменьшаться, а стружка будет состоять из элементов с менее деформированными зёрнами внутри, чем в области локализованного сдвига, что подтверждают измерения микротвердости шлифов стружки. На шлифах стружки установлено, что наибольшая микротвердость наблюдается во впадинах между элементами стружки, что свидетельствует об охрупчивании этих зон вследствие хемосорбции в ядро дислокаций (вышедшей полосы скольжения на свободную поверхность) кислорода воздуха и увеличением прочности связи Fe-O. Радиус дислокационной трубки в полосе скольжения равен примерно $r_d = a$ и он больше, чем атомный радиус кислорода $r_k = 0,30\text{Å}$. Это приводит, как показали квантово-механические расчеты, к формированию более прочных межатомных связей, чем между атомами железа, и к уменьшению длины связей между атомами железа и кислорода, следовательно, закреплению дислокаций и резкому уменьшению межзеренной деформации вследствие охрупчивания границ зерен кислородом. Обнаружено, что при обработке ряда титановых сплавов наблюдается даже самовозгорание стружки.

Таким образом, гипотеза [1] о механизме образования суставчатой стружки, связанная с адиабатическим нагревом, не подтверждается. Установленная зависимость $\tau_{сдв}$ от теплоты плавления и электронно-микроскопические исследования, показывающие высокую плотность дислокаций вблизи верхней границы стружкообразования (рис. 2), позволяют утверждать, что в плоскости сдвига кристаллическая решетка предельно искажена и испытывает фазовый переход с разрывом атомных связей и образованием жидкостно-аморфной фазы с последующим формированием мелкодисперсной структуры, обладающей высокой микротвердостью. Вследствие этого такая структура плохо травится и не выявляется на шлифах.

Это обстоятельство объясняет причины постоянства $\tau_{сдв}$ в широком диапазоне скоростей резания. Однако особенностью процессов деформации и разрушения срезаемого слоя при высоких скоростях резания является тот факт, что зона стружкообразования резко уменьшается и изменение вида дислокационной структуры (субструктуры) протекают более быстро. Но завершающий этап сдвига стружки, сопровождающийся локализацией деформации и образованием полос скольжения (рис. 6) с переходом в аморфное состояние вследствие высокой плотности дислокаций, а затем вновь в мелкозернистое кристаллическое, сохраняется.

Следовательно, причиной образования суставчатой стружки, как показывают наши исследования, являются разупрочняющие процессы типа динамического возврата, так как, во-первых, температура в зоне стружкообразования превосходит температуру динамического возврата, а интенсивность разупрочнения (отношения $\tau_{сдв} / \tau_{дТ}$), сопротивление сдвигу, а также скорость $V_{кр}$ (перехода сливной стружки к суставчатой) зависят от ЭДУ обрабатываемого материала. Во-вторых, время запаздывания пластических деформаций растёт.

Установлено, чем меньше ЭДУ, тем меньше $V_{кр}$. Титановые и жаропрочные сплавы, а также нержавеющие стали имеют низкие значения ЭДУ и соответственно низкие $V_{кр}$. Следовательно, степень деформационного упрочнения, а поэтому и $\tau_{сдв}$ (рис. 5), определяется ЭДУ обрабатываемых материалов. Многочисленными исследованиями установлено, что в аустенитных сталях с ростом температуры происходит увеличение ЭДУ, что приводит к

взаимодействию дислокаций с примесями и, как следствие, изменению прочностных и пластических свойств.

В соответствии с выдвинутой гипотезой, причиной снижения $V_{кр}$ при обработке закаленной стали, а также легированных сталей и сплавов является изменение при этом ЭДУ материала, а не температуропроводности. Следовательно, появляется возможность управлять формой (видом) стружки, что важно для повышения эффективности механообработки. При этом отметим, что основной путь управления производительностью процесса резания – это увеличение скорости резания. Применение режущего инструмента с покрытием позволяет значительно повысить скорость резания, уменьшить силы резания и повысить эффективность механообработки. Полученные зависимости $\tau_{сдв}$, а также контактных характеристик (q_F) от параметров атомной структуры материалов (ЭДУ, теплоты плавления) позволяют уже на стадии лабораторных испытаний прогнозировать тип стружки и другие характеристики их обрабатываемости при резании.

Проведенные исследования позволили предложить механизм отделения стружки от заготовки. Дело в том, что по мере увеличения степени пластической деформации плотность дислокаций возрастает (рис. 4, б) и число их пересечения увеличивается, вызывая быстрое размножение вакансий [15]. Затем вакансии сливаются и образуют поры, сначала субмикроскопические, а затем и крупные поры, переходящие в начальные микротрещины, вызывая вязкое разрушение. При обработке таких материалов, как титановые сплавы, высокоуглеродистые стали и т.д. стадия доразрушения происходит хрупко.

Кристаллическое строение металлов определяет анизотропию ряда свойств металлов в связи с различной плотностью упаковки атомов по плоскостям и направлением решетки и с различным расстоянием между плоскостями. Например, текстуры железа после пластической деформации устанавливаются в направлении $\{110\}$ и $\{011\}$. Образование текстуры повышает несущую способность стружки при обработке углеродистых сталей. При резании титановых сплавов текстуры, как правило, не наблюдается. Следовательно, как фактор упрочнения стружки, так $\tau_{сдв}$ при их обработке оказываются ниже, чем при обработке углеродистой стали.

В заключение следует отметить, что говоря о влиянии атомной структуры обрабатываемых материалов на процессы деформации и разрушение срезаемого слоя при механообработке, следует иметь в виду, что прочность межатомных связей определяет электронная структура элементов. В частности, на прочность межатомных связей в переходных металлах большое влияние оказывают d - и s -электроны. Прочные металлические связи устанавливаются за счет перекрытия валентных электронов d - и s -оболочек, в результате ядра атомов стягиваются. Таким образом, имеется связь, сопротивление $\tau_{сдв}$ сдвигу, коэффициента трения и удельной q_F силы трения с количеством d -электронов в металлах.

Библиографический список

1. **Клушин, М.И.** О физических основах сверхскоростного резания // Труды ГПИ, 1961. Т. XVII. Вып. 4. С. 15–22.
2. **Бобров, В.Ф.** Особенности образования суставчатой и элементной стружек при высокой скорости резания / В.Ф. Бобров, А.И. Сидельников // Вестник машиностроения. 1976. №7. С. 61–66.
3. **Филимонов, Л.Н.** Особенности стружкообразования в условиях локального термопластического сдвига при высокоскоростном резании / Л.Н. Филимонов, Л.Н. Петрашина // Вестник машиностроения. 1993. № 5–6. С. 23–25.
4. **Макаров, В.Н.** Термодинамика высокоскоростной лезвийной обработки / В.Н. Макаров, С.Л. Проскуряков // Вестник машиностроения. 1993. № 5–6. С. 28–29.
5. **Рехт, Р.Ф.** Разрушающий термопластический сдвиг // Тр. Америк. общества инж.-механиков: [пер. с англ.]. Т. 31. Сер. Е. № 2. – М.: МИД, 1964. С. 189–193.
6. **Зорев, Н.Н.** Вопросы механики процесса резания / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 365 с.
7. **Клушин, М.И.** Резание металлов / М.И. Клушин. – М.: Машгиз, 1956. – 363 с.

8. **Кабалдин, Ю.Г.** Резание металлов в условиях адиабатического сдвига элемента стружки // Вестник машиностроения. 1995. № 7. С. 19–25.
9. **Панин, В.Е.** Структурные уровни локализации деформации / Кооперативные деформационные процессы и локализация деформации: сб. ст. – Киев: Наукова думка, 1989. С. 38–57.
10. **Панин, В.Е.** Новая область физики твердого тела // Изв. вузов. Физика. 1987. № 1. С. 3–8.
11. **Пригожин, И.Р.** Термодинамическая теория структур, устойчивости и флуктуации / И.Р. Пригожин, Л. Гленсдорф. – М.: Мир, 1973. – 280 с.
12. **Хакен, Г.** Синергетика / Г. Хакен. – М.: Мир, 1980. – 406 с.
13. **Максимов, И.Л.** Кинетический механизм формирования полосы скольжения в деформируемых кристаллах / И.Л. Максимов, Г.Ф. Сарафанов, С.Н. Нагорных / Физика твердого тела. 2010. № 37. С. 3169–3178.
14. **Трефилов, В.И.** Физические основы прочности тугоплавких металлов / В.И. Трефилов, Ю.В. Мильман, С.А. Фирстов. – Киев: Наукова думка, 1975. – 315 с.

*Дата поступления
в редакцию: 08.04.2014*

Yu.G. Kabaldin, A.M. Kuzmishina

APPROACH TO NUCLEAR AND DESTRUCTION DEFORMATION PROCESS OF CUTTING LAYER CUTTING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Develop mechanisms of deformation and fracture of the shear layer in cutting at the atomic level.

Methodology: The electron-microscopic study of the dislocation structure of materials and quantum-mechanical calculations of the interatomic bond iron alloy grain boundaries, assess their strength.

Findings: New results causes constant shear resistance during cutting due to advances in the shear plane dislocation density limit and move volumes of material in the amorphous state.

Key words: atomic structure of metals, dislocations, cuts, deformation, shear strength, impurities, quantum-mechanical calculations.

УДК 621.9

Ю.Г. Кабалдин¹, О.В. Кретинин¹, И.Л. Лаптев¹, Е.Е. Власов¹, С.В. Серый²**МОДЕЛИРОВАНИЕ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СТУЖКИ
С ИНСТРУМЕНТОМ НА ОСНОВЕ КВАНТОВО-МЕХАНИЧЕСКИХ РАСЧЕТОВ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет²

Показано, что постоянство удельной силы трения при резании обусловлено достижением в прирезцовых слоях стружки критической плотности дислокаций и аморфизацией локальных объемов. Формирование квази-аморфного состояния в прирезцовых слоях стружки на участке пластического контакта в широком диапазоне режимов обработки обуславливает инвариантность удельной силы трения к изменениям условий резания. Влияние температуры на коэффициент трения при резании связано со структурными и фазовыми превращениями на участке пластического контакта, вызывающими рост общей длины контакта, и, прежде всего, длины пластического контакта, изменением вследствие этого среднего удельного давления, а следовательно, и коэффициента трения при резании. Проведено квантово-механическое моделирование поверхностной активности ряда обрабатываемых и инструментальных материалов. Показано, что ее может характеризовать энергия дефекта упаковки (ЭДУ) материалов, а также плотность электронных состояний на уровне Ферми металлов, определяющей их химический потенциал.

Ключевые слова: резание, моделирование, функционал электронной плотности, GPU-вычисления, удельная сила трения, коэффициент трения,

При резании процессы контактного взаимодействия стружки с инструментом в значительной степени связаны с особенностями характера нагружения режущей части [1] и локализацией пластической деформации в зоне вторичной деформации.

Разработку механизмов трения при резании необходимо проводить на основе широкого привлечения к анализу результатов исследований современных достижений в других областях: материаловедении, физике и механике твердого тела, тонких методов физико-химического анализа, физического и математического моделирования, рассматривая систему резания как сложную динамическую систему.

В настоящее время при резании сформировались различные взгляды на природу контактного взаимодействия обрабатываемого и инструментального материалов [1-5].

Первые исследования зависимости среднего коэффициента трения μ от скорости резания выполнены Розенбергом А.М. и Ереминым А.Н. Авторы [3] зависимость μ от V связали с температурой резания, причем максимум μ они обнаружили при $T = 550 - 600^\circ\text{C}$.

Зорев Н.Н. [2] убедительно доказал, что максимальное значение μ достигается при $T=300^\circ\text{C}$, так как авторы работы [3] не учли влияния нароста на действительное направление стружки и средний фактический передний угол. Однако физические причины максимума μ при резании Зорев Н.Н. не изучал.

Согласно [2], зависимость среднего коэффициента трения μ от условий резания определяется нормальными давлениями q_N на рабочих поверхностях инструмента. Удельная сила трения q_F инвариантна к условиям резания, температуре и характеризуется в основном свойствами обрабатываемого материала. В связи с изложенным

$$\mu = \frac{q_F}{q_N} = \frac{\text{const}}{q_N}. \quad (1)$$

Большое влияние на средний коэффициент трения оказывает скорость резания V , толщина среза a и передний угол γ инструмента. Инвариантность q_F к условиям резания связывается с температурно-скоростным фактором.

Согласно [2], параметры q_N и q_F являются самостоятельными контактными характери-

стиками, зависящими от разных факторов: удельная сила трения является суммой силы пластического сдвига в контактном слое, а среднее контактное давление есть функция относительной длины контакта.

Для одного обрабатываемого материала удельная сила трения постоянна (инвариантна к условиям резания), поэтому коэффициент трения зависит только от среднего контактного давления. В связи с инвариантностью силы q_F все внешние действующие факторы будут влиять на коэффициент трения лишь постольку, поскольку они изменяют среднее контактное давление q_N . Однако для разных обрабатываемых материалов средний коэффициент трения зависит также от удельной силы трения, что и обуславливает существование отдельной кривой ($\mu=f(q_N)$) для каждого материала.

По мнению Н.Н. Зорева [2], средний коэффициент трения при резании - характеристика производная и не является коэффициентом трения в обычном понимании. Это некоторая усредненная характеристика напряженного состояния в контактной пластической области и внешнего трения. Дело в том, что при вычислении среднего коэффициента трения в расчет принимается вся контактная площадка, а напряженное состояние в пластической зоне контакта и зоне стружкообразования является единым, то средний коэффициент трения является некоторой обобщенной характеристикой напряженного состояния при стружкообразовании и по своему смыслу равнозначен углу действия (хотя однозначно с последним и не связан).

В ряде работ [3, 4] также показано, что q_F не зависит от температуры и является характеристикой только обрабатываемых материалов. М.Ф. Полетика [4] установлена связь силы q_F с действительным сопротивлением разрыву S_K обрабатываемых материалов:

$$q_F = 0,28S_K, \quad (2)$$

Удельные нормальные напряжение q_N однозначно являются функцией относительной длины контакта C/a (C - длина контакта; a - толщина среза).

М.Б. Гордон [5] показал, что при резании (в отсутствие нароста) возникает режим внешнего кинетического трения, в той или иной мере осложненного адгезией. В своих работах М.Б. Гордон, развивая идею Б.В. Дерягина о двучленном законе трения, получил зависимость μ в следующей форме:

$$\mu = \mu_0(N + N_0), \quad (3)$$

где μ_0 - истинный коэффициент трения, когда адгезия равна нулю и зависит только от молекулярно-атомной шероховатости поверхности; $N_0 = \rho_0 S_0$ - равнодействующая сила молекулярного притяжения между обоими телами; ρ_0 - сила молекулярного притяжения, S_0 - площадь контакта.

Г.И. Елифанов [1], исследуя механизм трения при резании, установил, что нормальное давление участвует в формировании силы трения лишь постольку, поскольку оно формирует величину площади контакта при внешнем трении в результате пластической деформации.

На рис. 1 представлена схема, иллюстрирующая процесс взаимодействия стружки с передней поверхностью инструмента, сопровождающийся образованием заторможенных частиц (областей высокого давления – ОВД) вблизи режущего лезвия, и в последствие нароста. При этом следует различать участок пластического $S_{пл}$ и упругого S контактов. Как нами ранее показано [6], образование ОВД происходит за счет реализации вихревой моды деформации в прирезцовых слоях стружки. Они и являются основой для образования динамической диссипативной структуры-нароста на передней поверхности инструмента.

На рис. 2, а представлена микрофотография подошвы нароста. Из рис. 2, а, что по длине подошвы структура деформированных объемов изменяется. В начале подошвы нароста наблюдается структура отпущенного мартенсита-бейнит, далее видна структура стали, с вытянутыми вдоль пластического течения зернами перлита. В конце подошвы нароста формируется область чистого феррита. Анализ показывает, что в процессе вторичной деформации в прирезцовом слое стружки формируется псевдоячеистая (фрагментированная) дисло-

кационная структура, причем фрагменты дислокационной структуры подвергаются дальнейшему деформированию и вытягиваются по направлению пластического течения (рис. 2, б). При этом ее структура не выявляется. На рис. 2, в и 2, г приведены исходные структуры стали 10 при различных увеличениях.

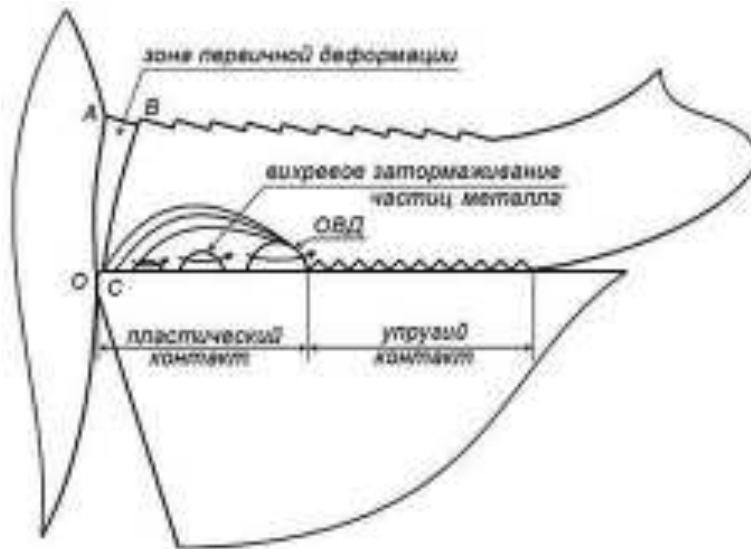


Рис. 1. Схема, иллюстрирующая процесс трения при резании

Следовательно, в процессе трения в прирезцовых слоях стружки интенсивно протекает вторичная деформация цементитных пластин, их распад и диффузия углерода в направлении к режущему лезвию. При этом цементитные пластины поворачиваются, дробятся и вытягиваются в направлении сдвиговых напряжений, образуются также области чистого феррита (рис. 2, а). Наличие структур закалки углеродистых сталей и их последующего отпуска свидетельствует о том, что температура в локальных объемах на подошве нароста может превышать температуру фазовых превращений сталей, согласно диаграмме железо-углерод.

Плотность дислокаций вблизи пластин в ферритных зернах достигает критических значений ($\rho = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$), формируется ячеистая структура, которая подвергается дальнейшей деформации (рис. 2, б) и вытягивается вблизи режущего лезвия под воздействием высоких удельных давлений.

Образующиеся структуры быстрой закалки неравновесных структур (рис. 2, а) в условиях острой локализации деформации и градиентов температур следует рассматривать как фазовый переход с образованием новых диссипативных структур в прирезцовых слоях с новыми каналами диссипации энергии деформации.

Таким образом, анализ рис. 2, а показывает, что зависимость μ от температуры резания обусловлена фазовыми и структурными превращениями в прирезцовых слоях, вызывающими образование по длине пластического контакта зон с различной структурой и твердостью: формирование структур с высокой пластичностью (областей феррита) ведет к увеличению $C_{\text{ПД}}$ и C , в результате q_N удельное давление снижается, а μ растет.

На рис. 3 приведены результаты исследований коэффициента трения и высоты нароста в зависимости от температуры при искусственном подогреве режущей части инструмента, т.е. когда скорость деформации не проявляется. На рис. 3 видно, что как высота нароста H , так и коэффициент трения μ зависят от температуры, причем максимальные их значения находятся около 300°C . Известно [8], что при этой температуре растет подвижность углерода в сталях на межзеренных границах. Как будет показано далее, с использованием квантово-механических расчетов вблизи этой температуры интенсифицируются диффузионные процессы и в кобальтовой связке твердого сплава.

Анализ результатов металлографических исследований (рис. 2, а) показывает, что длину пластического контакта $S_{пл}$ стружки с инструментом при скорости $V > V_H$, т.е. скорости наростообразования, можно разделить на зону скоростной закалки (зону упрочнения) и зону разупрочнения.

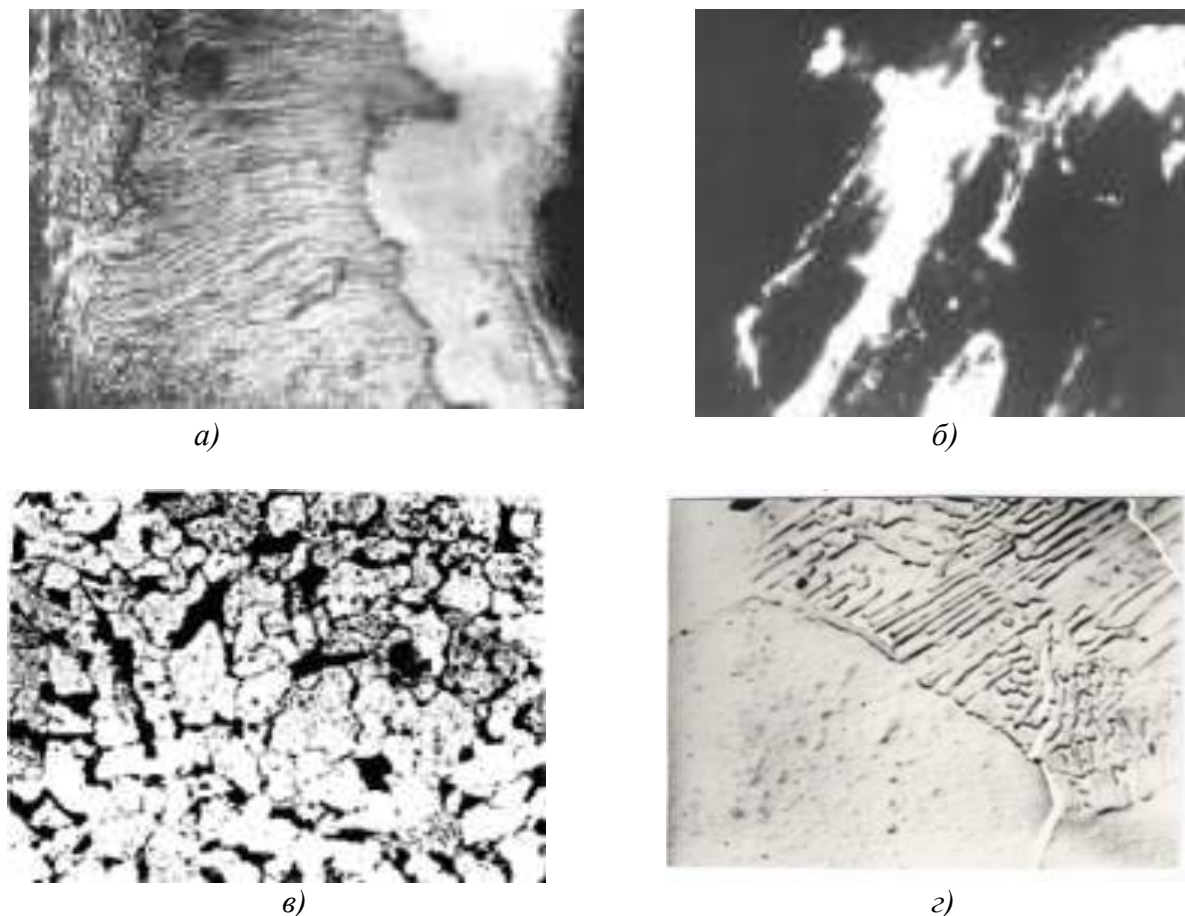


Рис. 2. Микрофотография структуры стали 10:

а – на подошве нароста (x 200) $V = 40$ м/мин; б – дислокационная структура в зоне вторичной деформации (x 15000) $V = 40$ м/мин; в – исходная микроструктура (x 300); г – исходная микроструктура (x 3000)

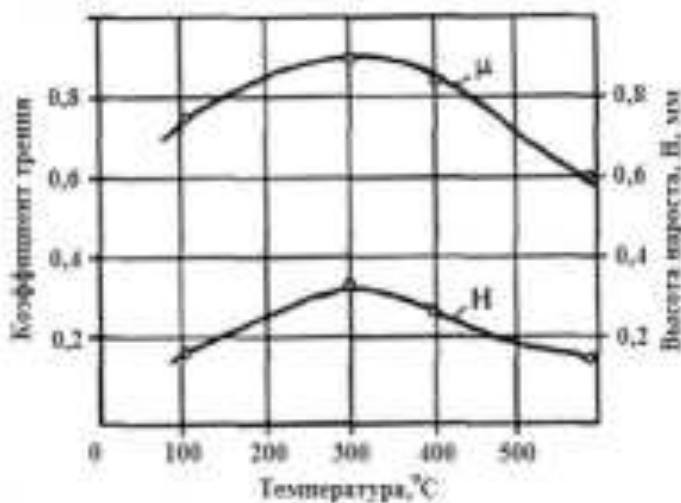


Рис. 3. Зависимость μ и H от температуры подогрева режущей части инструмента:
 резец ВК8; сталь У8; $V = 0,1$ м/мин; $a = 0,2$ мм; $b = 2$ мм

Исследования структуры подошв наростов (рис. 2, а) показывают, что при низких скоростях ($V = V_H$) зона пластического контакта может состоять и из трех зон. Кроме того, зона с наибольшей твердостью находится в начале пластического контакта. Зона разупрочнения (зона с меньшей твердостью) располагается только в конце подошвы нароста, т.е. там, где температура достигает максимального значения по длине контакта стружки с инструментом [4].

Следует отметить, что пластическая деформация при трении в противоположность упругой, столь значительна, что вызывает разрыв межатомных связей, которые до деформации были соседями. Пластическая деформация происходит в том случае, когда к разрыву межатомных связей приводит возрастание напряжений во всем деформированном объеме до величины, равной теоретической прочности, т.е. порядка $0,1B$ (B -модуль всестороннего сжатия). Однако в большинстве реальных материалов пластическая деформация имеет место при уровне напряжений более низком, чем теоретическая прочность вследствие наличия в материалах дислокаций.

На рис. 4 приведена упрощенная схема разрыва межатомной связи в кристаллической решетке с учетом приложения внешней касательной силы τ с межатомным расстоянием a в результате движения дислокации. Существование дислокаций в кристалле приводит к появлению областей, где энергия, необходимая для разрыва группы атомных связей, получается за счет восстановления другой группы связей. При скольжении в кристалле в нем перемещается в направлении скольжения и дислокационная линия (на схеме она перпендикулярна плоскости чертежа, ее проекция – точка p); смещение является одинаковым по всему участку плоскости скольжения, где произошел сдвиг, но оно падает до нуля при переходе через дислокационную линию. Нарушение геометрически правильного расположения атомов решетки вблизи дислокационной линии определяется размещением в этом месте слоя материала такой толщины, которая равна толщине сдвига. На рис. 4 плоскость скольжения перпендикулярна плоскости схемы, последовательное развитие скольжения приводит к тому, что в верхней части кристалла должна быть лишняя атомная плоскость. При перемещении полуплоскости с плоскостью скольжения образуется дислокационная линия.

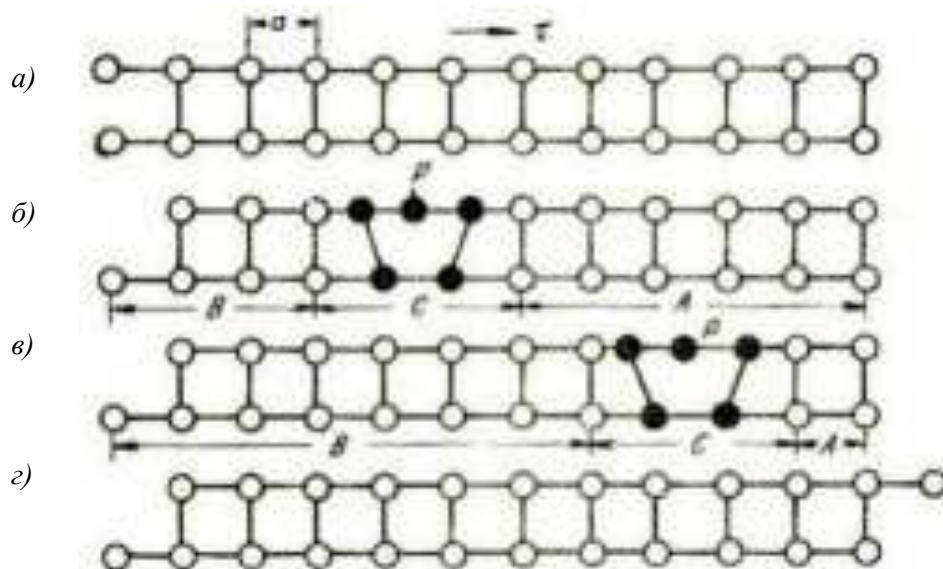


Рис. 4. Схема развития пластического сдвига при касательной нагрузке τ :
 а – исходное состояние; б и в – различные стадии сдвига; г – состояние после сдвига;
 А – участок, неперетерпевший скольжения; В – участок, на котором сдвиг уже прошел;
 С – участок максимальных искажений, создаваемый и перемещаемый при последовательном развитии сдвига

На рис. 5 приведена зависимость удельной силы трения от ЭДУ кристаллических решеток различных материалов. Дефект упаковки обусловлен нарушением чередования плот-

но упакованных атомов [8]. С появлением дефекта упаковки связан избыток энергии, значение которого существенно определяет вид материала и характеризует его энергетическую активность, т.е. чем выше ЭДУ, тем выше поверхностная энергия материала [8] и тем больше его способность к образованию прочных межатомных связей. Из рис. 5 следует – выше ЭДУ, тем больше удельная сила.



Рис. 5. Зависимость удельной силы трения от ЭДУ: режим резания: $V=100$ м/мин; $S=0,157$ мм/об.

На рис. 6 показана зависимость удельной силы трения от теплоты плавления ΔH . Теплота плавления характеризует количество теплоты, которое необходимо сообщить одной единице массы кристаллического вещества, чтобы перевести его из кристаллического состояния в жидкое. Здесь также видно, что чем меньше теплота плавления, тем выше удельная сила трения.

Анализ рис. 5 и рис. 6 позволяет заключить, что в прирезцовых слоях стружки достигается предельное энергетическое состояние и они находятся в квазижидком (аморфном) состоянии с последующей быстрой кристаллизацией. Как уже отмечалось, при трении в условиях высоких степеней деформации в локальных объемах прирезцовых слоев плотность дислокаций достигает критических значений, что сопровождается их аморфизацией.

Зависимость коэффициента трения μ от теплоты плавления, как и зависимость удельной силы трения подчиняется тем же закономерностям: чем меньше теплота плавления, тем больше коэффициент трения.

Следует отметить, что на процессы трения при резании большое влияние оказывает как вид обрабатываемого материала, так и вид инструментального материала, в частности, марка твердого сплава, ее структура.

В этой связи исследовано распределение плотности электронных состояний на поверхности железа карбида вольфрама. Их электронный потенциал формируется как d -электронами, так и s -и p -электронами.

На рис. 7 показана схема модельного кластера для квантово-механических расчетов общей энергии взаимодействия и межатомного взаимодействия между слоями атомов железа и карбида вольфрама с использованием молекулярной динамики, позволяющей определить эти параметры в зависимости от температуры.

Оптимизация межатомного взаимодействия проведена по методу Базина-Хоппинга (Basin-Hopping). Расчеты показывают, что система WC-Fe ведет себя нестабильно выше тем-

ператур 600 до 1000 К при атмосферном давлении. Расстояние между слоями уменьшается, а энергия системы свыше 600 К увеличивается. По-видимому, рост энергии системы связан с фазовыми (полиморфными) превращениями, т.е. переходом α -Co в β -Co. Известно, что кобальт в твердых сплавах представляет β -Co.

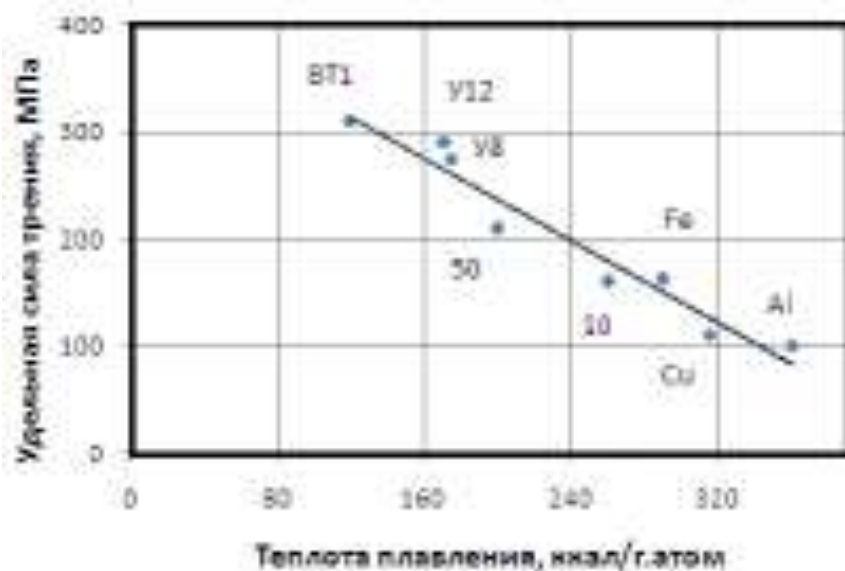


Рис. 6. Зависимость удельной силы трения от теплоты плавления: режим резания: $V=100$ м/мин; $S=0,157$ мм/об.

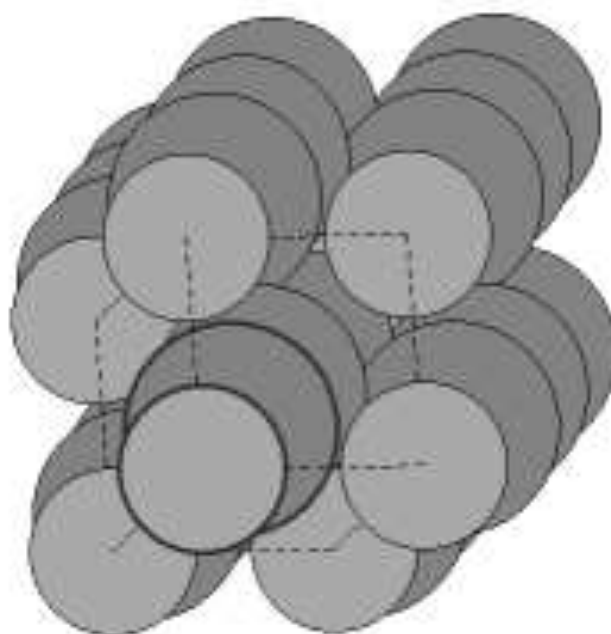


Рис. 7. Модельный кластер для расчета общей энергии систем

Далее были проведены квантово-механические расчеты по определению общей энергии систем, состоящих из различных контактирующих элементов.

Размер кластера обеспечивал необходимую точность воспроизведения для оценки энергии системы и достаточное время расчетов. В качестве рассчитываемых характеристик были выбраны E_{tot} - общая энергия связи в кластере (табл. 1).

Таблица 1

Общая энергия различных систем

Системы	E_{tot} (a.u.)
Co/Al	- 18,848
Co/Fe	- 32,650
Co/Ti	- 39,240
WC/Al	–
WC/Fe	- 15,670
WC/Ti	- 19,160
TiC/Fe	- 18,320
TiC/Ti	- 34,404

Энергия связи кластера, взятая с обратным знаком, представляет собой энергию, которую нужно затратить на разрыв всех межатомных связей в кластере, т.е. разделить его на отдельные атомы. Энергия связи, приходящаяся на один атом, равна $E_a = E_{tot}/n$, где n – число атомов в кластере. При этом расстояния между атомами должно стремиться к значениям, характерным для кристаллической решетки, определенной экспериментально. Изложенное позволяет заключить, что размер кластера составлял 30 атомов.

Квантово-механические расчеты общей энергии показали (табл. 1), что наибольшей энергией обладают системы из взаимодействующих элементов: карбид титана - титан и кобальт - титан, а также кобальт - железо. Система WC-Al показала несходимость результатов расчетов.

На основе анализа приведенных квантово-механических расчетов электронных плотностей кобальта и карбида вольфрама выявлено, что кобальт имеет более высокий уровень Ферми, чем WC, что объясняет взаимодействие частиц покрытия с кобальтом, а не с карбидом вольфрама. Таким образом, прочность сцепления нанопокрытия с твердосплавной основой определяется межатомными связями элементов покрытия с кобальтом и зависит от их электронной структуры [8]. В частности, на прочность межатомных связей в переходных металлах большое влияние оказывают d- и s-электроны. Прочные металлические связи устанавливаются за счет перекрытия валентных электронов d и s-орбиталей, в результате ядра атомов стягиваются. В связи с этим титан является наиболее активным химическим элементом.

Далее проведен расчет пространственных конфигураций, параметров решетки, модулей упругости и полной энергии, приходящейся на атом, для перечисленных соединений, а также проведено сравнение полученных результатов с экспериментальными данными. Кроме того, оценено увеличение коэффициента производительности при GPU-вычислениях на основе технологии NVidia CUDA. Все расчеты проводились на программном обеспечении GPAW и Abinit, и их GPU-версий. Анализ показывает, что использование ПО на основе технологии NVidia CUDA позволяет повысить скорость расчетов в 1,5–2 раза.

Библиографический список

1. **Клушин, М.И.** Резание металлов / М.И. Клушин. – М.: Машгиз. 1956. – 363с.
2. **Зорев, Н.Н.** Вопросы механики процесса резания / Н.Н. Зорев. – М.: Машгиз, 1956. – 365 с.
3. **Розенберг, А.М.** К теории процесса резания металлов / А.М. Розенберг, А.Н. Еремин // Станки и инструмент, 1949. №10. С. 4–11.
4. **Полетика, М.Ф.** Контактные нагрузки на режущих поверхностях инструмента / М.Ф. Полетика. – М.: Машиностроение, 1969. – 148 с.
5. **Гордон, М.Б.** Трение и смазка при резании металлов // Исследование трения и смазки при тении / М.Б. Гордон. – Чебоксары: ЧГУ им. И.Н. Ульянова, 1972. – 138 с.

6. **Кабалдин, Ю.Г.** Структура, прочность и износостойкость композиционных материалов / Ю.Г. Кабалдин. – Владивосток: Дальнаука, 1996. – 183 с.
7. **Кабалдин, Ю.Г.** Структурно-энергетический подход к процессу изнашивания твердых сплавов // Изв. вузов. Машиностроение. 1986. № 4. С. 127–131.
8. **Трефилов, В.И.** Дисперсные частицы в тугоплавких металлах / В.И. Трефилов, В.Ф. Моисеев – Киев.: Наукова думка, 1975. – 240 с.
9. **Золотухин, И.Б.** Нанокристаллические металлические материалы // Соровский образовательный журнал. 1998. № 1. С. 103–106.
10. **Смирнов, В.Ф.** Физика фрактальных кластеров / В.Ф. Смирнов. – М.: Наука, 1998. – 256 с.
11. **Кабалдин, Ю.Г.** Оптимизация составов и функциональных свойств наноструктурных покрытий для режущего инструмента методом функционала электронной плотности / Ю.Г. Кабалдин, С.В. Серый // Вестник машиностроения. 2011. № 5. С. 32–36.
12. **Кабалдин, Ю.Г.** Повышение работоспособности режущего инструмента осаждением наноструктурных покрытий / Ю.Г. Кабалдин [и др.]// Вестник машиностроения. 2010. №3. С. 41–48.

*Дата поступления
в редакцию: 08.04.2014*

Yu.G. Kabaldin¹, O.V. Kretinin¹, I.L. Laptev¹, E.E. Vlasov¹, S.V. Sery²

CONTACT INTERACTION SIMULATION TOOL CHIP BASED ON QUANTUM-MECHANICAL CALCULATION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Komsomolsk-on-Amur state technical university²

Objective: To study the reasons for the dependence of the friction when cutting and constancy of the specific friction force on the treatment conditions

Methods: electron microscopic study of structural transformations and quantum- mechanical calculations of the interatomic interaction material chips and particles of the tool material

Research results: was shown that the cause of the temperature dependence of the coefficient of friction when cutting is the structural transformations in the near-contact layers of chips , and the constancy of the specific friction force when cutting associated with achievement in local volumes prizeztsovogo layer chip limiting density of dislocations and their amorphization.

Key words: cutting, specific friction force, friction coefficient, modeling, functional electron.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.А. Баринов, В.Е. Бородина, А.Е. Хробостов

К ВОПРОСУ О МЕТОДОЛОГИИ ОБОСНОВАНИЯ ТЕПЛОТЕХНИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ АКТИВНЫХ ЗОН ВОДЯНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕАКТОРОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проводится обзор проблематики и методов обоснования теплотехнической надежности активных зон реакторов с водой под давлением (ВВЭР, PWR). Основой написания данной статьи являются монографии, справочные пособия и публикации, содержащие информацию по рассмотренной тематике. Приводятся основные положения отечественных и зарубежных подходов и методик, разработанных в рамках данного вопроса. Мотивом к написанию данной работы является желание авторов представить в виде краткого обзора методы обоснования теплотехнической надежности, с целью систематизации и углубления знаний по указанной проблеме.

Ключевые слова: теплотехническая надежность, теплогидравлический расчет, коэффициент запаса до кризиса теплоотдачи, детерминистский подход, статистические методы.

Введение

При разработке новых и модернизации существующих реакторных установок (РУ) перед конструкторами встает задача обоснования теплотехнической надежности (ТТН) активных зон (АЗ). Обоснование теплотехнической надежности является неотъемлемой частью проекта создаваемой РУ и проводится по методикам и кодам, аттестованным Ростехнадзором. Указанные методики могут носить общеотраслевой характер или принадлежать конкретной организации-конструктору данной РУ.

Задачи обоснования теплотехнической надежности АЗ являются конкретно прикладными задачами, привлекающими большой объем экспериментальных и теоретических научных исследований. Прежде чем перейти к рассмотрению методических приемов обоснования ТТН, дадим её определение. Согласно [1], под *стационарной теплотехнической надежностью активной зоны* (надежностью теплоотвода из АЗ реактора) понимается свойство реактора сохранять в течение заданного времени нормальный теплоотвод¹ от твэлов АЗ в стационарном (например, номинальном) режиме работы в условиях случайных отклонений параметров АЗ от проектных (номинальных) значений, обусловленных технологическими погрешностями изготовления и эксплуатации АЗ и реактора в целом. Это свойство характеризуется рядом конкретных количественных показателей [2].

Процесс теплоотвода от твэлов АЗ определяется многими факторами, связанными с нейтронной физикой, определяющей энерговыделения по поперечному сечению и высоте АЗ, гидравлическими характеристиками каналов АЗ, состоянием поверхностей твэлов и др.

© Дмитриев С.М., Баринов А.А., Бородина В.Е., Хробостов А.Е., 2014.

¹ Под нормальным теплоотводом понимается такой отвод тепла от твэлов, при котором отсутствуют, во-первых, термические разрушения оболочек твэлов (в том числе, расплавление, прогорание, растрескивание), вызывающие их разгерметизацию; во-вторых, такие необратимые тепловые воздействия на оболочки твэлов, которые впоследствии могут привести к их разгерметизации.

Требование нормального теплоотвода конкретизируется в виде ряда *проектных критериев*², проверка и обоснование которых является целью расчетно-экспериментального обоснования АЗ в части теплогидравлики [3].

На сегодняшний день водо-водяные реакторы составляют большую часть коммерческого парка эксплуатирующихся и строящихся российскими предприятиями реакторов. Задача обоснования ТТН АЗ реакторов ВВЭР и их зарубежных аналогов – PWR – имеет свои особенности. Рисунок 1 иллюстрирует основные теплотехнические и гидромеханические требования, выполнение которых обосновывается в проектах ВВЭР и PWR.



Рис. 1. Состав основных проектных требований

Проблематика данного анализа, используемого при обосновании теплотехнической надежности АЗ, имеет важнейшее значение для развития проектов водо-водяных РУ. В связи с накопленным опытом конструирования и эксплуатации различных РУ организациями-конструкторами было выработано множество методик оценки и обоснования ТТН АЗ. В данной работе предпринята попытка дать краткое описание особенностей основных подходов к обоснованию ТТН.

Основные критерии теплотехнической надежности

Обеспечение необходимого уровня теплотехнической надежности обосновывается в проекте для различных режимов эксплуатации РУ. В Правилах ядерной безопасности [4], в числе прочего, содержится следующее требование: «Для обоснования выполнения требований к непревышению пределов безопасной эксплуатации по повреждению твэлов при нарушениях нормальной эксплуатации в проекте РУ должен быть выполнен анализ теплотехнической надежности активной зоны с обоснованием достаточности предусмотренных проектом РУ запасов». Числовые характеристики, обозначенные в [4], относятся к пределам допустимого повреждения твэл: эксплуатационному, пределу безопасной эксплуатации и максимальному проектному пределу.

Целостность оболочек твэлов обуславливается поддержанием значений температуры их наружной поверхности не более 1200 °С, что обеспечивается созданием необходимых условий их охлаждения. Также недопустимым является плавление топливной матрицы UO₂, происходящее при температурах от 2670 до 2800 °С в зависимости от степени облученности топлива.

² Проектный критерий – признак, количественный показатель, обозначенный в проекте РУ, на основе которого проводится оценка каких-либо процессов.

Фактически, указанные требования означают необходимость сохранения целостности первых двух барьеров безопасности РУ – топливной матрицы и оболочки твэлов и относятся к максимальному проектному пределу повреждения твэлов. Можно показать, что при характерных для ВВЭР тепловых потоках и режимных параметрах условие отсутствия плавления сердечников твэлов выполняется в подавляющем большинстве эксплуатационных режимов [5]. Поэтому наибольшее внимание уделяется условиям охлаждения последних, определяющим целостность их оболочек и ограничиваемых с точки зрения теплофизики возникающим кризисом пузырькового кипения.

Значение явления кризиса теплоотдачи

Явление кризиса теплоотдачи в водяных реакторах, именуемое также кризисом пузырькового кипения, кризисом кипения 1-го рода (в зарубежной литературе аббревиатурой DNB)³, является одним из наиболее сложных явлений реакторной теплофизики. До сих пор не разработано полноценной аналитической теории, описывающей механизмы кризиса, что обуславливает необходимость проведения экспериментальных исследований. В инженерной практике кризис принято характеризовать значением критического теплового потока $q_{кр}$ на поверхности теплоотдачи. Значения $q_{кр}$ вычисляются по различным эмпирическим корреляциям. В результате возникновения кризиса кипения происходит резкое ухудшение интенсивности теплоотдачи, сопровождающееся повышением температуры теплоотдающей поверхности.

Как было отмечено ранее, кризис теплоотдачи оказывает решающее влияние на сохранение целостности оболочек твэлов при различных режимах работы РУ. За рубежом, например в США, требование по предотвращению кризиса регламентируется одним из основных документов NRC – SRP NUREG-0800 (Standard Review Plan of U.S. Nuclear Regulatory Commission – Стандартный план проверки (Комиссия по ядерному регулированию США)) [6], содержащим основные критерии надежности, требования к порядку и содержанию отчета о безопасности РУ. Сформулированное в [6] требование гласит: «необходимо предотвращение кризиса теплообмена на поверхности наиболее «горячего» твэла с вероятностью не менее 95% на доверительном уровне 95%», – т.н. критерий 95/95. Его вероятностный смысл весьма подробно рассмотрен в публикации [7] и документах [8, 9]. Отмечается также, что значения уровней надежности и вероятности 95% приняты в соответствии с установившейся в международных нормативах практикой инженерного обоснования надежности. Однако дано замечание, что национальные стандарты могут регламентировать значения, отличные от 95%.

Предотвращение кризиса в АЗ ВВЭР достигается ограничением теплового потока q на поверхности твэлов с определенным запасом (запасом до кризиса⁴):

$$K_{зан} = \frac{q_{кр}}{q} > 1,0 \quad (1)$$

Коэффициент запаса до кризиса, относящийся к тепловым потокам на поверхности наиболее «горячего» твэла АЗ, является основным критерием её ТТН⁵. Значения минималь-

³ DNB – Departure from Nucleate Boiling (досл. «уход от пузырькового кипения»). Далее будем использовать термин «кризис».

⁴ В иностранной литературе коэффициент запаса до критического теплового потока имеет обозначение DNBR – Departure from nucleate boiling ratio.

⁵ В некоторых случаях, при обосновании теплотехнической надежности топлива, используют понятие «критической мощности», т.е. мощности АЗ (ТВС), при которой на поверхности наиболее «горячего» твэла нарушается требование NRC. Критическая мощность является верхним пределом допустимой мощности АЗ (ТВС). Задачи совершенствования АЗ коммерческих реакторов сводятся, в том числе, и повышению данного показателя при сохранении уровня ТТН.

ного по АЗ $K_{\text{зап}}$ обосновываются конструктором в проекте для определенного вида топлива, ряда режимов работы РУ, включая аварийные, и различных моментов кампании.

В силу устоявшихся традиционных практик различных организаций-конструкторов РУ, используемые ими методики обоснования теплотехнической надежности АЗ значительно отличаются друг от друга. Проведем рассмотрение некоторых из них.

Подходы к количественной оценке ТТН

В соответствии с указанным критерием 95/95, обоснование ТТН АЗ сводится, главным образом, к вычислению расчетных значений $K_{\text{зап}}$ на поверхностях наиболее горячих твэлов. Остановимся более подробно на методах вычисления значений $K_{\text{зап}}$.

В настоящее время обоснование ТТН входит в этап поверочного детального теплогидравлического расчета (ТГР) АЗ. Детальный ТГР проводится для «горячей» ТВС после общего ТГР АЗ, проводимого в упрощенном подходе. Детальный расчет проводится с использованием ячейковых инженерных кодов, представляющих ТВС в виде системы параллельных каналов. Способ разбиения на каналы зависит от физических предпосылок и области применимости кода, которыми задавались его разработчики. АЗ разбивается по высоте на расчетные участки, на каждом из которых решается система уравнений переноса массы, импульса и энергии. В результате такого расчета получают (помимо значений основных теплогидравлических характеристик в ячейках: температуры t , давления p , скорости w , относительной энтальпии x) значения критического теплового потока (КТП) – $q_{\text{кр}}$. КТП вычисляется на основе корреляций, полученных в результате обработки массивов экспериментальных данных. Вследствие статистической природы полученной оценки КТП каждая корреляция характеризуется значением среднеквадратического отклонения $\sigma_{\text{корр}}$ (отклонение или погрешность корреляции). Коды ячейкового расчета содержат, как правило, ряд корреляций для $q_{\text{кр}}$, причем для конкретной конструкции топлива применяется соответствующая корреляция. Используемые корреляции должны охватывать случаи различного профиля энерговыделения в АЗ, быть адаптированы для расчета КТП в пучках с интенсификаторами теплообмена (дистанционирующими и перемешивающими решетками), обеспечивать необходимую точность оценки КТП в широком диапазоне параметров их применения.

Помимо неопределенности, вносимой корреляцией, существуют также неопределенности, связанные с параметрами расчета – мощности АЗ, расхода теплоносителя, входной температуры, геометрии элементов АЗ и др. Все существующие неопределенности должны учитываться при обосновании ТТН.

Детерминистский подход

Практика отечественных расчетов в обоснование ТТН, как правило, имеет целью вычисление минимального по АЗ значения $K_{\text{зап}}$, учитывающего все неопределенности расчета. Далее, в качестве примера рассматривается методика ОКБ ГП, приведенная в [3].

Для учета отклонений параметров расчета и погрешности корреляции $q_{\text{кр}}$ эти значения принимаются равными возможным наихудшим, например: мощность АЗ – 104% от номинальной, расход теплоносителя – минимальный проектный, отклонение $P_{\text{лк}}$ – минус 0,3 МПа от номинала и т.п. [3]. В соответствии с (1), получается оценка вида

$$K_{\text{зап}}^{\text{min}} = \frac{q_{\text{кр}}(1-\delta)}{q} > 1,0, \quad (2)$$

где δ – отклонение, вносимое погрешностью корреляции $q_{\text{кр}}$. Данная оценка значения коэффициента запаса получила название *детерминистской консервативной* (англ. determine – определять, назначать, задавать). Таким образом, в рамках детерминистского подхода для учета возможных отклонений их значения вносятся в виде заданных отклонений от но-

минальных значений параметров. Консервативный подход означает сознательное завышение требований безопасности и выражается в задании значений параметров расчета, ведущих к заведомо пессимистичной оценке целевого критерия.

Используемая для вычисления значений $q_{кр}$ корреляция аппроксимирует ограниченную выборку данных эксперимента по созданию кризисных условий теплообмена. Полученная при этом величина относительного отклонения значений $\Delta q_i = \frac{q_{кри}^{эксн} - q_{кри}^{расч}}{q_{кри}^{расч}}$ распределена по нормальному закону. Оценки матожидания и стандартного отклонения Δq вычисляются по формулам:

$$\overline{\Delta q} = \frac{\sum_{i=1}^N \Delta q_i}{N} \quad (3)$$

$$\sigma_{\Delta q} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta q_i - \overline{\Delta q})^2}{N-1}} \quad (4)$$

В экспериментах, проводимых в ОКБ ГП [3], экспериментальная выборка насчитывала >700 точек. Полученное распределение Δq_i имеет оценку матожидания +0,25% (т.е. расчетное значение немного занижает $q_{кр}$), а оценка его стандартного отклонения составляет 13,1%.

Поскольку при вычислении $q_{кр}$ принимается надежность полученного результата 95%, то в качестве оценки $q_{кр}$ должна быть принята нижняя граница доверительного интервала эмпирической корреляции⁶ при односторонней оценке. Величина одностороннего разброса для Δq_i равна $1,645\sigma_{\Delta q}$.

Для учета технологических отклонений изготовления ТВС рассматривалось восемь экспериментальных сборок. При этом среднеквадратичный разброс оценок относительных отклонений Δq_i среди восьми пучков был равен $s=2,898\%$, величина одностороннего разброса при этом равна $1,90s$.

Из изложенного следует, что максимальное относительное отклонение оценки (без учета смещения $\overline{\Delta q}$) равно

$$\delta_{q_{кр}}^{\max} = \sqrt{(1,645\sigma_q)^2 + (1,90s)^2} = \sqrt{(1,645 \cdot 0,1310)^2 + (1,90 \cdot 0,0290)^2} = 22,24\% \quad (5)$$

Таким образом, нижняя граница доверительного интервала $q_{кр}$ при доверительной вероятности 95% может быть вычислена (с учетом смещения $\overline{\Delta q}$) как:

$$\left(1 + \overline{\Delta q} - \delta_{q_{кр}}^{\max}\right) q_{кр} = (1 + 0,0025 - 0,2224) q_{кр} \approx 0,780 \cdot q_{кр} \quad (6)$$

Ввиду этого, значение $(1 - \delta)$, входящее в основной критерий (2), равно 0,780.

Изложенный пример вычисления понижающего коэффициента является характерным для равномерного тепловыделения по оси пучка, что не согласуется с реальной картиной тепловыделения в АЗ, где поле q существенно неравномерно. Кроме того, расчеты запасов до кризиса проводятся также для нестационарных режимов работы АЗ [10]. Для приближенных

⁶ Поскольку в основу теплогидравлического обоснования АЗ закладывается условие предотвращения кризиса теплоотдачи на горячем твэле, лимитирующим фактором является наименьшее значение $q_{кр}$, превышение которого локальным q не допускается. Именно поэтому оценка действительного $q_{кр}$ является односторонней (в меньшую сторону).

к натурным условий расчета применяются усовершенствованные корреляции расчета $q_{кр}$, но методика оценки понижающего коэффициента в (2), основанная на статистическом обосновании, остается той же.

Детерминистский подход является традиционным методом оценки ТТН из-за его простоты и возможности быстрого учета отклонений всех факторов расчета. Однако применение данного подхода необоснованно завышает требования консервативности, что является фактором, ограничивающим совершенствование АЗ РУ. Эти особенности обусловили широкое развитие статистических методов обоснования ТТН.

Статистический подход

Статистические методы более реалистично учитывают неопределенности параметров и корреляции, входящих в детальный ТГР. В отличие от детерминистского подхода, предполагающего (из консервативных соображений), одновременное отклонение параметров в худшую сторону, статистический подход предполагает *статистический* учет указанных неопределенностей, что будет пояснено далее.

В рамках статистического обоснования ТТН предполагается определение двух значений коэффициентов запаса: так называемого «проектного предела» $K_{зан}^{проект}$ и минимального расчетного $K_{зан}^{мин}$ в АЗ. Проектный предел является базой для сравнения и указывается в проекте РУ. $K_{зан}^{проект}$ может вычисляться на основе статистического учета погрешности корреляции, отклонений параметров расчета («факторов горячей ячейки») и неопределенностей, вносимых другими факторами. Сущность статистического метода укрупнено может быть описана следующей схемой:

Этап 1. Проводится построение распределений параметров расчета и корреляции для КТП. Значение $K_{зан}^{проект}$ вычисляется после совместного учета указанных распределений (методы совместного учета данных распределений рассмотрены далее) в соответствии с критерием 95/95.

Этап 2. Проводится детальный ТГР АЗ на основе номинальных значений параметров расчета⁷, характеризующих центр распределения параметров, полученного на 1-м этапе. Выявляется минимальный по АЗ расчетный коэффициент запаса $K_{зан}^{мин}$.

Этап 3. Степень теплотехнической надежности АЗ определяется превышением $K_{зан}^{мин}$ над $K_{зан}^{проект}$ (рис. 2). Как правило, это превышение характеризуется относительным отклонением

$$M = \frac{K_{зан}^{мин} - K_{зан}^{проект}}{K_{зан}^{проект}}, \% \text{ (далее – инженерный запас).}$$

Разработанные статистические методы оценки показателей ТТН основаны на различных приемах совместного учета распределений корреляции и параметров расчета. В первых методиках указанные распределения строились независимо друг от друга, а затем суммировались для получения значения проектного предела $K_{зан}^{проект}$. В соответствии с требованиями NRC, распределения суммируются по квантилям 95% (рис. 3, а). Данный прием использовался в методике ITDP фирмы Westinghouse [11].

На дальнейших этапах получили развитие методики, основанные на получении общего распределения «параметры-корреляция». В этом случае проектный предел $K_{зан}^{проект}$ является

⁷ Имеется в виду, что на этом этапе используются значения характеристик без поправок и учета погрешностей. Данные значения в зарубежной практике получили название «best estimate values» – значения наилучшей оценки.

ся центром суммарного распределения, смещенного относительно единицы на значение квантиля односторонней доверительной оценки (рис. 2, б). Применение данного приема позволило обоснованно повысить инженерный запас M до проектного предела на $\approx 8\%$. Методиками, в которых реализован данный подход, являются RTDP фирмы Westinghouse [11], MSG фирмы Framatome [12], STDP фирмы Tractebel Engineering [13], фирмы Babcock&Wilcox [14].

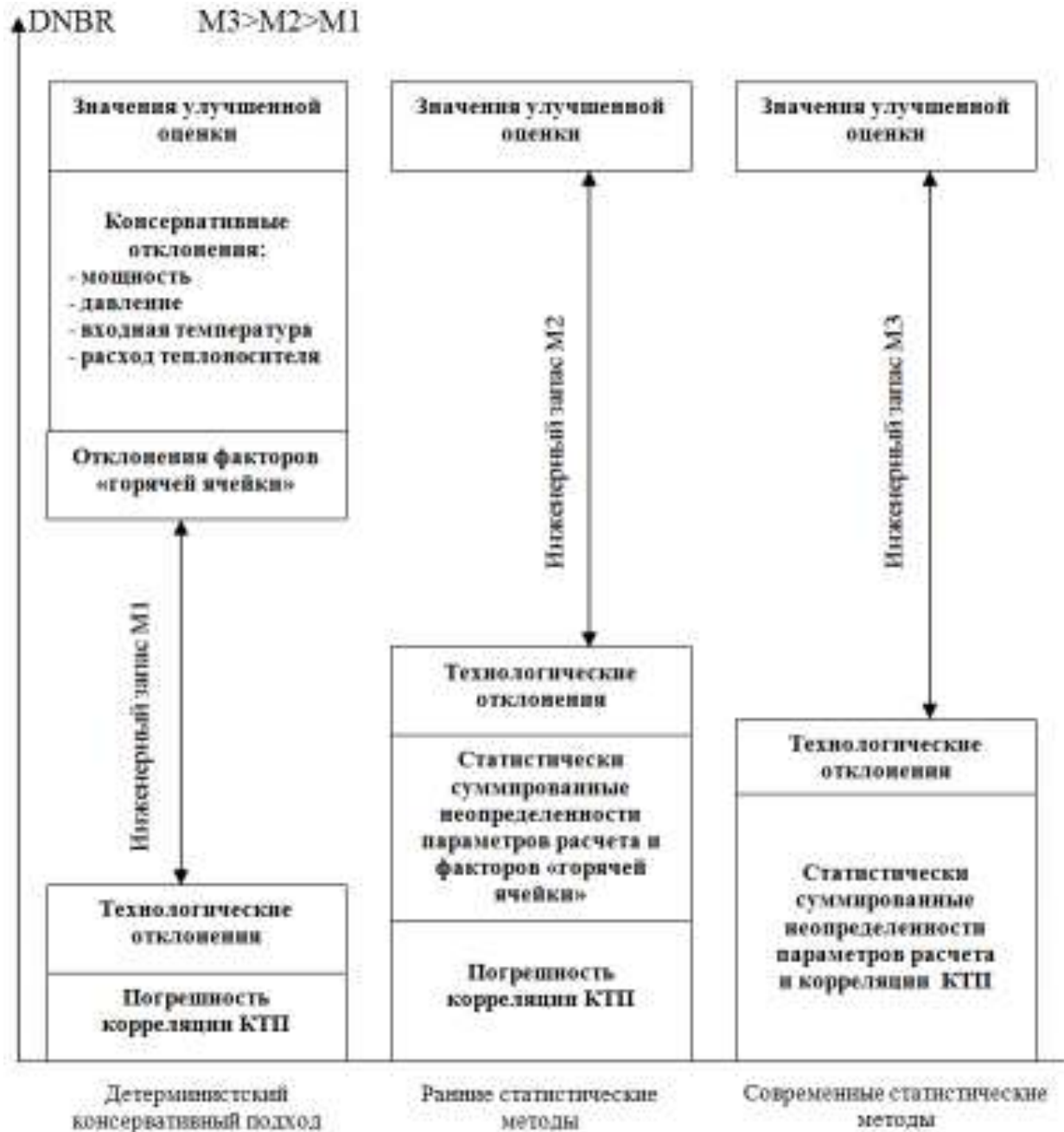


Рис. 2. Сравнительная диаграмма запасов

Для получения суммарных распределений (рис. 3, б) пользуются методом статистического суммирования среднеквадратичных отклонений и методом Монте-Карло. Метод статистического суммирования является более наглядным с математической точки зрения. Он предполагает вычисление относительной результирующей погрешности коэффициента запаса на основе статистической комбинации относительных погрешностей параметров расчета

$$\left(\frac{\sigma_y}{\mu_y}\right)^2 = \sum_i \left(S_i \frac{\sigma_i}{\mu_i}\right)^2, \quad (7)$$

где $y = \frac{\Delta DNBR}{DNBR_{nom}}$; σ_i , μ_i – погрешность и среднее значение i -го параметра расчета, назначаемые в проекте.

Коэффициенты линейной комбинации S_i , называемые коэффициентами чувствительности, вычисляются при помощи кода поячейкового расчета.

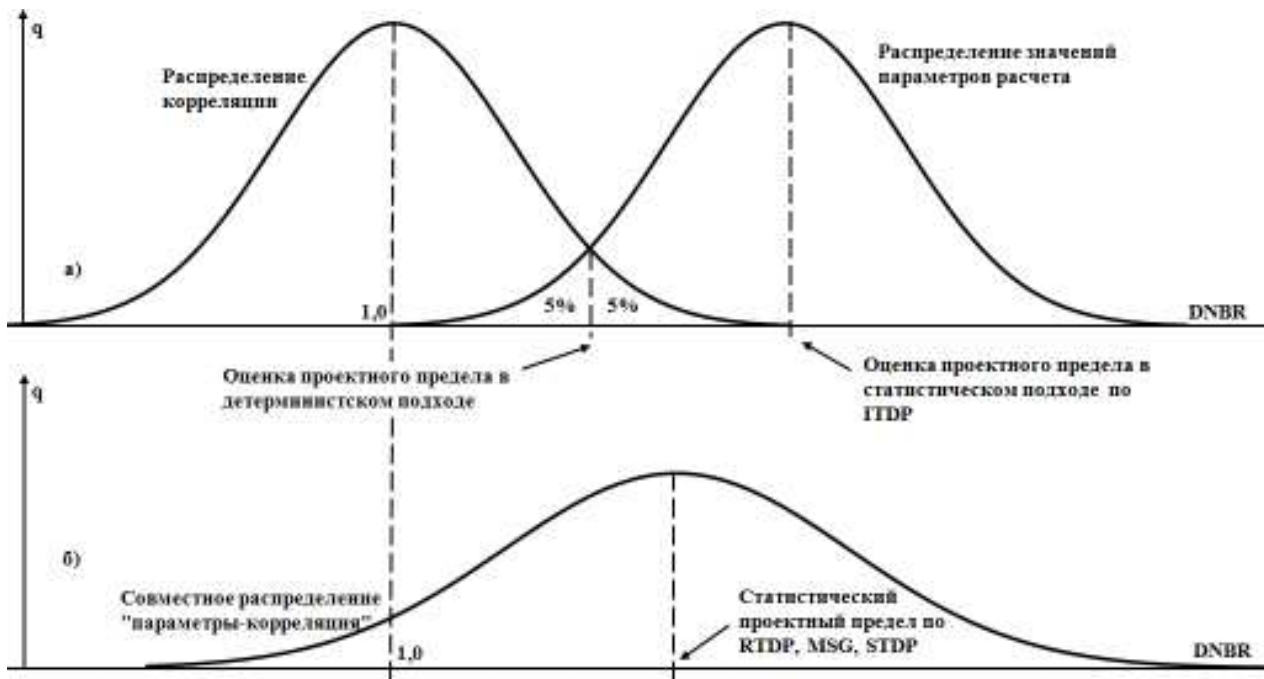


Рис. 3. Сравнение методов статистической оценки проектного предела
a – традиционный метод; *б* – более поздние методы; q – плотность вероятности

Примерный перечень параметров, принимаемых для оценки статистического проектного предела, приведен в табл. 1.

Таблица 1

Параметры расчета и их отклонения (PWR-900)

Параметр	Стандартное отклонение для расчетов
Мощность АЗ	1,15%
Давление в системе	0,121 МПа
Расход теплоносителя через АЗ	0,69%
Входная температура теплоносителя	1,27 °С
Радиальный коэффициент неравномерности тепловыделения	0,0394
Коэффициент локального подогрева	0,0188

Метод Монте-Карло предполагает генерацию большого ($\approx 10^5$) числа случайных комбинаций значений параметров, варьирующихся в соответствии с их законом распределения, и проведение теплогидравлического расчета АЗ для каждой из данных комбинаций. Таким образом, распределение DNBR получается непосредственным образом из расчета, что приводит к немного более точной оценке его характеристик. По результатам работ [12, 15] пока-

зано, что рассмотренные методы получения суммарного распределения дают приблизительно одинаковый результат (отличие в пределах 2%).

Дальнейшее развитие подходов к обоснованию ТТН

Можно с уверенностью утверждать, что на дальнейших этапах развития атомной техники задача обоснования новых видов топлива водо-водяных реакторов не утратит своей актуальности.

Новые требования, предъявляемые к топливу со стороны экономики (увеличение единичных мощностей уже работающих энергоблоков), освоение перспективных топливных циклов (продление кампании, повышение глубины выгорания, применение нового компонентного состава топлива), разработки принципиально новых реакторов и ТВС предъявляют все более жесткие требования к точности методик обоснования ТТН АЗ. В частности, одной из основных тенденций является снятие *излишнего консерватизма* при оценке ТТН. Наличие значительной доли консерватизма в оценке надежности связано с неучетом (по причине незнания или методических затруднений) действительного характера неопределенностей параметров и методов ТГР или решения о намеренном сохранении высоких запасов надежности с различными целями (увеличения гарантированного ресурса, безопасности эксплуатации и пр.).

Уместно заметить, что в части требований к обоснованию ТТН со стороны нормативной документации РФ, документ [16], в качестве 1-го уровня глубокоэшелонированной защиты АС требует *разработки проекта на основе консервативного подхода с развитым свойством внутренней самозащищенности РУ*. Однако не говорится, в чем конкретно состоит консервативный подход и каковы его критерии. Рассмотренные в работе статистические методы, сохраняя требования о консервативном выборе пределов ТТН (односторонние 95%-ной оценки), позволяют более реалистично учесть неопределенности факторов расчета. Таким образом, применение статистических методов является (при соответствующем обосновании) одним из путей совершенствования инженерных расчетов АЗ в части снижения излишнего консерватизма получаемых оценок.

Практика применения основ указанных методик продемонстрирована работой [17], авторы которой совместили и адаптировали некоторые исходные положения зарубежных статистических методик к задаче обоснования ТТН АЗ ВВЭР-1000. По замечанию авторов, применение статистического метода дает возможность реализации эффективных топливных циклов с уменьшенной утечкой нейтронов, требующих увеличения допустимых неравномерностей энерговыделения в АЗ ВВЭР-1000 и повышения точности оценок теплотехнических параметров.

В качестве направлений дальнейшего развития методов обоснования ТТН можно предположить следующие:

- применение CFD-кодов, дающих возможность более детального расчета локальных параметров потока теплоносителя и, как следствие, уточнения замыкающих соотношений для инженерных кодов;
- учет вероятностного характера параметров, значения отклонений которых в настоящий момент учитываются детерминистски (факторы горячей ячейки, выгиб твэлов и пр.);
- получение корреляций для КТП, основанных на проведении уточненных экспериментов и разработке аналитических моделей кризисных процессов.

Заключение

Задача обоснования ТТН АЗ реакторов с водой под давлением является важной частью их проектного обоснования. Показатели ТТН определяют свойство безопасности РУ. Кроме того, получение количественных оценок показателей ТТН необходимо на различных этапах теплогидравлического расчета. В частности, в некоторых проектах в качестве критерия оптимальности гидравлического профилирования расхода теплоносителя в АЗ принима-

ется получение возможно более близких значений $K_{зап}$ по всем ТВС при достаточных недогревах теплоносителя до линии насыщения. Результаты, полученные при решении подобных инженерных задач, в значительной степени зависят от точности оценок показателей ТТН.

Для принятия решений о форсировании мощностей АЗ уже существующих энергоблоков, продлении эксплуатации и применении усовершенствованных топливных загрузок необходимо получение наиболее реалистичных оценок теплотехнических запасов. В силу указанных практических требований совершенствование методик ТГР и количественной оценки показателей ТТН, ведущее к снятию излишнего консерватизма, является значимой технико-экономической задачей. Данная задача может эффективно решаться при объединении накопленного мирового опыта в части обоснования ТТН.

Библиографический список

1. **Клемин, А.И.** Теплогидравлический расчет и теплотехническая надежность ядерных реакторов / А.И. Клемин, Л.Н. Полянин, М.М. Стригулин. – М.: Атомиздат, 1980. – 261 с.
2. **Кириллов, П.Л.** Справочник по теплогидравлическим расчетам в ядерной энергетике: в 2 т. / П.Л. Кириллов. – М.: ИздАт, 2013.
3. Активные зоны ВВЭР для атомных электростанций / В.Д. Шмелев [и др.] – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 220 с.
4. Правила ядерной безопасности реакторных установок атомных станций: НП-082-07: утв. постановлением Ростехнадзора РФ от 10.12.2007. – М., 2008.
5. **Овчинников, Ф.Я.** Эксплуатационные режимы водо-водяных энергетических реакторов / Ф.Я.Овчинников, В.В.Семенов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 359 с.
6. Standard Review Plan for the Review of Safety Analysis Reports for Nuclear Power Plants: LWR Edition
7. **Шишков, Л.К.** Обеспечение 95%-ной вероятности с 95%-ной надежностью выполнения проектных ограничений // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: матер. 6-й МНТК. – Подольск. 2009.
8. Статистическое представление данных. Определение статистических толерантных интервалов: ГОСТ Р ИСО 16269-6–2005. Утв. Приказом федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30.06.2005 №171-ст. – М.: Стандартинформ, 2005.
9. Analysis of differences in fuel safety criteria for WWER and PWR nuclear power plants IAEA-TECDOC-1381. – Vienna : International Atomic Energy Agency, 2003.
10. Экспериментальное обоснование теплогидравлической надежности реакторов ВВЭР / С.А. Логвинов [и др.]. – М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. – 255 с.
11. **Ray, S.** Westinghouse advanced statistical DNBR methodology – the Revised Thermal Design Procedure / S. Ray, A.J. Friedland // NPTHO. 1988.
12. **Bourteele, J.P.** The Framatome generalized statistical DNBR method (MSG) / J.P. Bourteele, J. Greige, M. Missaglia // NURETH-6. – Grenoble, 1993.
13. Application of a Statistical Thermal Design Procedure to evaluate the PWR DNBR safety analysis limits / J. Robeyns [et al.] // Icone 9. – Nice, 2001.
14. **Han K. I.** Technical Review on Statistical Thermal Design of PWR Core // J. of the Korean Nuclear Society. 1984. V. 16. №. 1.
15. Statistical Combination of Uncertainties / Combustion engineering topical report // CEN-123(F)-NP, Part 1,2,3. – 1979-1980.
16. Нормы и правила атомной энергетики. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций: ПНАЭ Г-01-011-97 (ОПБ - 88/97). Утв. постановлением Госатомнадзора России от 14.11.1997. – М., 1998.
17. Уточнение вероятностного учета локальных отклонений при определении теплотехнических запасов в активной зоне из ТВСА ВВЭР-1000 / А.А. Фальков [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: материалы Междунар. научно-технич. конф. – Подольск, 2005.

Дата поступления
в редакцию 29.04.2014

S.M. Dmitriev, A.A. Barinov, V.E. Borodina, A.E. Khrobostov

**ON THE ISSUE OF CORE COOLING RELIABILITY SUBSTANTIATION
METHODOLOGY FOR THE PRESSURIZED WATER REACTORS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The main purpose of the paper is to perform the systematization and overview of the core cooling reliability characteristics estimation experience.

Methodology/approach: The paper present the main points of domestic and foreign approaches. Several publication and studies were taken as the basis for the paper. The study performed the comparison of different approaches and methods of substantiation of core cooling reliability.

Research limitations/implications: To make it possible authors systematize gathered material to be divided into groups corresponding the generally accepted classifications. The content of the paper discuss the keystone criteria of domestic and foreign regulatory requirements and their significance in the design of nuclear power plants.

Findings/originality/value: Besides that authors pointed several ways of present approaches development. As a result of the study authors conclude, that problem of unnecessary conservatism elimination can be resolved by combination of the world-wide experience and application of the methods on the cutting edge of the science.

Key words: core-cooling reliability, thermal-hydraulic design, departure from nucleate boiling, statistical methods, deterministic approach.

УДК 621.372.8

Н.А. Новоселова, Л.Г. Рудоясова

О ПОСТАНОВКЕ ДИСПЕРСИОННЫХ ЗАДАЧ СЛОИСТЫХ СФЕРИЧЕСКИХ ВОЛНОВОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дается постановка дисперсионных задач волн сферического двухслойного волновода. Дисперсионные уравнения составлены для случаев однородного и неоднородного внешнего слоя. Полученные уравнения позволяют исследовать, в частности, волны тропосферных волноводов.

Ключевые слова: дисперсионная задача, слоистый сферический волновод, комплексные волны, тропосферный слой.

Рассмотрение слоистых сферических волноводов представляет интерес в плане исследования волновых процессов в тропосфере. Тропосферный волновод можно рассматривать как открытый слоистый сферический волновод. Краевая задача, описывающая волны такого волновода, является несамосопряженной. В том случае, когда среды, образующие волновод, являются диссипативными, несамосопряженность краевой задачи следует [1,2] из нетождественности дифференциальных уравнений прямой и сопряженной задач. В том случае, когда параметры ε и μ сред, образующих волновод, являются действительными величинами, несамосопряженность краевой задачи является следствием несовпадения числа граничных условий прямой и сопряженной задач [1-4]. При этом в случае угловой симметрии поля такое несовпадение получается, если не накладывать на решение задачи нулевое условие на бесконечности.

Рассмотрим открытый двухслойный сферический волновод (рис. 1). Диэлектрическая проницаемость внешнего слоя является функцией радиальной координаты и частоты.

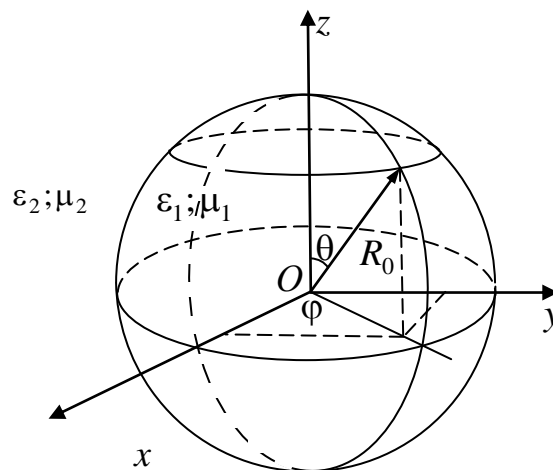


Рис. 1

Будем исследовать волны с комплексными волновыми числами. Если нет диссипации энергии (когда параметры ε и μ сред, образующих волновод, считаются действительными величинами), такие волны называются комплексными [1, 2]. В дальнейшем будем обозначать их как КВ.

Математический аппарат и полученные с помощью него результаты можно перенести

на тропосферные волноводы с соответствующими зависимостями $\varepsilon(r, \omega)$ в среде, окружающей Землю.

В сферическом волноводе, образованном шаром радиуса R_0 с $\varepsilon = \varepsilon_1 = \text{const}$ (рис. 1), и внешней неограниченной средой, диэлектрическая проницаемость которой в общем случае $\varepsilon = \varepsilon(r, \omega)$, могут распространяться волны, имеющие при отсутствии зависимости от координаты φ компоненты поля: E_φ , H_r , H_θ . В этом случае компонента электрического поля удовлетворяет уравнению Гельмгольца, которое в сферической системе координат при $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$ имеет вид

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\sin \theta \frac{\partial E_\varphi}{\partial \theta} \right) + k^2 E_\varphi = 0, \quad (1)$$

где $k^2 = \varepsilon(r, \omega) \mu \omega^2$.

Записывая решение уравнения (1) как $E_\varphi(r, \theta) = R(r)T(\theta)$, после разделения переменных, получаем:

$$\frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + (k^2 r^2 - \gamma) R = 0; \quad (2)$$

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{dT}{d\theta} \right) + \gamma T = 0. \quad (3)$$

Взяв постоянную разделения в виде $\gamma = \nu(\nu+1)$, где ν – любое, в том числе комплексное, число, уравнению (3) переписываем в виде

$$(1-x^2) \frac{d^2 T}{dx^2} - 2x \frac{dT}{dx} + \nu(\nu+1) T = 0, \quad (4)$$

где введено обозначение $x = \cos \theta$.

Уравнение (4), называемое уравнением Лежандра [5], имеет решение

$$T(x) = P_\nu^{(0)}(x) + C Q_\nu^{(0)}(x), \quad (5)$$

представляющее собой линейную комбинацию функций Лежандра 1- и 2-го рода.

Интересуясь в нашем случае волнами, бегущими в направлении θ , берем постоянную интегрирования $C = \pm i \frac{2}{\pi}$. При этом решение уравнения (3) принимает вид

$$T(\cos \theta) = T_0 \frac{\Gamma(\nu+1)}{\Gamma\left(\nu + \frac{3}{2}\right)} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{1}{2}\right)^k (\nu+1)^k}{k! \left(\nu + \frac{3}{2}\right)^k} e^{\pm i(\nu+2k+1)\theta}. \quad (6)$$

В этом случае величина ν имеет смысл постоянной распространения волны в направлении θ при любой зависимости $\varepsilon(r, \omega)$ во внешней области $r > R_0$.

Вид решений уравнения (2) определяется функцией диэлектрической проницаемости внешней области $\varepsilon_2(r, \omega)$, которая может быть частотно зависимой комплексной величиной.

Рассмотрим два варианта внешней среды, образующей вместе с однородным диэлектрическим шаром слоистый диэлектрический волновод.

Вариант 1: внешняя среда однородная: $k_2 = \omega\sqrt{\varepsilon_2\mu_2} \neq k_2(r)$.

Записав решение уравнения (2) в виде $R(r) = \frac{w(r)}{\sqrt{r}}$, приходим к уравнению Бесселя:

$$\frac{d^2w}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw}{dr} + \left[k^2 - \frac{\left(v + \frac{1}{2}\right)^2}{r^2} \right] w = 0 \quad (7)$$

относительно функции $w(r)$. Решением уравнения (7) являются цилиндрические функции

$$w(r) = Z_{\nu+\frac{1}{2}}(kr), \quad (8)$$

которые описывают радиальную зависимость поля как во внутренней, так и во внешней областях рассматриваемой структуры. Из условия ограниченности поля при $r \rightarrow 0$ во внутренней области в качестве решения (8) берем функцию Бесселя $w(r) = AJ_{\nu+\frac{1}{2}}(k_1r)$.

Во внешней области в предположении того, что при комплексном значении ε_2 волны должны удовлетворять условию излучения, в качестве решения (8) берем функцию Ханкеля 2-го рода $w(r) = BH_{\nu+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_2r)$. Здесь $k_{1,2} = \omega\sqrt{\varepsilon_{1,2}\mu_{1,2}}$ – постоянные распространения плоских волн в соответствующих однородных средах.

Выражая компоненты поля через найденные решения уравнения (1) и подставляя их в граничные условия $E_{\varphi_1}(r=R_0) = E_{\varphi_2}(r=R_0)$; $H_{\theta_1}(r=R_0) = H_{\theta_2}(r=R_0)$, получаем систему двух линейных однородных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов A и B .

Запись условия нетривиальности решений указанной системы с учетом одинаковой зависимости полей во внутренней и внешней областях от угловой координаты θ приводит к дисперсионному уравнению

$$\frac{1}{\mu_2} J_{\nu+\frac{1}{2}}(k_1R_0) Q(\nu, k_2R_0) - \frac{1}{\mu_1} H_{\nu+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_2R_0) P(\nu, k_1R_0) = 0, \quad (10)$$

где

$$P(\nu, k_1R_0) = \frac{1}{2} J_{\nu+\frac{1}{2}}(k_1R_0) + k_1R_0 J'_{\nu+\frac{1}{2}}(k_1R_0);$$

$$Q(\nu, k_2R_0) = \frac{1}{2} H_{\nu+\frac{1}{2}}^{(2)}(k_2R_0) + k_2R_0 H_{\nu+\frac{1}{2}}^{(2)'}(k_2R_0).$$

Вариант 2: диэлектрическая проницаемость внешней среды является функцией радиальной координаты $\varepsilon_2 = \varepsilon \frac{R_0}{r}$. При этом, если $\varepsilon \neq \varepsilon_1$, на границе $r = R_0$ имеет место скачок диэлектрической проницаемости.

Радиальная зависимость поля во внутренней области так же, как и в 1-м варианте, описывается уравнением (7), в котором полагаем $v = v_1$. Функция $w(r)$, описывающая радиальную зависимость поля во внешней области, удовлетворяет уравнению

$$\frac{d^2 w_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dw_2}{dr} + \left(\varepsilon \frac{R_0}{r} \mu_2 \omega^2 - \frac{4\gamma + 1}{4r^2} \right) w_2 = 0, \quad (11)$$

в котором $\gamma = v_1(v_1 + 1)$.

Полагая $4\gamma + 1 = v_2^2$, решение уравнения (11) записываем в виде

$$w_2 = Z_{v_2}(2\sqrt{\alpha r}), \quad (12)$$

где Z_{v_2} – цилиндрическая функция; $\alpha = \varepsilon_0 R_0 \mu_2 \omega^2$. В этом случае функция, описывающая угловую зависимость поля во внешней области, должна удовлетворять уравнению

$$(1 - x^2) \frac{d^2 T}{dx^2} - 2x \frac{dT}{dx} + \frac{v_2^2 - 1}{4} T = 0. \quad (13)$$

Чтобы угловая зависимость поля в обеих областях была одинаковой, необходимо совпадение решений уравнений (4) и (13). Только в этом случае поля в обеих областях в направлении θ будут распространяться с одинаковыми скоростями, что обеспечит выполнение условия непрерывности на границе $r = R_0$ их тангенциальных компонент. Решения указанных уравнений будут совпадать при выполнении равенства $v_1(v_1 + 1) = \frac{v_2^2 - 1}{4}$, из которого следует связь постоянной распространения $v = v_1$ с индексом цилиндрической функции (12), описывающей радиальную зависимость поля во внешней среде: $v_2 = \sqrt{4v_1(v_1 + 1) + 1}$.

Взяв в качестве функции, описывающей радиальную зависимость поля во внутренней области, функцию Бесселя $w_1(r) = A J_{v_1 + \frac{1}{2}}(k_1 r)$, во внешней области – функцию Ханкеля $Z_{v_2}(2\sqrt{\alpha r}) = H_{v_2}^{(2)}(2\sqrt{\alpha r})$, обеспечивающую при наличии во внешней среде потерь выполнение условия излучения, имеем:

$$\begin{aligned} E_{\varphi_1} &= \frac{A}{\sqrt{r}} J_{v_1 + \frac{1}{2}}(k_1 r) T(\cos \theta); \\ E_{\varphi_2} &= \frac{B}{\sqrt{r}} H_{v_2}^{(2)}(2\sqrt{\alpha r}) T(\cos \theta). \end{aligned} \quad (14)$$

Из граничных условий (9) так же, как и в предыдущем варианте, получаем дисперсионное уравнение волн открытого двухслойного сферического волновода:

$$\frac{1}{\mu_2} J_{v_1 + \frac{1}{2}}(k_1 R_0) Q(v_2, \alpha R_0) - \frac{1}{\mu_1} H_{v_2}^{(2)}(2\sqrt{\alpha R_0}) P(v_1, k_1 R_0) = 0,$$

где

$$P(v_1, k_1 R_0) = \frac{1}{2} J_{v_1 + \frac{1}{2}}(k_1 R_0) + k_1 R_0 J'_{v_1 + \frac{1}{2}}(k_1 R_0);$$

$$Q(\nu_2, \alpha R_0) = \frac{1}{2} H_{\nu_2}^{(2)}(2\sqrt{\alpha R_0}) + \sqrt{\alpha R_0} H_{\nu_2}^{(2)'}(2\sqrt{\alpha R_0}).$$

Полученные дисперсионные уравнения позволяют исследовать волны двухслойного сферического волновода. Во втором варианте задачи, когда среда полагается неоднородной, направляющая структура может рассматриваться как модель тропосферного волновода. Волновые числа $\nu_{1,2}$ могут быть комплексными величинами и соответствовать различным типам КВ. В первом варианте при действительном k_2 во внешней области образуется поле излучения. Во втором варианте в зависимости от знака мнимой части величины $\sqrt{\alpha}$ могут образовываться поля как собственных, так и несобственных комплексных волн. При $I_m \sqrt{\alpha} > 0$ это поля несобственных КВ, при $I_m \sqrt{\alpha} < 0$ – собственных.

Библиографический список

1. **Веселов, Г.И.** Слоистые метало-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.
2. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 223 с.
3. **Наймарк, М.А.** Линейные дифференциальные операторы / М.А. Наймарк. – М.: Наука, 1969. – 526 с.
4. **Веселов, Г.И.** Комплексные волны в поперечно-неоднородных направляющих структурах / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника. 1987. Т. 42. № 8. С. 64–67.
5. **Кузнецов, Д.С.** Специальные функции / Д.С. Кузнецов. – М.: Высш. шк., 1965. – 423 с.

Дата поступления
в редакцию 06.05.2014

N.A. Novoselova, L.G. Rudoyasova

ON STATEMENT OF THE DISPERSION TASKS LAYERED SPHERICAL WAVEGUIDES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Give staging dispersion tasks spherical waves of a two-layer waveguide.

Methodology/approach: Make the dispersion equation for the cases of homogeneous and inhomogeneous external layer.

Findings: The obtained dispersion equation allow us to study the wave of double-layer spherical waveguide. The obtained dispersion equation allow us to study the wave of double-layer spherical waveguide. In the second variant of the task when the environment relies heterogeneous, guiding structure can be considered as a model of the tropospheric waveguide.

Originality/value: Consideration of layered spherical waveguides is of interest in studies of wave processes in the troposphere. In the General case tropospheric waveguide can be regarded as an open, layered spherical waveguide. Boundary value problem, describing the wave of such waveguide is несамосопряженной.

Key words: dispersion task, layered spherical waveguide, complex wave, tropospheric layer.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.1.032.1

Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач, И.А. Смирнов, С.А. Бекетов

ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ БЫСТРОХОДНОСТИ ГУСЕНИЧНЫХ МАШИН ТРАНСПОРТНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Предложены перспективы развития систем поддрессоривания гусеничных машин с целью повышения быстроходности. Представлены современные методы определения характеристик традиционных подвесок. Показано, что добиться дальнейшего повышения быстроходности можно, используя нетрадиционные системы поддрессоривания (управляемые, многоуровневые и связанные подвески), а также применяя управление углом складывания секций двухзвенных гусеничных машин.

Ключевые слова: гусеничная машина, быстроходность, плавность хода, система поддрессоривания, подвеска.

Стремление повысить быстроходность гусеничной техники гражданского и военного назначения заставляет обращать внимание разработчиков на такой аспект, как увеличение средней скорости движения машин. Как известно, максимальная скорость движения машины – величина ограниченная, которая определяется условиями движения и техническими характеристиками транспортной гусеничной машины (ТГМ). Ограничения скорости движения зависят от дорожных условий и определяются тяговой характеристикой машины, управляемостью и плавностью хода [1]. Увеличение удельной мощности современных машин и совершенствование механизмов поворота позволили снять ряд ограничений. В этой связи проблема повышения эффективности систем поддрессоривания ТГМ с целью обеспечения требуемой скорости движения по неровностям является актуальной.

Основные подходы при выборе характеристик элементов традиционной системы поддрессоривания ТГМ, когда амортизатор устанавливается между корпусом и катком без упругих связей, известны и широко представлены в литературе [1, 2]. При увеличении веса ТГМ подвеска становится все более нагруженной. Демпфирующие элементы требуют реализации больших усилий на прямом ходе подвески, что приводит к увеличению вертикальных ускорений «тряски». В данной ситуации, когда конструктор должен обеспечить высокую плавность хода во всем частотном диапазоне воздействий на ТГМ со стороны неровностей местности, тяжелые ТГМ (свыше 40 т), обладающие традиционной системой поддрессоривания, имеют средние скорости движения по неровностям местности около 20 км/ч. Дальнейшее повышение средней скорости требует применения нетрадиционных систем поддрессоривания – управляемых или многоуровневых подвесок. Кратко рассмотрим перспективы использования таких систем поддрессоривания.

В настоящее время известны два основных направления в развитии систем регулирования сил в подвеске наземной транспортной техники – это активное и пассивное управление силами в упругом и (или) демпфирующем элементах системы поддрессоривания машины. Активные системы подразумевают использование внешнего достаточно мощного источника энергии для осуществления управления сил, тогда как в системах с пассивным управлением он отсутствует.

Отрицательной стороной управляемых систем поддрессоривания в сравнении с не-

управляемыми подвесками являются значительно большее потребление энергии (для активных систем) и большая стоимость системы. Поэтому рациональность применения требует от управляемой подвески высокой эффективности при всех возможных режимах движения машины, что подразумевает использование обоснованной конструктивной схемы и соответствующего рационального закона управления, настраивающего систему для решения задач, связанных не только с обеспечением плавности хода, но также с обеспечением управляемости, работоспособности вооружения и т.д.

В связи с необходимостью использования дополнительного источника энергии, активные системы поддрессоривания пока не нашли применения в конструкциях ТГМ. На колесной технике активные системы поддрессоривания в основном используются для борьбы с низкочастотными продольно-угловыми и поперечно-угловыми колебаниями кузова.

Анализируя литературу, посвященную управляемым системам поддрессоривания, можно сделать вывод, что для ТГМ целесообразно использовать пассивную систему поддрессоривания с управляемым демпфированием. Причем достаточно два уровня демпфирования прямого хода: «низкий уровень» - штатное демпфирование, обеспечивающее допустимые ускорения «тряски», и «высокий уровень» в 3 раза больше штатного, обеспечивающий допустимые перегрузки ТГМ при движении по периодическим неровностям в резонансном режиме по продольно-угловым колебаниям корпуса. На обратном ходе подвески управлять демпфированием нецелесообразно.

Управление двухуровневым демпфированием может быть со статическим - адаптивным и с динамическим законом управления. При динамическом управлении наиболее эффективно управлять по скорости продольно-угловых колебаний корпуса ТГМ.

Управляемая система поддрессоривания требует использования блоков управления – контроллеров, датчиковой аппаратуры и т.д., что усложняет систему и снижает ее надежность. Но существуют системы, которые без специального управления позволяют обеспечить требуемое гашение колебаний в резонансной области без повышения ускорений «тряски» в зарезонансной области. Это многоуровневые системы поддрессоривания.

В подвесках ТГМ в качестве опытных образцов были выполнены двухуровневые системы поддрессоривания, наиболее известной из которых является релаксационная подвеска. Подвеска релаксационного типа имеет два упругих элемента и амортизатор [1]. Один упругий элемент включен между корпусом и катком последовательно с амортизатором и образует с ним релаксационный элемент. Второй упругий элемент соединяет корпус и каток параллельно релаксационному элементу и выполняет роль основного упругого элемента подвески. Наличие двух упругих элементов и схожесть свойств релаксационной подвески со свойствами других вариантов многоуровневых подвесок позволяет ее также отнести к многоуровневым системам поддрессоривания. Эквивалентная схема подвески релаксационного типа представлена на рис. 1, а.

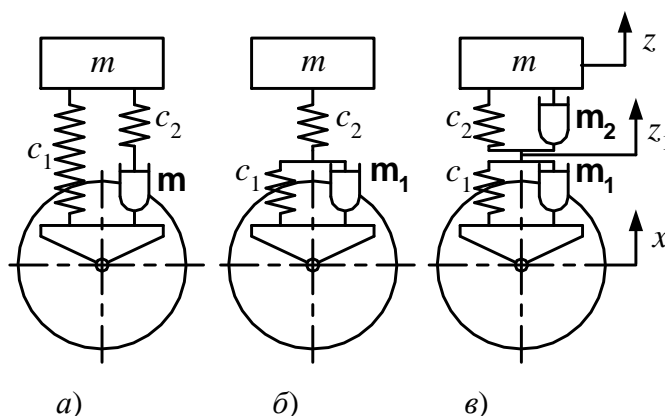


Рис. 1. Эквивалентные схемы одноопорных подвесок:

а, б – релаксационная с параллельным и последовательным соединением дополнительного упругого элемента соответственно; в – фрактальная двухуровневая

Следующим примером многоуровневых подвесок является так называемая фрактальная подвеска, которая состоит из ряда последовательно соединенных упругодемпфирующих элементов. На рис. 1, в представлена эквивалентная схема фрактальной двухуровневой подвески. Фракталом называется структура, состоящая из частей, которые в каком-то смысле подобны целому. Так как каждый дробный элемент фрактальной подвески подобен всей подвески в целом, авторы статей [3, 4] выбрали именно эту терминологию для обозначения таких подвесок.

Если во фрактальной двухуровневой подвеске убрать демпфирующий элемент, соответствующий упругому элементу большей жесткости, то ее эквивалентная схема примет вид, представленный на рис. 1, б. Такую подвеску также называют релаксационной с последовательным соединением дополнительного упругого элемента.

Существуют элементы системы подрессоривания ТГМ, которые по своим характеристикам могут быть названы устройствами фрактального типа (рис. 2). Ввиду того, что в многоуровневых системах подрессоривания на различных частотах работают разные упругодемпфирующие элементы, машина, оснащенная такой подвеской, способна двигаться в самых разнообразных дорожных условиях с высокой плавностью хода. Теории разработки таких конструкций посвящены работы [3-8].

В работах [7, 8] показано, что для ТГМ достаточно двухуровневой подвески, причем демпфирование, соответствующие упругому элементу высокой жесткости, должно быть минимальным. Выбор характеристик многоуровневых систем подрессоривания целесообразно проводить с использованием имитационного математического моделирования движения ТГМ по неровностям местности.

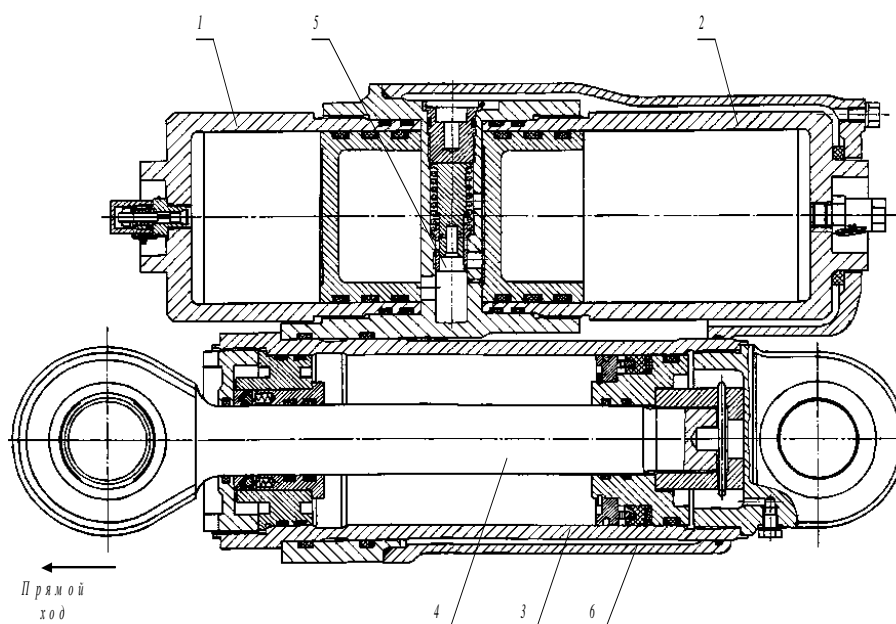


Рис. 2. Конструкция ПГР с двумя ступенями давления:

1 - пневмоцилиндр высокой жесткости; 2 - пневмоцилиндр низкой жесткости; 3 - гидроцилиндр;
4 - шток с поршнем; 5 - дросселирующая система; 6 - кожух рубашки охлаждения рессоры

Развитие современных ТГМ военного назначения идет по пути наращивания огневой мощи и защищенности. Это ведет к неуклонному повышению их массы. При ограничении по допустимому давлению на грунт конструкторы вынуждены увеличивать опорную поверхность ТГМ. При двухступенчатой схеме ТГМ такое увеличение ограничивается шириной машины, предельная величина которой определяется транспортными габаритами (т.е. возможностью перевозки железнодорожным транспортом), и длиной по предельно допустимым значениям поворотливости. Известно, что машина с протяжной опорной поверхностью при прочих равных условиях обладает худшей маневренностью.

В этой связи как в нашей стране, так и за рубежом ведутся теоретические разработки по применению двухзвенных гусеничных машин (ДГМ) в качестве ТГМ военного назначения, а именно, как базы для создания целого семейства боевых гусеничных машин. Кроме того, при решении транспортных проблем в районах с тяжелыми дорожными условиями (при освоении районов богатых сырьевыми ресурсами, обслуживания газо- и нефтепроводов, линий электропередачи, решении задач, связанных с ликвидацией чрезвычайных ситуаций) находят широкое применение двухзвенные гусеничные транспортеры, которые также широко используются по военной тематике. На рис. 3 представлены двухзвенные гусеничные транспортеры гражданского и военного назначения семейства «Витязь» и «Вездесущий».



Рис. 3. Двухзвенные гусеничные транспортеры:
а - ДТ-10П семейства «Витязь»; б - ДТ-10ПМ семейства «Вездесущий»

Двухзвенные гусеничные машины обладают рядом свойств, обеспечивающих им преимущество, перед обычными ТГМ. Большинство этих свойств связано с особым способом поворота ДГМ путем принудительного регулирования направления скоростей элементов движителя, изменением их взаимного положения. Кроме этого, возможность обеспечения высоких тягово-сцепных показателей, лучшие характеристики профильной проходимости за счет принудительного складывания секций в вертикальной плоскости, хорошая приспособляемость секций к рельефу местности в поперечной плоскости и, как следствие, более равномерное распределение вертикальных нагрузок по длине опорной поверхности – все это в комплексе позволяет считать ДГМ наилучшим по проходимости транспортным средством среди колесных и гусеничных машин.

В настоящее время максимальные скорости отечественных ДГМ, как правило, не превышают 30–40 км/ч. Однако, вследствие расширения их областей применения наметилась тенденция увеличения скорости движения. В связи с тем, что ДГМ, по сравнению с однозвенной ТГМ, имеет больший объем корпуса, в котором можно разместить силовую установку необходимой мощности, ограничения по силе тяги, оказывающие существенное влияние на среднюю скорость однозвенной ТГМ, здесь уходят на второй план и существенными становятся ограничения по плавности хода.

На плавность хода ДГМ оказывают значительное влияние не только характеристики системы подрессоривания, но и узел сочленения. Причем эффективность гидроцилиндра вертикального складывания ДГМ по гашению продольно-угловых колебаний больше, по сравнению с гидравлическими амортизаторами подвески. Также конструкция ДГМ позволяет преодолевать неровности местности их огибанием за счет управления углом складывания звеньев в вертикальной плоскости [8-10]. Закон управления ГЦВС определяет текущий угол складывания по средним отклонениям ходов катков двух секций ДГМ от статического положения.

Еще один способ снижения пиковых значений давления на грунт - применение БГМ со связанной системой подрессоривания. Известно, что по конструктивному признаку подвески транспортных машин можно разделить на независимые (индивидуальные) и связанные (зависимые) подвески. Под независимыми подвесками понимают такие системы, у которых силы, действующие от катков на подрессоренный корпус, не имеют между собой явной связи. Под

связанными системами поддресоривания понимают такие системы, у которых силы, действующие от катков на поддресоренный корпус, имеют между собой явную связь (рис. 4). При этом связь между силами может быть полная, если все катки системы связаны между собой, или неполная, если часть катков системы связана между собой, а остальные подвески независимые.

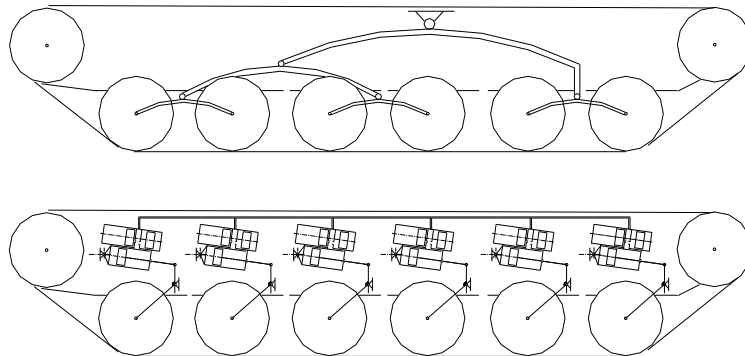


Рис. 4. Связанные системы поддресоривания с баланси́рной (вверху) и гидравлической связью (внизу)

В связанных системах поддресоривания силы в подвеске определяются не только ходом и скоростью хода катка данной подвески, но ходом и скоростью хода катков всех остальных подвесок, связанных с ней. Связанные подвески, в отличие от независимых, позволяют получить более равномерную эпюру давления под катками ТГМ, уменьшить угловые и вертикальные колебания корпуса машины при движении по неровностям. Однако такие подвески более чувствительны к силовому воздействию при разгоне и торможении машины, имеют более сложную конструкцию и большую уязвимость подвески.

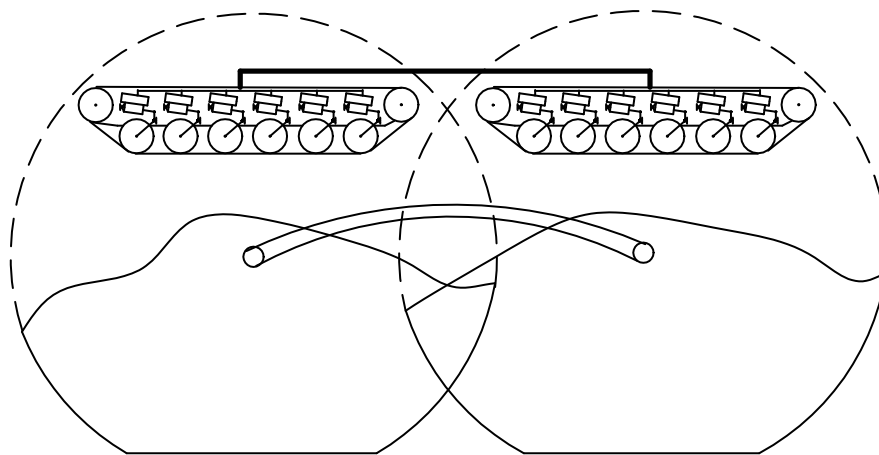


Рис. 5. Двухзвенная гусеничная машина со связной системой поддресоривания в пределах одного борта секции и жесткой связью в узле сочленения

Связанные системы поддресоривания танков широко стали применяться после первой мировой войны. Но с появлением надежной независимой торсионной подвески связанные системы поддресоривания в отечественном танкостроении использоваться перестали. С развитием пневмогидравлических систем поддресоривания и возможностью осуществить гидравлическую связь между подвесками, конструктора снова стали обращать внимание на связанные системы поддресоривания. Одновременно проводились и теоретические исследования в области связанных систем поддресоривания.

Теоретически наибольший выигрыш с точки зрения плавности хода и равномерности распределения давления на опорную поверхность даст система поддресоривания с полной связью

по всем упругим элементам катков одного борта. Однако одиночная ТГМ с такой подвеской будет неустойчива к силовому возмущению в продольной плоскости. Для ДГМ при наличии жесткой связи в узле сочленения такой вариант возможен. Две секции ДГМ в данном случае можно рассматривать как тележку на двух колесах большого диаметра (рис. 5). Такая система будет устойчива к силовому возмущению, а давление на грунт будет наиболее равномерным. Такая конструкция еще больше повысит проходимость ДГМ на слабонесущих грунтах.

Но современные ДГМ не имеют в узле сочленения жесткой связи в продольной вертикальной плоскости. Эта связь может быть наложена путем принудительного складывания секций ДГМ в продольной вертикальной плоскости во время движения. То есть необходимо управлять углом складывания секций ДГМ, например, по закону, предложенному в [8-10], с целью приспособляемости секций ДГМ к рельефу местности, повышения плавности хода и, как следствие, быстроходности ДГМ.

Библиографический список

1. **Дмитриев, А.А.** Теория и расчет нелинейных систем поддресоривания гусеничных машин / А.А. Дмитриев, В.А. Чобиток, А.В. Тельминов. – М.: Машиностроение, 1976. – 207 с.
2. **Дядченко, М.Г.** Конструкция и расчет подвесок быстроходных гусеничных машин: учеб. пособие / М.Г. Дядченко, Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. – 40 с.
3. **Moreau, X.** Comparison of LQ and CRONE methods for the design of suspension systems / X. Moreau, A. Ostaloup, M. Nouillant // 13th IFAC World Congress. – San Francisco (USA), 1996. P. 62–67.
4. **Oustaloup, A.** The CRONE suspension / A. Oustaloup, X. Moreau, M. Nouillant // Control Engineering Practice: Journal of the International Federation of Automatic Control. 1996. V. 4. № 8. P. 1101–1108.
5. **Дмитриев, А.А.** Теория и расчет линейной релаксационной системы поддресоривания // Вопросы поддресоривания танка и бронетранспортера. 1959. С. 46–76.
6. **Сарач, Е.Б.** Определение соотношения жесткостей упругих элементов фрактальной двухуровневой системы поддресоривания быстроходной гусеничной машины // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Машиностроение. 2010. № 1. С. 102–108.
7. **Сарач, Е.Б.** Метод синтеза многоуровневых систем поддресоривания быстроходных гусеничных машин / Е.Б. Сарач, Г.О. Котиев // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 4. С. 24–29.
8. **Котиев, Г.О.** Комплексное поддресоривание высокоподвижных двухзвенных гусеничных машин / Г.О. Котиев, Е.Б. Сарач. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – 184 с.
9. **Котиев, Г.О.** Повышение подвижности двухзвенной гусеничной машины управлением углом складывания секций в вертикальной плоскости во время движения [Электронный ресурс] // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2010. Вып. 1 №0420900025\0006. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/113356.html>.
10. **Сарач, Е.Б.** Оценка эффективности метода повышения быстроходности двухзвенной гусеничной машины, использующего управление углом складывания секций в вертикальной плоскости во время движения [Электронный ресурс] // Электрон. журн. «Наука и образование: электронное научно-техническое издание», 2010. Вып. 5 №0420900025\0006. – Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/113356.html>.

*Дата поступления
в редакцию: 22.04.2014*

G. Kotiev, E. Sarach, I. Smirnov, A. Filev

PROSPECTS OF INCREASE OF RAPIDITY OF TRANSPORT TRACKED VEHICLES

Bauman Moscow state technical university

In this article prospects of development of suspension system of tracked vehicles for the purpose of rapidity increase are offered. Modern methods of definition of characteristics of traditional suspension system are presented. Nonconventional solutions are proposed.

Key words: high-mobility tracked vehicles, suspension system, rapidity increase.

УДК 629.1.032.1

А.В. Морозов, А.А. Котровский, А.В. Филёв

**ВЫБОР МЕТОДА КОМПЛЕКСНОГО СРАВНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ
АВТОБРОНЕТАНКОВОЙ ТЕХНИКИ НА ЭТАПЕ ПРОЕКТИРОВАНИЯ**

Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана

Рассмотрены предпосылки использования комплексных методов сравнения в области объектов АБТТ. Приведены примеры методов комплексного сравнения и проведен их анализ. Сформулирован перечень критериев, которым должен удовлетворять метод сравнения. Представлен метод, наиболее удовлетворяющий выдвинутым критериям. Приведён перечень работ, в которых был использован предложенный метод.

Ключевые слова: автобронетанковая техника, комплексное сравнения, метод анализа иерархий.

Объекты автобронетанковой техники (АБТТ), такие как танки, БМП, БТР и машины на их базе, являются сложными техническими системами со значительным количеством ограничений и обратных связей. В связи с этим при внесении изменений в конструкцию узла, отвечающего за один показатель, меняются характеристики другого показателя. Под свойствами любого технического изделия (объекта АБТТ) понимаются его объективные особенности, проявляющиеся при создании и эксплуатации. Характеристика одной из сторон свойства – это показатели. Каждое свойство характеризуется определёнными показателями, которые могут иметь как количественную, так и качественную характеристики [1].

Для оценки влияния вносимых изменений на машину в целом используются методы комплексного сравнения. Выбор наиболее рационального варианта осуществляется на основании обобщённых оценок, полученных в результате комплексного сравнения аналогичных по своим свойствам прототипов. Рассмотренные методы были классифицированы по названию обобщённых оценок.

Первый метод. Обобщённой оценкой метода является коэффициент боевой эффективности [2].

$$K_{БЭ} = \sqrt{K_{ОМ} K_{Ж} K_{П}},$$

где $K_{ОМ}$ – показатели оценки: огневой мощи; $K_{Ж}$ – живучести; $K_{П}$ – подвижности.

Эта методика была разработана для быстрой оценки эффективности прорабатываемых конструкций объектов АБТТ на стадии проектирования. Оценка эффективности по этой методике производится путём сравнения параметров проектируемого образца с параметрами эталонной машины. При оценке общей эффективности объекта предусмотрена оценка военно-экономической эффективности, которая зависит как от коэффициента боевой эффективности, так и стоимости объекта в серийном производстве. Каждое из основных свойств объекта выражается коэффициентами k_i , отражающими качество параметров объекта АБТТ.

Зависимость между коэффициентом и величиной параметра получают аналитически или в результате обработки экспертных оценок. При этом графики, полученные обработкой экспертных оценок, представляют собой нелинейные зависимости, что указывает на учёт значимости увеличения или уменьшения того или иного параметра на общую эффективность объекта. Примеры зависимостей некоторых коэффициентов приведены на рис. 1.

Для определения зависимости аналитическим путём для каждого коэффициента существует своя методика. Так, для определения комплексного коэффициента системы стрельбы необходимо по значениям ошибок стрельбы найти суммарные горизонтальные и вертикальные составляющие ошибок:

$$E_{ГВ} = \sqrt{[E_{Т.р}^2 + E_{Виб}^2 + E_{Т.п}^2 + E_{П.у}^2 + E_{н}^2]}, \text{ где}$$

где ошибки: $E_{Гi}$ – стрельбы по горизонтали; $E_{Т.р}^2$ – техническое рассеивание; $E_{виб}^2$ – вибрации; $E_{Т.п}^2$ – технической подготовки; $E_{п.у}^2$ – подготовки исходных установок; $E_{Т.р}^2$ – наведения.

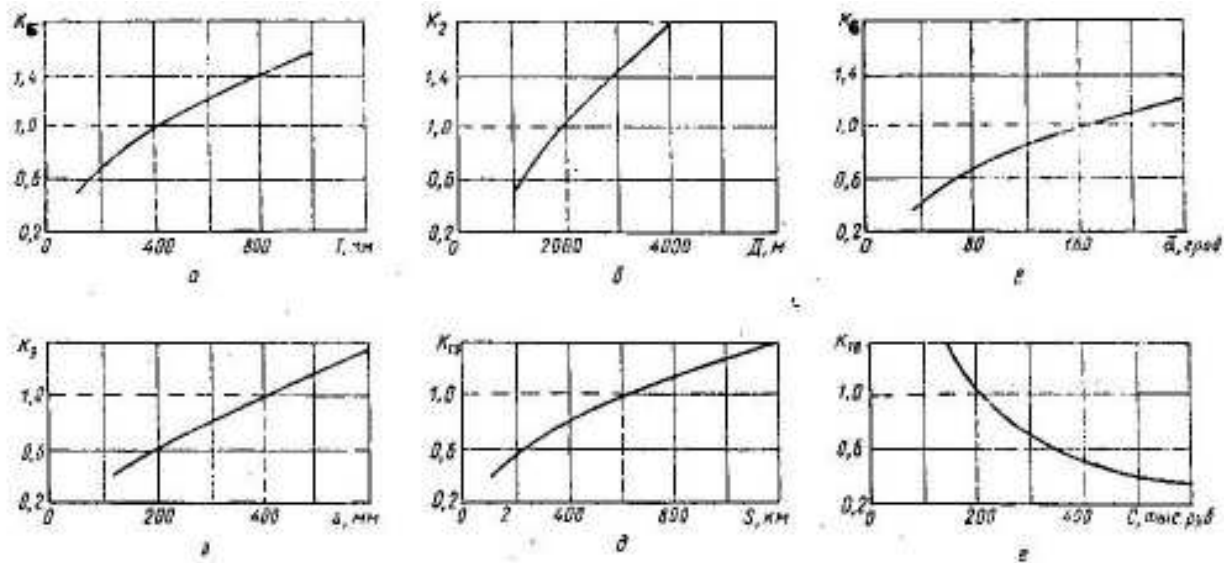


Рис. 1.6. Графические зависимости коэффициентов качества

По полученным значениям $E_{Гi}$ и $E_{Ви}$ и дальности стрельбы по конкретным мишеням находятся вероятности попадания P . Далее, используя вероятность попадания и коэффициент бронепробития, определяется поток поражающих выстрелов. Комплексный коэффициент системы стрельбы вычисляется как отношение потоков поражающих выстрелов сравниваемого объекта с эталонным: $K_1 = \rho / \rho_{Э}$. Для определения остальных коэффициентов могут использоваться приведённые зависимости или эмпирические формулы, полученные для каждого коэффициента в отдельности.

Рассмотренный метод предназначен для сравнения объектов, используя минимальный перечень параметров, что ограничивает его применение для более широкого исследования. Вместе с тем, использование метода представляет собой достаточно трудоёмкую задачу, что вызвано необходимостью для каждого нового объекта составлять аналитические зависимости или проводить экспертную оценку, а также разрабатывать эмпирические зависимости для получения одного коэффициента по нескольким параметрам.

Второй метод. Обобщённой оценкой метода является боевой потенциал объекта боевой системы:

$$P_O = F(S),$$

где P_O – боевой потенциал объекта; S – множество свойств боевой системы.

С помощью данного метода можно получить интегральную оценку боевых возможностей боевых систем и группировок войск (сил) по решению боевых задач в соответствии со своим функциональным назначением по четырём боевым свойствам (мобильность, живучесть, ударная мощь, управление). В ходе оценки учитываются весовые коэффициенты свойств. Однако в связи с тем, что при сравнении объектов не учитываются эксплуатационные свойства, использование данного метода ограничено.

Третий метод. Обобщённой оценкой метода является военно-техно-экономический уровень:

$$П_{ВТУ} = П_{ВТУ} \alpha_{ВТУ} + П_{СТ} \alpha_{СТ},$$

где $П_{ВТУ}$ – показатель военно-технического уровня; $П_{СТ}$ – стоимостной показатель; $\alpha_{ВТУ}$ – весомость показателя военно-технического уровня; $\alpha_{СТ}$ – весомость стоимостного показателя.

Данная оценка представляет собой комбинацию из показателей боевых и эксплуата-

ционных свойств объектов АБТТ, а также стоимостных показателей. В методе учитываются весовые коэффициенты свойств. Его использование на стадии проектирования ограничено, что связано с необходимостью реальных данных по стоимостным показателям.

Проведённый анализ показал, что использование перечисленных методов сравнения не позволяет корректно провести сравнение объектов АБТТ на стадии проектирования с учётом полного перечня показателей свойств. Вместе с этим, можно сформулировать перечень критериев, которым должен удовлетворять метод сравнения:

- метод должен учитывать полный перечень свойств и характеризующих их показателей;
- должен иметь вариативность для возможного внесения или удаления каких-либо показателей и свойств;
- сравнение должно проходить на основании значимости свойств и характеризующих их показателей.

Перечисленным критериям удовлетворяет метод анализа иерархий (МАИ). МАИ - один из методов системного планирования, разработанный в 60-х годах американским учёным Томасом Саати. Основной частью планирования системы является анализ альтернативных решений стоящей задачи. Применительно к задаче сравнения объектов АБТТ будет использоваться исключительно эта часть МАИ. В связи с чем в дальнейшем под использованием МАИ будет подразумеваться применение метода анализа альтернативных решений, входящего в метод системного планирования МАИ [3].

На сегодняшний день МАИ широко используется для анализа и выбора в таких направлениях как:

- исследование перспективных направлений развития АБТТ;
- выбор шасси для создания семейства спецмашин;
- выбора конкретных образцов АБТТ, а также других исследований, в которых требуется количественная оценка превосходства одного варианта решения задачи над другим.

Примерами широкого применения МАИ в области исследования объектов АБТТ могут служить следующие работы. В 1999 г. была защищена кандидатская диссертация на тему «Метод выбора базового шасси при создании спецавтомобиля» [4]. Используя аппарат МАИ был обоснован метод определения приоритетов оценочных показателей, влияющих на выбор шасси спецавтомобиля, а также проведён выбор шасси для него. В 2003 г. была защищена кандидатская диссертация на тему «Метод комплексного сравнения военных гусеничных машин на основе анализа иерархий» [5]. Диссертация была посвящена анализу применимости существующих методов сравнения, а также разработке на основе МАИ нового метода комплексного сравнения военных гусеничных машин. В диссертации была подтверждена работоспособность нового метода путём сравнения объектов АБТТ времён Великой Отечественной войны.

Иерархия свойств для использования МАИ строится в соответствии со спецификой проводимого сравнения. Количество показателей и детальность проработки зависит от уровня детализации сравниваемых альтернативных вариантов. Так, номенклатура показателей работы [5] состояла из полного перечня показателей, необходимых для всесторонней оценки объектов АБТТ. Это было вызвано наличием данных практически по всем значениям показателей, входящих в иерархию. Сравнение при помощи такой номенклатуры показателей является наиболее предпочтительным, однако трудоёмко и требует большого количества данных. Такое сравнение не представляется возможным для сравнения машин на этапе проектирования.

Для анализа соответствия стоящих на вооружении внутренних войск МВД объектов АБТТ, а также сравнения этих образцов с перспективным образцом в 2008 г. была проведена работа с использованием МАИ. В качестве показателей сравнения были использованы тактико-технические требования, предъявляемые к данному типу АБТТ. Эти требования были сформулированы в приказах, РД, ОСТ и ГОСТ. Однако при анализе требований было выявлено, что номенклатура показателей оценки данного типа АБТТ неполная. Были введены показатели, характеризующие специфические требования к образцам данного типа. Для сравнения была разработана иерархия с введением специальных показателей и проведено сравнение, в результате которого было принято решение о целесообразности принятия на вооружение конкретного образца.

В ОАО «НИИ Стали» за последние годы был проведён ряд научно-исследовательских работ по выбору дальнейших направлений разработки одного из типов АБТТ. Эти работы были проведены с использованием МАИ. По результатам работы было принято решение о перспективности и предпочтительности продолжения одного из направлений разработки. При сравнении образцов была использована модернизированная методика, в которой в качестве собственных векторов значимости объектов использовались не экспертные оценки, а значения рассматриваемых показателей.

Для выбора шасси автомобилей двойного назначения в НАМИ была разработана методика оценки технического уровня семейств автомобилей многоцелевого назначения (АМН) на основе МАИ. Значимость свойств в методике определялась не только их ролью при выполнении той или иной операции, но и трудоёмкостью достижения требований по этому свойству. Данная методика использовалась для сравнения трёх семейств автомобилей многоцелевого назначения: «Мустанг», «Мотовоз» и «Гараж». На основе проведённого сравнения были получены результаты превосходства одного автомобильного семейства над другими семействами автомобилей. Был сделан вывод о работоспособности метода Т. Саати как для определения коэффициентов значимости свойств и единичных показателей, так и для окончательной оценки технического уровня конкретных объектов [6].

Таким образом, на сегодняшний день метод анализа иерархий Т.Саати и методики на его основе показали свою приспособленность к решению задач, связанных с оценкой значимости свойств и оценки технического уровня объектов АБТТ.

Библиографический список

1. Эксплуатация вооружения и военной техники сухопутных войск: учебник. – М.: Издание общевойсковой академии ВС РФ, 2000.
2. **Морозов, Г.А.** Упрощённая оценка эффективности танка / Г.А. Морозов, С.Д. Новиков, В.Ф. Попков // Вестник бронетанковой техники. 1980. №5.
3. **Саати, Т.** Аналитическое планирование. Организация систем: [пер. с англ.] / Т. Саати, К. Кернс. – М.: Радио и связь, 1991. – 224 с.
4. **Дубенский, М.Я.** Метод выбора базового шасси при создании спецавтомобиля: дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1999. – 130 с.
5. **Постников, М.В.** Метод комплексного сравнения военных гусеничных машин на основе анализа иерархий: дисс. ... канд. тех. наук. – М., 2003. – 240 с.
6. **Плиев, И.А.** Оценка технического уровня семейства автомобилей многоцелевого назначения на основе метода анализа иерархий // Журнал автомобильных инженеров. 2010. №3 (62), №5 (64).

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

A. Morozov, A. Kotrovskiy

THE CHOICE OF THE METHOD OF COMPLEX COMPARE OBJECTS OF ARMORED TECHNIQUE AT THE STAGE OF DESIGN

Bauman Moscow state technical university

This article considers the use of complex methods of comparison in the objects pane АБТТ. Examples of methods of complex comparisons. The analysis of the presented methods. Formulated a list of criteria that should be met by the method of comparison. Presented method, the most satisfying the strict requirements. List of works which was used by the proposed method.

Key words: armored vehicles, complex compare, method of hierarchy analysis.

УДК 629.113

Е.А. Наумов

К ВОПРОСУ РАСЧЕТНОЙ ОЦЕНКИ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КУЗОВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложены основы реализации алгоритма расчета по предельному состоянию при оценке несущей способности кузовов автомобилей и автобусов. Разработанный алгоритм основан на методе конечных элементов (МКЭ) в динамической постановке с использованием явной схемы интегрирования. При этом используется модель конечного элемента, основанная на формулировке балки Бельчико. Предложен критерий предельного состояния, для которого рассмотрены способы корректировки внутренних усилий в узлах балки при его нарушении.

Ключевые слова: критерий предельного состояния, кузов, несущая способность.

Во многих прикладных отраслях строительной механики важна задача, связанная с оценкой несущей способности инженерных конструкций. Кузовостроение не является исключением, где несущая способность является важной частью комплексного понятия пассивной безопасности, которое, в свою очередь, регулируется нормативно-правовыми документами. Актуальность проблемы повышения пассивной безопасности автомобилей и автобусов [2, 3] требует постоянного совершенствования методов ее оценки на всех стадиях проектирования. При этом на начальных этапах проектирования кузовных конструкций, при выборе их силовых схем, если позволяет конструкция, целесообразно использование балочных моделей. На рис. 1 показано нагружение автомобиля при испытаниях по методике EuroNCAP на боковое столкновение с единичным препятствием (pole-тест) и балочная схематизация салона кузова легкового автомобиля при рассмотрении нагружения центральной стойки одной из составляющих боковой аварийной нагрузки.

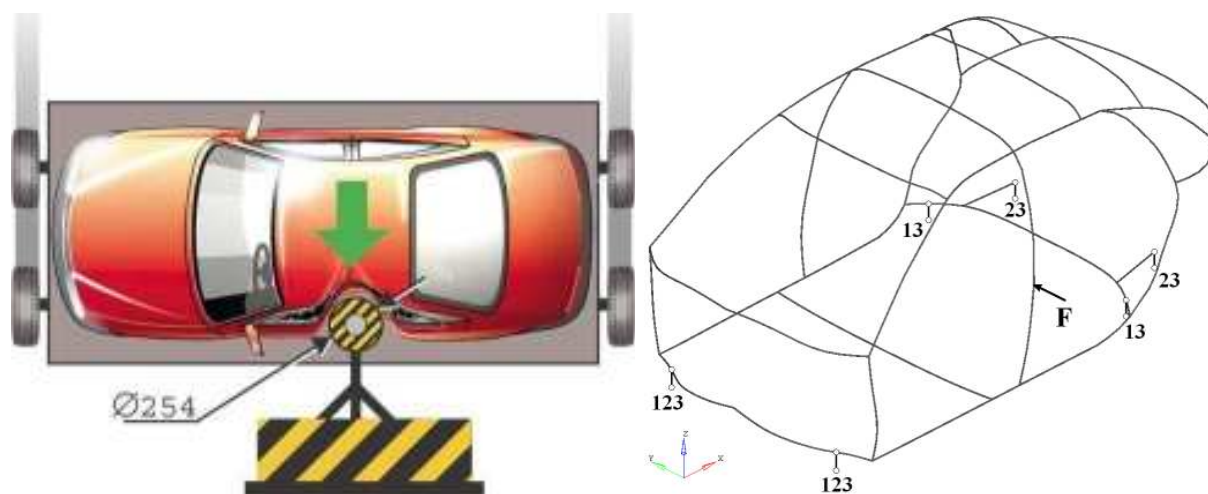


Рис. 1. Схема испытаний по EuroNCAP Pole Protocol и расчетная модель салона кузова легкового автомобиля

В данной статье коротко рассматриваются вопросы реализации алгоритма расчета по предельному состоянию (во всяком случае, его версии) произвольной пространственной конструкции, допускающей свою схематизацию брусками на основе метода конечных элементов (МКЭ). Конструкция не является механизмом: она закреплена и нагружена произвольной нагрузкой так, что любые перемещения ее частей связаны с ее деформированием. Итак, со-

гласно МКЭ, участки конструкции разбиты на отдельные элементы простой формы (в данном случае прямолинейные отрезки), соединенные между собой в узлах.

На рис. 2 показан фрагмент конструкции, состоящий из двух элементов (l и k) с общим узлом N . Элементы l и k в узлах P и M соединяются с другими элементами.

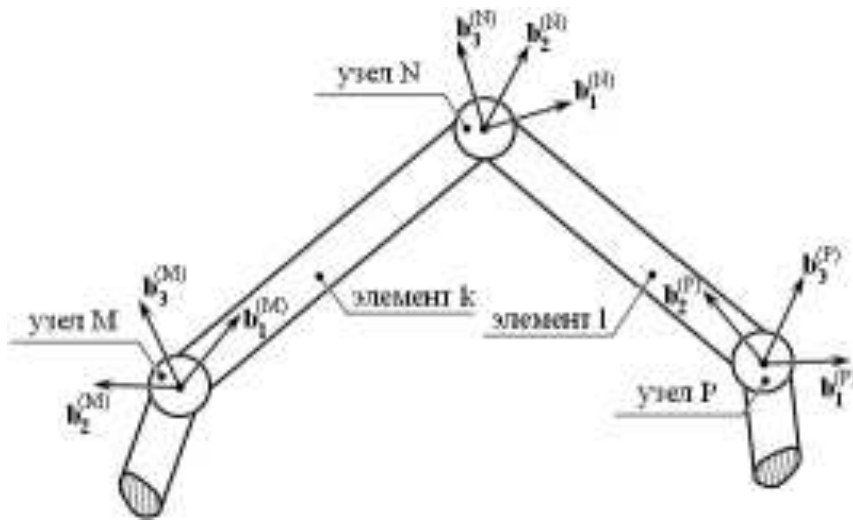


Рис. 2. Фрагмент КЭМ конструкции

В разработанном алгоритме за основу математической модели балочного элемента взята формулировка элемента Бельчико (Belytschko). В ней используется метод вращения координат (co-rotational technique) для обработки больших углов поворота. На рис. 3 изображен изопараметрический балочный элемент [6]; тройка единичных векторов $\{e_i\}$ образует элементную систему координат (element coordinate system). Орт e_1 всегда направлен вдоль оси элемента от начального (I) узла к конечному (J).

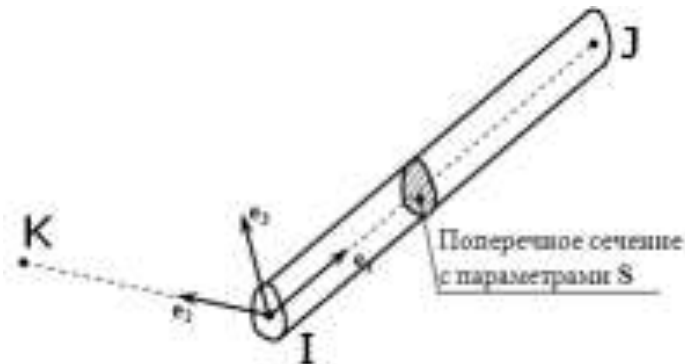


Рис. 3. Балочный конечный элемент
(параметры S – геометрические характеристики сечения)

Каждый структурный узел конструкции как твердое тело имеет шесть степеней свободы: три линейных (поступательных) и три угловых (вращательных). Для поступательных степеней свободы мерой инертности является масса, для вращательных – тензор инерции. Полные величины массы и тензора инерции в узле определяются суммированием соответствующих величин по элементам, которые соединяются в данном узле. Для элемента на рис. 3 инерционные характеристики его узлов определяются как

$$\hat{m} = m = \frac{\rho A l_0}{2}; \quad \hat{J}_{ik} = \frac{\rho l_0}{2} \delta_{ik} \hat{J}_k. \quad (1)$$

где m – масса; J_{ik} – компоненты тензора инерции; ρ – плотность материала; A – площадь по-

перечного сечения; l_0 – длина элемента в недеформированном состоянии; δ_{ik} – единичный тензор; J_k – момент инерции сечения относительно локальной оси с ортом \mathbf{e}_k .

Здесь и далее при описании векторных и тензорных величин используется тензорная нотация, когда в соответствующих выражениях индекс, встречающийся раз, принимает значения 1, 2, 3, а по дважды повторяющемуся индексу в одночлене подразумевается суммирование от 1 до 3. Символ «^» над величинами означает, что они определены в локальной системе координат элемента $\{\mathbf{e}_i\}$.

В ЭСК тензор инерции *диагонален*, т.е. оси ЭСК являются его главными осями.

Суммарная масса узла N на рис. 2 определяется как сумма узловых масс элементов l и k . Для нахождения суммарного узлового тензора инерции необходимо преобразовать компоненты тензоров элементов в одну и ту же систему координат. В данном случае используется глобальная система координат (ГСК). Для тензора 2-го ранга в декартовой прямоугольной системе координат преобразование компонент при смене базиса [1] имеет вид

$$\hat{J}_{ik} = e_{il}e_{km}J_{lm}, \quad (2)$$

где \hat{J}_{ik} – компоненты тензора в новом базисе (в данном случае в ЭСК); J_{lm} – компоненты тензора в старом базисе (в данном случае в ГСК); e_{ik} – косинус угла между i -й осью ЭСК и k -й осью ГСК (или координата k вектора \mathbf{e}_i в ГСК). Обратное преобразование соответственно

$$J_{ik} = e_{li}e_{mk}\hat{J}_{lm}. \quad (3)$$

Преобразование (3) эквивалентно в матричном виде можно записать как

$$\mathbf{J} = \boldsymbol{\mu} \hat{\mathbf{J}} \boldsymbol{\mu}^T, \quad (4)$$

где $\boldsymbol{\mu}$ – матрица преобразования, столбцы которой – векторы \mathbf{e}_i .

Итак, после преобразования тензоров инерции элементов l и k суммарный тензор инерции для узла N будет вычислен как их сумма.

Разработанный алгоритм использует явную схему интегрирования уравнений динамики. Для произвольного узла конструкции имеем

$$\begin{aligned} \mathbf{a}^{(n)} &= \mathbf{M}^{-1}(\mathbf{f}^{(n)} - \mathbf{f}_{int}^{(n)} - \mathbf{f}_v^{(n)}); \quad \mathbf{v}^{(n+1/2)} = \mathbf{v}^{(n-1/2)} + \mathbf{a}^{(n)}\Delta t^{(n+1/2)}; \\ \mathbf{u}^{(n+1)} &= \mathbf{u}^{(n)} + \mathbf{v}^{(n+1/2)}\Delta t^{(n+1)}; \quad \Delta t^{(n+1/2)} = \frac{\Delta t^{(n)} + \Delta t^{(n+1)}}{2}, \end{aligned} \quad (5)$$

где (5) \mathbf{M} – матрица масс; $\mathbf{f}^{(n)}$ – вектор внешних приложенных сил; $\mathbf{f}_{int}^{(n)}$ – вектор внутренних сил в узле (вычисляется суммированием векторов внутренних усилий по всем элементам, соединяющимся в данном узле); $\mathbf{f}_v^{(n)}$ – вектор сил вязкого сопротивления; Δt – шаг интегрирования. Матрица масс узла определяется суммарной узловой массой (компоненты, соответствующие поступательным степеням свободы) и суммарным тензором инерции (компоненты, соответствующие вращательным степеням свободы).

Очевидно, что уравнения (5) наиболее просто (в разделенном виде) решаются в случае с диагональной матрицей масс. Масса – это скаляр, который не меняется при смене базиса. Поэтому для поступательных степеней свободы никаких преобразований выполнять не нужно. Иначе обстоит дело с угловыми степенями свободы. Выше указывалось, что тензор инерции узлов элемента в ЭСК задан своими главными значениями. Однако суммарный узловой тензор инерции в общем виде не является диагональным, поэтому в ГСК решить уравнения, связанные с определением ускорений, в разделенном виде не получится. Указанное затруднение решается через проблему собственных значений для суммарного узлового тензора инерции, когда определяются направления главных осей инерции, в которых центробежные компоненты тензора равны нулю, а на главной диагонали стоят его главные значения. На рис. 2 направления главных осей инерции в узлах показаны тройками ортов $\{\mathbf{b}_i\}$, определяющих узловые системы координат (УСК). УСК вращается вместе с узлом.

Необходимо отметить, что при вычислении ускорений вращательных степеней свободы по формуле (5) вектор суммарного узлового момента (выражение в скобках) должен быть преобразован в УСК. Компоненты вектора \mathbf{F} при изменении системы координат преобразуются как [1]

$$\bar{F}_i = b_{ik} F_k, \quad F_i = b_{ki} \bar{F}_k, \quad (6)$$

где \bar{F}_i – компоненты вектора в УСК; b_{ik} – косинус угла между i -й осью УСК и k -й осью ГСК. Или эквивалентным образом в матричном виде

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\lambda} \bar{\mathbf{F}}; \quad \bar{\mathbf{F}} = \boldsymbol{\lambda}^T \mathbf{F}, \quad (7)$$

где $\boldsymbol{\lambda}$ – матрица преобразования, столбцы которой векторы \mathbf{b}_i .

Внутренние усилия для произвольного балочного элемента (к примеру, того, что на рис. 3) запишем следующим образом

$$\hat{\mathbf{f}}^T = \{ \hat{f}_{xJ}, \hat{m}_{xJ}, \hat{m}_{yI}, \hat{m}_{yJ}, \hat{m}_{zI}, \hat{m}_{zJ} \}, \quad (8)$$

где компоненты вектора – осевая сила, крутящий момент, изгибающие моменты относительно соответствующих осей. Индексы I и J соответствуют величинам в начальном и конечном узлах.

Вектор внутренних усилий элемента предварительно обновляется в конце текущего шага суммированием текущего вектора с его приращением, рассчитанным на основе упругого прогноза:

$$\hat{\mathbf{f}}^{0(n+1)} = \hat{\mathbf{f}}^{(n)} + \Delta \hat{\mathbf{f}}^{(n)}. \quad (9)$$

После этого осуществляется проверка на достижение предельного состояния в каждом узле элемента. Если предельное состояние не было достигнуто, то полагается $\hat{\mathbf{f}}^{(n+1)} = \hat{\mathbf{f}}^{0(n+1)}$ и осуществляется переход к следующему шагу. В противном случае осуществляется специальное корректирование вектора усилий, вычисленных по формуле (9). Подробнее об этом далее в статье.

Вектор приращения усилий в (9) вычисляется умножением приращения деформаций на соответствующие жесткости. Подробнее рассмотрим вопрос о вычислении деформаций. Удлинение балки определяется разностью текущей и исходной длин:

$$\delta_{IJ} = l - l^0. \quad (10)$$

Изгибные деформации определяются разложение векторного произведения текущего орта \mathbf{e}_1 на его исходное направление, поворачивающееся вместе с узлом, в текущем базисе $\{\mathbf{e}_i\}$:

$$\begin{aligned} \mathbf{e}_1^0 &= \{ \hat{e}_{1i}^0 \} = \boldsymbol{\mu}^T \boldsymbol{\lambda} \{ e_{1i}^0 \} \\ \mathbf{e}_1 \times \mathbf{e}_1^0 &= \hat{\theta}_y \mathbf{e}_2 + \hat{\theta}_z \mathbf{e}_3 = -\hat{e}_{13}^0 \mathbf{e}_2 + \hat{e}_{12}^0 \mathbf{e}_3. \end{aligned} \quad (11)$$

Деформация кручения вычисляется нахождением проекции векторного произведения исходных единичных векторов, ортогональных оси балки, на ее текущее направление:

$$\hat{\theta}_{xIJ} = \frac{1}{2} \mathbf{e}_1 \left(\mathbf{e}_{2I}^0 \times \mathbf{e}_{2J}^0 + \mathbf{e}_{3I}^0 \times \mathbf{e}_{3J}^0 \right) = \frac{1}{2} \left(\hat{e}_{y2I}^0 \hat{e}_{z2J}^0 - \hat{e}_{y2J}^0 \hat{e}_{z2I}^0 + \hat{e}_{y3I}^0 \hat{e}_{z3J}^0 - \hat{e}_{y3J}^0 \hat{e}_{z3I}^0 \right). \quad (12)$$

В итоге, вектор деформаций

$$\hat{\mathbf{d}}^T = \{ \delta_{IJ}, \hat{\theta}_{xIJ}, \hat{\theta}_{yI}, \hat{\theta}_{yJ}, \hat{\theta}_{zI}, \hat{\theta}_{zJ} \}. \quad (13)$$

В формулах (10)–(12) в качестве исходного взято состояние в начальный момент времени (t_0), поэтому вычисляемые деформации являются суммарными. Чтобы получить приращения деформаций, нужно в качестве исходного взять состояние на предыдущем шаге, а в формулах заменить 0 (нуль) на $(n-1)$, полагая, что текущая конфигурация системы рассматривается в момент времени $t^{(n)}$ (в выражениях (10)–(13) индекс n , соответствующий текущему состоянию, опущен. При этом суммарные деформации:

$$\hat{\mathbf{d}}^{(n+1)} = \hat{\mathbf{d}}^{(n)} + \Delta \hat{\mathbf{d}}^{(n)}. \quad (14)$$

Вернемся к вопросу о вычислении внутренних усилий. Итак, после вычисления приращения деформаций (см. формулы (10)–(12)), рассчитываются векторы приращений и суммарных внутренних усилий по формуле (9). Отметим, что остальные внутренние силовые факторы определяются из условия равновесия:

$$\hat{f}_{xI} = -\hat{f}_{xJ}; \hat{m}_{xI} = -\hat{m}_{xJ}; \hat{f}_{zI} = -\frac{\hat{m}_{yI} + \hat{m}_{yJ}}{l}; \hat{f}_{zJ} = -\hat{f}_{zI}; \hat{f}_{yI} = -\frac{\hat{m}_{zI} + \hat{m}_{zJ}}{l}; \hat{f}_{yJ} = -\hat{f}_{yI}. \quad (15)$$

Далее предлагается использовать следующее условие предельного состояния в узле:

$$h(\mathbf{f}) = \frac{1}{2} \left[k_n \left[\left(\frac{\hat{f}_x}{F_{x0}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{m}_y}{M_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{m}_z}{M_{z0}} \right)^2 \right] + k_s \left[\left(\frac{\hat{f}_y}{F_{y0}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{f}_z}{F_{z0}} \right)^2 + \left(\frac{\hat{m}_x}{M_{x0}} \right)^2 \right] - 1 \right] < 0, \quad (16)$$

где k_n и k_s – коэффициенты, учитывающие степень влияния соответственно нормальных и касательных напряжений на потерю несущей способности сечением. Далее в рассуждениях они полагаются равными единице и для упрощения выражений опускаются. В знаменателе формулы (16) стоят предельные значения величин для соответствующих силовых факторов. Под предельными величинами понимается:

$$F_{x0} = A\sigma_T; \quad M_{y,z0} = W_{\text{пл } y,z}\sigma_T; \quad F_{y,z0} = k_{y,z}A\tau_T; \quad M_{x0} = W_{\text{пл } x}\tau_T, \quad (17)$$

где A – площадь поперечного сечения; $W_{\text{пл}}$ – пластические моменты сопротивления относительно соответствующих осей; σ_T – предел текучести при растяжении; τ_T – предел текучести на сдвиг; $k_{y,z}$ – коэффициенты сдвига в направлении локальных осей y и z соответственно.

После вычисления усилий по формуле (9) для каждого узла балочного элемента проверяется условие (16). Если оно нарушается, то задача заключается в корректировке усилий таким образом, чтобы неравенство $h > 0$ обратить в равенство. Для упрощения выражений введем следующие обозначения, опуская индекс n для номера шага по времени:

$$\left\{ \hat{f}_{xJ}, \hat{m}_{xJ}, \hat{m}_{yI}, \hat{m}_{zI}, \hat{m}_{yJ}, \hat{m}_{zJ} \right\} = \{x_i\};$$

$$\left\{ F_{x0}, M_{x0}, M_{y0}, M_{z0} \right\} = \{X_1, X_2, X_3, X_4\}; \quad (18)$$

$$\hat{f}_{zI} = -\frac{x_3 + x_5}{l} (X_6 = F_{y0}l); \quad \hat{f}_{yJ} = -\frac{x_4 + x_6}{l} (X_5 = F_{z0}l).$$

Выражение (16) для узлов I и J с учетом введенных обозначений принимает вид

$$h_1(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{x_3}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{x_4}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{x_4 + x_6}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_3 + x_5}{X_6} \right)^2 - 1 \right] < 0;$$

$$h_2(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{x_5}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{x_6}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{x_4 + x_6}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_3 + x_5}{X_6} \right)^2 - 1 \right] < 0. \quad (19)$$

При нарушении условий (19) возможны два случая.

Случай 1 - условие (19) нарушено в одном узле, а в другом выполнено.

Для примера рассмотрим ситуацию, когда нарушено условие h_1 , а h_2 выполнено. Рассуждения в обратной ситуации проводятся аналогично. Итак, при $h_1(\mathbf{x}^0) = \alpha > 0$ необходимо произвести корректировку усилий в 1-м узле (I). При этом усилия (изгибные моменты) от второго узла, входящие в выражение, **не корректируются**. Возврат усилий на предельную поверхность осуществляется их умножением на корректирующий скаляр β , определяемый как решение квадратного уравнения с коэффициентами a, b, c :

$$\begin{aligned}
 a &= \sum_{i=1}^4 \left(\frac{x_i^0}{X_i} \right)^2 + \left(\frac{x_4^0}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_3^0}{X_6} \right)^2; \quad b = 2 \left(\frac{x_4^0 x_6^0}{X_5^2} + \frac{x_3^0 x_5^0}{X_6^2} \right); \\
 c &= \left(\frac{x_6^0}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_5^0}{X_6} \right)^2 - 1; \quad D = b^2 - 4ac; \quad \beta = \frac{-b + \sqrt{D}}{2a}; \\
 \mathbf{x} &= \{ \beta x_1^0, \beta x_2^0, \beta x_3^0, \beta x_4^0, x_5^0, x_6^0 \}
 \end{aligned} \tag{20}$$

Случай 2 - условие (19) нарушено в обоих узлах.

Здесь возможны два варианта. Первый (простой), когда поперечные силы равны нулю (легко видеть, что в этом случае $h_1(\mathbf{x}^0) = h_2(\mathbf{x}^0)$). Применяется идея, аналогичная случаю 1, но выражения принимают более простой вид

$$\begin{aligned}
 h_1(\mathbf{x}^0) = h_2(\mathbf{x}^0) &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_1^0}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2^0}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{x_{3(5)}^0}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{x_{4(6)}^0}{X_4} \right)^2 - 1 \right] = \alpha; \\
 \beta &= \frac{1}{\sqrt{1+2\alpha}}; \quad \mathbf{x} = \beta \mathbf{x}^0.
 \end{aligned} \tag{21}$$

Второй, более сложный вариант, будет, когда предельные условия нарушены в обоих узлах и при этом не равны между собой ($h_1(\mathbf{x}^0) \neq h_2(\mathbf{x}^0)$). В этом случае предлагается вектор внутренних усилий в предельном состоянии (\mathbf{x}) искать как решение задачи нелинейного программирования о поиске минимального расстояния в относительных координатах, которым алгоритм пластичности будет переводить точку из начального состояния (\mathbf{x}^0) в искомое (формулы (22) ниже). Условия $\mathbf{h}(\mathbf{x}) = 0$ соответствуют нахождению точки искомого состояния на линии пересечения предельных поверхностей.

Точка \mathbf{x} должна удовлетворять условиям $h_1(\mathbf{x}) = h_2(\mathbf{x}) = 0$ с учетом согласованности знаков скорректированных ВСФ и деформаций, которые их вызвали (для этого и нужны ограничения в виде неравенств).

$$\begin{aligned}
 f(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \sum_{i=1}^6 \left(\frac{x_i^0 - x_i}{H_i} \right)^2 \leftarrow \min, \quad H_i = \begin{cases} |x_i^0|, & x_i^0 \neq 0 \\ 1, & x_i^0 = 0 \end{cases}, \quad i = \overline{1,6}; \\
 h_1(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{x_3}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{x_4}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{x_4 + x_6}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_3 + x_5}{X_6} \right)^2 - 1 \right] = 0; \\
 h_2(\mathbf{x}) &= \frac{1}{2} \left[\left(\frac{x_1}{X_1} \right)^2 + \left(\frac{x_2}{X_2} \right)^2 + \left(\frac{x_5}{X_3} \right)^2 + \left(\frac{x_6}{X_4} \right)^2 + \left(\frac{x_4 + x_6}{X_5} \right)^2 + \left(\frac{x_3 + x_5}{X_6} \right)^2 - 1 \right] = 0; \\
 g_i(\mathbf{x}) &= \frac{x_i - \max(0, x_i^0)}{H_i} \leq 0; \quad \tilde{g}_i(\mathbf{x}) = \frac{\min(0, x_i^0) - x_i}{H_i} \leq 0, \quad i = \overline{1,6}.
 \end{aligned} \tag{22}$$

Задача (22) может рассматриваться и как альтернатива нахождению вектора предельных усилий \mathbf{x} с помощью масштабирующего множителя β по формулам (20)–(21). При этом из условий-ограничений исключены неравенства и одно равенство (в рассмотренных примерах h_2), а размерность задачи уменьшена до четырех.

Предлагаемый критерий позволяет учесть вклад всех шести силовых факторов в наступление предельного состояния. Кроме того, известно, что при значительных пластических деформациях наблюдается изменение формы поперечных сечений тонкостенных сило-

вых элементов кузовных конструкций [4–5]. Это существенно влияет на такие оцениваемые параметры конструкции, как предельная аварийная нагрузка, энергоемкость и деформируемость. Поэтому в дальнейшем предполагается использовать специальную зависимость пластического момента сопротивления сечений изгибу от угловой пластической деформации, что позволит с большей точностью оценивать несущую способность при выборе силовых схем, а также проведении сравнительного анализа кузовных конструкций на этапах доводки и сертификации.

Библиографический список

1. **Борисенко, А.И.** Векторный анализ и начала тензорного исчисления / А.И. Борисенко, И.Е. Тарапов. – 3-е изд. – М.: Высш. шк., 1966. – 252 с.
2. **Наумов, Е.А.** К расчетной оценке пассивной безопасности кузова легкового автомобиля при боковом столкновении / Е.А. Наумов, Л.Н. Орлов // Журнал автомобильных инженеров. 2009. № 5(58). С. 19–21.
3. Повышение безопасности кузовов автобусов на стадии проектирования / Л.Н. Орлов [и др.] // Проектирование, испытание, эксплуатация и маркетинг автотракторной техники: сб. научн. трудов к 60-летию каф. «Автомобили и тракторы». – Н. Новгород: НГТУ, 1997. – С. 230–238.
4. **Тумасов, А.В.** Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования / А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов, П.С. Рогов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2011. Т 78. № 3 (96). С. 150–156.
5. **Tumasov, A.** Analysis of Simulation Approaches for Calculative Estimation of Buses Passive Safety / A. Tumasov, A. Vashurin, P. Rogov, L. Orlov // Advanced Technologies for Commercial Vehicles - VTI2012E013: proceedings of 2012 International Conference on Advanced Vehicle Technologies and Integration (VTI2012). 2012, Changchun, China. P. 519–523.
6. **Bathe, K.-J.** Finite Element Procedures / Klaus-Jürgen Bathe // USA, Prentice-Hall, 1976. – 1050 p.
7. LS-DYNA THEORY MANUAL, March 2006, Compiled By John O. Hallquist.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

E.A. Naumov

THE ESTIMATED VALUE CAR AND BUS BODY SUPPORTING ABILITY

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Refined technique of estimation supporting ability of bodies during choosing the supporting scheme.

Design/methodology/approach: Finite element method with explicit time integration scheme; co-rotational technique; limit state theory; tensor and vector algebra; nonlinear programming.

Findings: It is possible to apply the refined technique in perspective for more accurate estimation of supporting ability on the basis of solution simple (beam) models results that must shows higher convergence with experimental data.

Research limitations/implications: The present paper provides a starting-point for further research in the field of structure supporting ability particularly automobile and bus bodies. In perspective It's expected to use plastic section modulus versus plastic strain relationship.

Originality/value: The main peculiarity of the study is modified limiting state criterion with 6th internal forces and technique to correct elastic prediction section forces increment based on conditional minimization (when plastic conditions both nodes exceed and unequal) that could provide more accurate values limit strength and energy.

Key words: limiting state criterion, body, supporting ability.

УДК 629.113

С.М. Огороднов, А.Н. Тихомиров, Д.В. Шаров

ИССЛЕДОВАНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ЛЕГКОВОГО КОММЕРЧЕСКОГО АВТОМОБИЛЯ «ГАЗЕЛЬ NEXT» ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ МЕТОДОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетно-экспериментальных исследований расхода топлива легкого коммерческого автомобиля «ГАЗель Next».

Ключевые слова: расход топлива, топливная экономичность, «ГАЗель Next».

Топливная экономичность автомобильных транспортных средств (автомобиль, АТС) – это совокупность свойств (комплекс эксплуатационных признаков), определяющих расход топлива при выполнении автомобилем транспортной работы в различных дорожно-эксплуатационных условиях.

Расход топлива в настоящее время – одна из важных характеристик автомобиля и его двигателя. Проблема снижения расхода топлива решалась на протяжении всей истории производства автомобилей. В настоящее время на автопроизводителей большинства развитых стран оказывают давление государственные структуры, с целью стимуляции к разработке и производству более экономичных автомобилей. В качестве обоснования выступают как интересы государственной безопасности в форме снижения зависимости от поставок нефти, так и экологические требования.

Значительную роль в этом оказывает связь между расходом топлива и выбросом диоксида углерода – одного из главных прокурсоров парникового эффекта на планете. Выбросы CO₂ становятся на сегодня ключевым мерилем эффективности автомобиля в целом. Многие автопроизводители идут на сознательное искажение результатов замеров, чтобы получить более «привлекательный» результат.

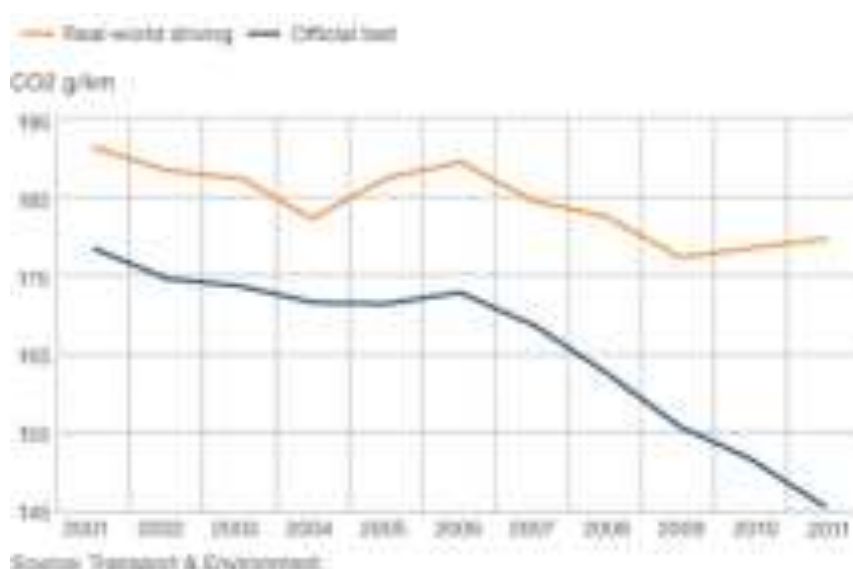


Рис. 1. Сравнение реального и официально заявленного выброса CO₂ немецкими автопроизводителями

Для оценки топливной экономичности АТС разработаны нормативные документы, в

которых устанавливаются параметры, оценивающие частные случаи топливной экономичности с учетом дорожных условий, режимов нагрузки и скоростных характеристик.

В нормативно-технических документах автомобиля обязательно указывают контрольный расход топлива. Этот показатель является отражением технического уровня и выражением потребительских качеств автомобиля и используется как для контроля автомобиля на соответствие техническим требованиям, так и в качестве параметра оценки технического состояния автомобиля в процессе эксплуатации. Этот показатель, как и другие показатели и характеристики топливной экономичности, используют для сравнительного анализа технического уровня автомобилей различных марок аналогичных категорий. Получение малого расхода топлива при разработке новых моделей автомобилей должно стать одной из важнейших целей.

Единичными измерителями топливной экономичности служат:

- 1) контрольный расход топлива Q_{Sk} ;
- 2) расход топлива в магистральном цикле на дороге $Q_{Sm.ц}$;
- 3) расход топлива в городском цикле на дороге $Q_{Sг.ц}$;
- 4) расход топлива в городском цикле на стенде $Q_{Sг.ц.с}$;
- 5) топливная характеристика установившегося движения $Q_S = f(V_a)$;

Целью работы стало исследование факторов, влияющих на топливную характеристику, поиск путей их устранения для дальнейшего повышения топливной экономичности перспективного автомобиля.

Характеристики топливной экономичности должны быть получены для автомобилей с полной массой груза. Параметры движения нормируются ГОСТ Р 54810-2011 в зависимости от типа АТС и их максимальной скорости. В качестве объекта исследования выступил легкий коммерческий грузовик ООО «Автомобильный завод «ГАЗ» (рис. 2), «ГАЗель Next» с дизельным двигателем CUMMINS ISF 2.8.



Рис. 2. Автомобиль «ГАЗель Next» на полигоне

Автомобиль является представителем нового семейства легких коммерческих грузовиков ГАЗ, и должен выполнять требования экологического класса 5. В этой связи на нем предусмотрена установка двух новых силовых агрегатов класса EURO 5 – бензинового (с дальнейшей модификацией под использование газообразного топлива) и дизельного двигателя. Начало испытаний проводилось с дизельной модификацией.

Установленный на автомобиле двигатель CUMMINS ISF 2.8 потенциально имеет пять разновидностей, отличающихся выходными параметрами (в частности, крутящим моментом).

Основные характеристики двигателя CUMMINS ISF 2.8. приведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики двигателя CUMMINS ISF 2.8.

Параметр	Значение
Рабочий объем,	2,776
Максимальная мощность, кВт (л.с.)	88,3 (120)
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	3600
Максимальный крутящий момент, Н·м (кгс·м)	2700 (27,5)

Отличия в поведении кривых крутящего момента относительно легко задаются настройками характеристик наддува двигателя. По заказу производителя автомобиля могут быть назначены «растянутые» характеристики, дающие большие значения абсолютной мощности, либо иные формы протекания крутящего момента в зависимости от конкретного автомобиля. Применительно к «ГАЗель Next» выбрана характеристика с ограничением по крутящему моменту на уровне 280 Нм для сохранения ресурса трансмиссии.

Автомобиль имеет механическую пятиступенчатую коробку передач, из потребителей энергии – только насос гидроусилителя руля. Кузов автомобиля закрыт штатным тентом.

Почти все элементы конструкции современного автомобиля оказывают влияние на расход топлива. Характерная черта всех двигателей класса EURO 5 – достижение высокого крутящего момента уже на относительно малых частотах вращения, что придает автомобилю динамики. Кроме внешней скоростной характеристики, на расход топлива существенно влияют частичные характеристики. Степень их влияния на конечный результат по расходам топлива определяется долей времени, которое автомобиль проводит на частичной нагрузке. Для легковых авто это примерно 85% времени, для легкого коммерческого грузовика типа «ГАЗель» – около 50%.

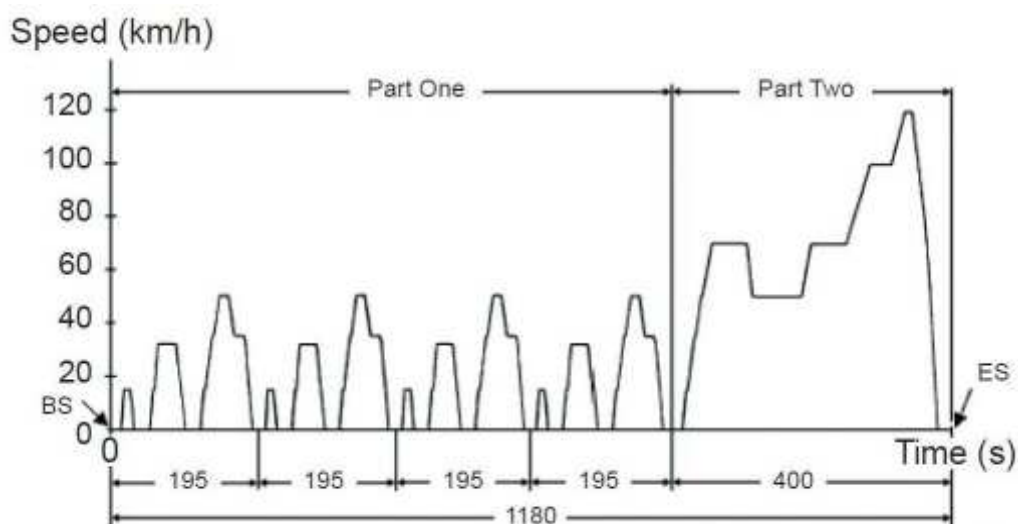


Рис. 3. Новый европейский ездовой цикл

Для исключения влияния манеры движения и режима движения на результаты, для замеров расхода топлива выделяются специальные режимы и циклы движения. Для Европейских производителей ключевым является так называемый Новый европейский ездовой цикл NEDC (рис. 3). Первая часть цикла, состоящая из четырех повторяющихся циклов длительностью 195 с, представляет собой «городской» цикл – стандартизованную последовательность режимов движения с большой интенсивностью изменения скорости автомобиля, необходимостью прогрева, работой двигателя во время стоянки «на светофорах», а также разгонами и резкими сбросами скорости до нуля. Вторая часть – «загородный» цикл – харак-

теризуется большей плавностью хода и стабильно удерживаемой скорости, хотя и с высокими абсолютными скоростями и ускорениями.

Реализация ездового цикла и весь комплекс замеров расхода топлива и токсичности предусматривается на беговых барабанах. Именно величины расходов, полученные при таких испытаниях, ложатся в основу контрольных и рекламных значений расхода топлива.

Для специальных исследований могут использоваться иные стандарты, например, ГОСТ Р 54810-2011 «Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний». Здесь предложены специальные магистральные и городские циклы испытаний на дороге на топливную экономичность.

При анализе характеристик перспективного автомобиля экологического класса 5 основные отличия от предшественников следует ожидать в зоне переходных режимов. Поэтому, кроме топливной характеристики установившегося движения, замер расхода топлива выполнен и по магистральному циклу.

Для повторяемости и объективного сравнения результатов перед проведением замеров были проведены работы по приведению автомобиля к стандартным условиям. АТС должно соответствовать техническим условиям, быть укомплектованным, заправленным горюче-смазочными материалами и другими жидкостями, пройти обкатку в соответствии с инструкцией по эксплуатации.

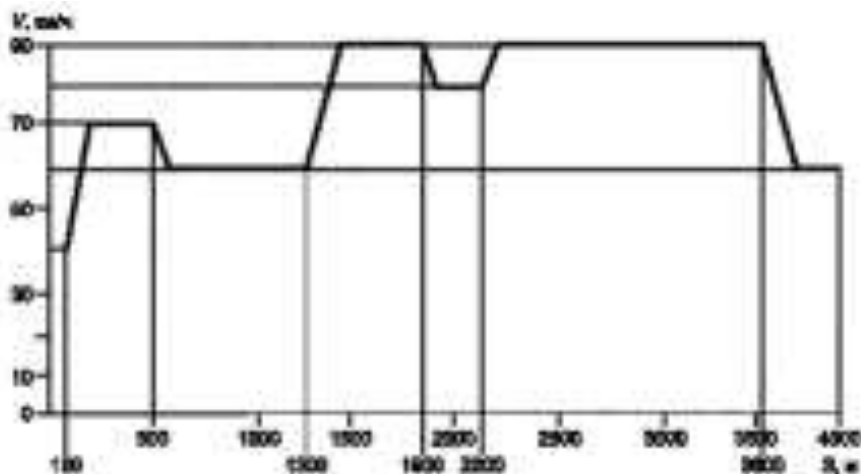


Рис. 4. Схема магистрального цикла на дороге ГОСТ Р 54810-2011



Рис. 5. Схема загрузки грузовой платформы

Все пункты были выполнены: полная масса автомобиля была доведена до 3500 кг; тент над кузовом был полностью застегнут; окна в кабине закрыты; дополнительные потребители энергии отключены; давление воздуха в шинах доведено до нормы. Перед испытаниями был проверен «выбег» автомобиля со скорости 50 км/ч. По данным ООО «ГАЗ» он не должен быть менее 550 м. В нашем случае замер показал 605 м.

Все испытания на топливную экономичность проводились на полигоне Горьковского автозавода на горизонтальной динамометрической дороге.

Для измерений расхода топлива использовался расходомер Corrsys-Datron DFL3x, являющийся дальнейшим развитием известных датчиков расхода от фирмы Corrsys-Datron. Датчики системы DFL предназначены для замера расходования топлива в двигателях внутреннего сгорания. Современные устройства DFL производят все виды замеров расходования бензина, дизтоплива, горючего на основе спирта и биотоплива. Оборудование абсолютно надежно, высокого качества и рассчитано на долгий срок службы.



Рис. 6. Расходомер DFL3x-5bar с процессором сигналов

Устройства могут применяться для замера расхода топлива в двигателях пассажирских, грузовых автомашин, внедорожников, специальных видов транспорта, мотоциклов и судов. Они могут использоваться и на испытательных стендах. Устройства DFL пригодны для топливных систем всех типов. Внешний процессор сигналов необходим для данного устройства и обеспечивает различные выходы.

Встроенный датчик поршневого типа обеспечивает измерение расход топлива до 250 л/ч. Принцип измерения основан на преобразовании частоты вращения ротора (вала), согласованной с расходом топлива, протекающего через известный объем поршневого пространства датчика в электрические импульсы. Процессор сигналов преобразует полученные импульсы в выходной сигнал с желаемой для пользователя частотой. В процессе испытаний использовались каналы преобразователя, формирующие от 500 до 10000 импульсов на 1 см^3 и частотный сигнал, пропорциональный расходу топлива в диапазоне от 1 до 10000 Гц на 1 л/ч. Настройка цифровых каналов производится вручную посредством программы, прилагаемой к расходомеру CeCalWinPro (как оказалось впоследствии, прилагаемая программа производителями до конца не доведена, следовательно, ожидаемый расчет непосредственно расхода топлива невозможен (это только рекламный продукт). Калибровка измерительной системы выполнялась на моторном стенде в лаборатории ДВС НГТУ на дизельном двигателе Steyr ГАЗ-560. Измерительная система включала обратную топливную магистраль слива топлива в бак.

Расходомер был установлен на автомобиль «ГАЗель Next», бортовой с тентом. Сам датчик расходомера закреплен в кузове, непосредственно над топливным баком автомобиля. В полу грузовой платформы просверлено отверстие, через которое были проведены все шланги от бака к расходомеру и от расходомера к двигателю. Питание встроенного топливного насоса было организовано от отдельного аккумулятора, размещенного здесь же. Все приборы надежно прикреплены к полу платформы страховочными стропами и защищены сварной металлической рамой от возможного смещения балласта.

Процессор сигналов размещен в кабине, питание к нему протянуто от штатного аккумулятора из моторного отсека. От процессора кабель связи длиной 5 м протянут в кузов к датчику. По этому же кабелю подается питание на датчик расхода.

Частотомер также установлен в кабине, чтобы оператор видел значения во время движения. Питание частотомера (220 В) организовано от дополнительного преобразователя DC/AC мощностью 1,5 кВт.

Замеры расходов проводились на полигоне ГАЗ на участке горизонтальной дороги длиной 2 км с плавными разворотами. Заезды проводились с постоянными скоростями на трех разных передачах и по магистральному циклу ГОСТ Р 54810-2011. Для удобства замеров в середине калиброванного участка установлено две вешки на расстоянии 1 км друг от друга. Частотомер Ф5080 переводился в режим счетчика импульсов, который активировался и останавливался по команде оператора. При прохождении автомобиля мимо первой вешки оператор включал, а по прохождении второй выключал Ф5080. Результат замера числа импульсов в режиме одного процессора соответствует количеству топлива в см³ (с учетом коэффициента 1000). Из этой величины легко пересчитывается расход в л/100км.

По штатному тахометру записывалась текущая частота вращения двигателя. Поддержание постоянной скорости обеспечивалось близко к ближайшим целым значениям, но, главное, с максимальной точностью. В тех режимах, где это было возможно, использовался имеющийся на автомобиле «круиз-контроль», автоматическая система поддержания скорости. Замеры проводились минимум четыре раза, при этом автомобиль двигался в разные стороны для исключения влияния ветра. Максимальная скорость достигнута на 5-й передаче – 118 км/ч.



Рис. 7. Установка расходомера DFL3x в кузове автомобиля

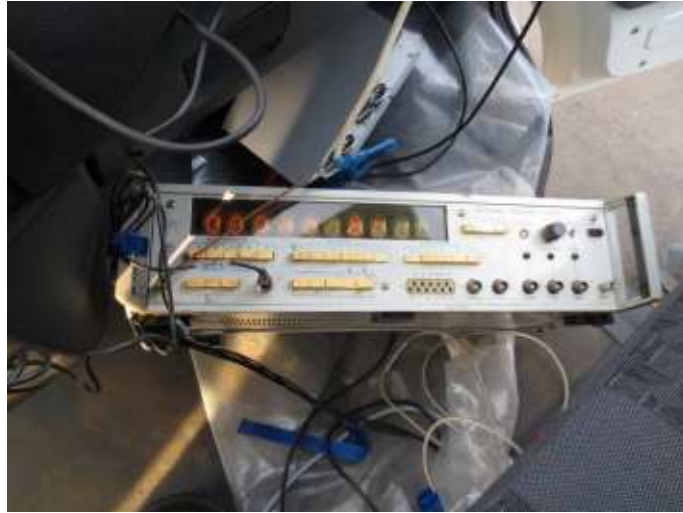


Рис. 8. Размещение частотомера Ф5080 в кабине автомобиля

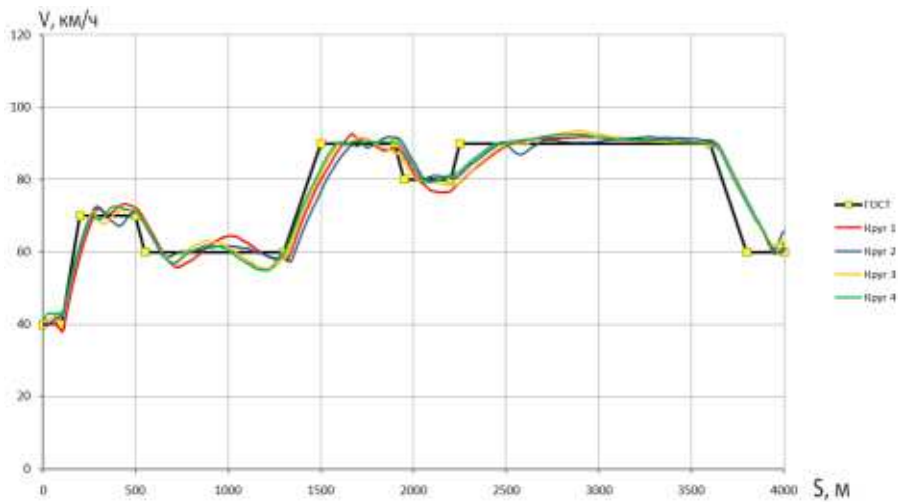


Рис. 9. Результаты экспериментальных исследований (по ГОСТ Р 54810-2011)

По результатам замеров построены топливные характеристики установившегося движения.

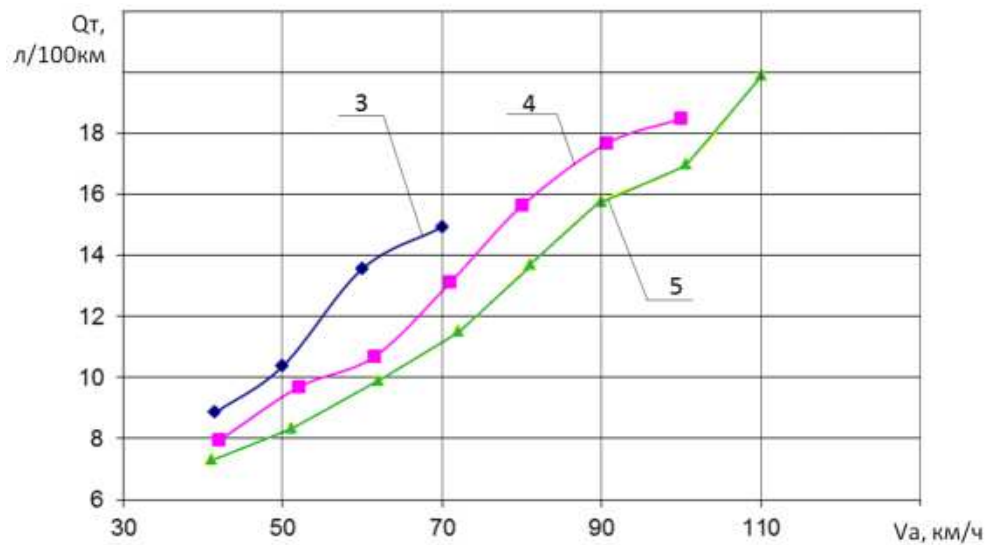


Рис. 10. Топливные характеристики установившегося движения (цифры – номер использованной передачи)

Перед замерами расхода в магистральном цикле была проведена разметка дороги в соответствии с ГОСТ Р 54810-2011. На трассе установлены фишки, и движение автомобиля было организовано по схеме ГОСТа. Общая длина мерного участка составляет 4 км. Проведено четыре заезда для оценки повторяемости (табл. 2).

Таблица 2
Результаты заезда для оценки повторяемости

№ заезда	Расход за цикл, л
1	0,568236
2	0,568649
3	0,565097
4	0,566912
Среднее	0,567223

Высокая повторяемость результатов подтверждает качество использованного прибора, правильность выбранного способа счета импульсов, повторяемость режимов движения. Результат будет использован для оценки сходимости результатов, полученных в расчетной программе, разрабатываемой параллельно.

Инженерные расчеты и математическое моделирование движения автомобиля при расчете расхода топлива выполнены в программном комплексе компании GammaTechnologiesInc (GTI) – GT-SUITE, позволяющем решать широкий спектр задач, в том числе, относящихся к исследованию динамики ТС. Адаптация программного комплекса GT-SUITE для расчета расхода топлива в ездовых циклах выполнена с учетом сопоставимости результатов расчетов по известным теоретическим зависимостям [1] и в соответствии с алгоритмами, используемыми в комплексе.

В результате расчетов и графической интерпретации их результатов установлена тождественность основных тягово-скоростных и топливно-экономических характеристик, полученных в результате расчетов с помощью известных теоретических зависимостей [1], с использованием программного комплекса GT-SUITE и полученных в результате натурных испытаний (рис. 11).

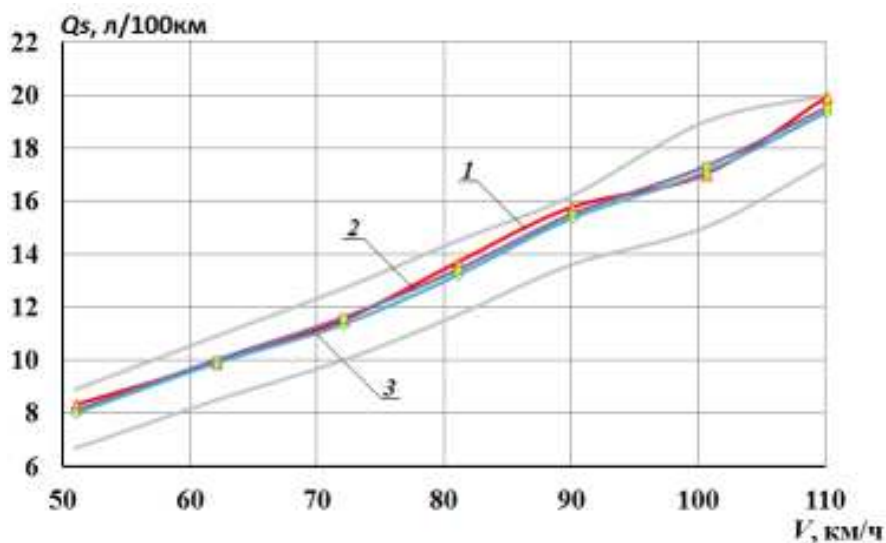


Рис. 11. Расчетные и экспериментальные топливно-экономические характеристики при движении на 5-й передаче:

1 – при испытаниях; 2 – по результатам моделирования в GT-SUITE;
3 – по результатам аналитического расчета

Библиографический список

1. **Кравец, В.Н.** Теория автомобиля: учебник / В.Н. Кравец; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – 2-е изд., переработ. – Нижний Новгород, 2013. – 413 с.
2. **ГОСТ Р 54810 -2011** Автомобильные транспортные средства. Топливная экономичность. Методы испытаний. – М.: СТАНДАРТИНФОРМ, 2012. – 23 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

S.M. Ogorodnov, A.N. Tikhomirov, D.V. Sharov

THE STUDY OF THE FUEL CONSUMPTION OF THE LIGHT COMMERCIAL VEHICLE GAZELLE NEXT BY USING OF EXPERIMENTAL METHOD

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev

Purpose: Determination of light commercial vehicle fuel consumption with the power unit EURO 5 by means of experimental method with application of the modern measurement equipment.

Design/methodology/approach: The experimental study uses a flow meter Corrsys-Datron DFL3x. This equipment is absolutely reliable, high quality and designed for a long service life.

Findings The results obtained during the experiment are satisfactorily complying with the results of simulation and the analytical calculations.

Research limitations/implications The present study provides a starting-point for further research in the area of increasing of ground vehicles fuel efficiency.

Originality/value The main feature of the study is using of modern measurement equipment and analytical approach that could be used for determination of vehicles fuel consumption.

Key words: fuel consumption, fuel efficiency, GAZelle Next.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 621.43

Л.А. Захаров¹, А.В. Сеземин², И.Л. Захаров¹, А.Н. Тарасов¹, А.В. Дегтярёв³

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ВОСПЛАМЕНЕНИЕМ ОТ СЖАТИЯ ЗАВОДА ОАО «РУМО» 8ЧН 22/28

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «РУМО» (г. Нижний Новгород)²,
ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева» (г. Нижний Новгород)³

Рассматриваются теоретические и экспериментальные исследования повышения экологической безопасности поршневого двигателя внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия и методы ее обеспечения. Предложен скорректированный рабочий цикл и инженерное решение с рациональной геометрической, физической и термодинамической моделями, обеспечивающий выполнение современных норм по образованию токсичных веществ ПДВС 8ЧН 22/28 с ОГ отечественных и зарубежных стандартов IMO Tier II при сохранении энергетических и экономических показателей.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, экологическая безопасность, отработавшие газы, рабочий цикл, модели цикла.

В конце XX в. все страны, производящие поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС) с воспламенением от сжатия, отмечали 100-летие мирового двигателестроения.

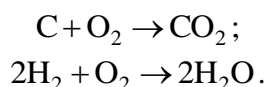
Сегодня ПДВС с воспламенением от сжатия заняли одно из ведущих мест в составе энергетических установок водного, воздушного и наземного транспорта, благодаря их важным преимуществам:

- большому диапазону получения агрегатной *внутренней энергии* (от нескольких кДж до 450000 МДж) – способ обеспечения энергетической безопасности;
- высокой топливной экономичности (до 153 г/кВт·ч), определяемой эффективным энергопреобразованием, коэффициентом полезного действия около 50% – метод экономической безопасности;
- широкому диапазону скоростных и нагрузочных режимов – эффективный метод повышения экологической безопасности по российским и европейским стандартам.

В последние 20–25 лет мировое двигателестроение энергично развивалось, при этом были полностью пересмотрены основные тенденции реформирования и развития инженерных решений и их методов обеспечения энергетической, экономической и экологической безопасности. Преодолен как бы «звуковой барьер» – по величине среднего термодинамического, индикаторного и эффективного давлений, следовательно, по увеличению цилиндровых и агрегатных мощностей. Найдены новые принципиальные идеи повышения энергопреобразования (анализ, синтез, расчет полного объема цилиндра $V_a = \text{const}$ при минимальной геометрической степени сжатия $\epsilon = 11$, в качестве первоначальной точки для расчета; использования КШМ с переменной геометрической степенью сжатия от 11 до 30 за счет увеличения отношения хода поршня к диаметру цилиндра от 1,25 до 1,33; повышения давления впрыска топлива до 240 МПа и максимального давления сгорания до 19–22 МПа [1, 2, 3].

Экологическая безопасность поршневых двигателей внутреннего сгорания с воспламенением от сжатия и методы ее обеспечения – чрезвычайно актуальны. Изучение закономерностей эмиссии вредных веществ, поиск и реализация путей снижения токсичности выбросов с отработавшим рабочим телом ПДВС находятся в сфере приоритетных направлений модернизаций транспортной техники. Вследствие недостаточного совершенства протекания химических реакций в процессе сгорания, основанного на *поцикловом сжигании* энергоносителя, в отработавших газах ПДВС, выбрасываемых в атмосферу, содержится значительное количество веществ, оказывающих вредное воздействие на окружающую среду и здоровье людей. В составе этих выбросов находится до трехсот химических элементов, а общая масса вредных и токсичных веществ может достигать 30% от массы израсходованного энергетическими установками энергоносителя.

Теоретически при полном сгорании углеводородного энергоносителя образуются продукты вредных и безвредных для здоровья людей веществ: диоксид углерода и пары воды в соответствии с реакциями:



Азот, который содержится в воздухе в количестве 79,1% по объему, переходит в состав отработавших газов. Эти продукты составляют 95-99% объема отработавших газов и не относятся к вредным. Остальные 1-5% объема отработавших газов токсичны и загрязняют окружающую среду:

- оксид углерода, различные углеводороды и сажевые частицы (1,1-3,9%);
- оксиды азота (0,2-0,25%).

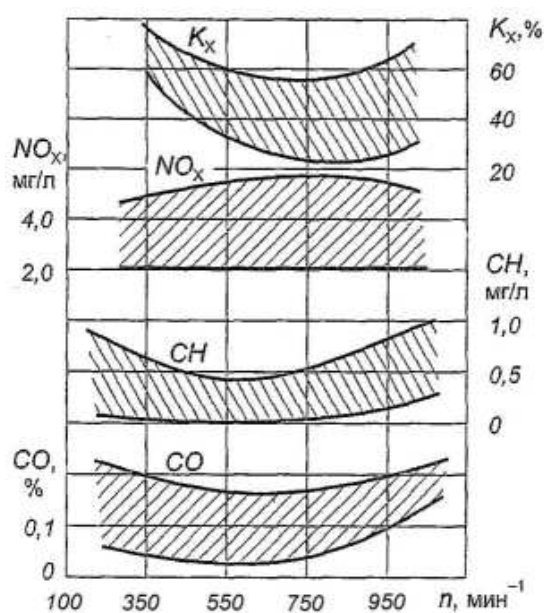


Рис. 1. Зависимость содержания токсичных веществ в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия от частоты вращения коленчатого вала

Оксид азота NO – кровяной яд, а диоксид азота NO_2 в составе азотной кислоты разрушает ткани бронхов и легких при концентрации 40-80 млн^{-1} . Концентрация CO в количестве 1200-1600 мг/м^3 приводит к летальному исходу.

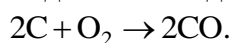
Качество атмосферного воздуха оценивается коэффициентом экологической безопасности, представляющий отношение действительной концентрации вредного и токсичного вещества в воздухе к предельно допустимой его концентрации (ПДК) по медико-санитарным нормам:

$$\eta_{ЭБ} = \frac{C + C_{\phi}}{\text{ПДК}} \leq 1,$$

где C – концентрация вредного или токсичного вещества, выбрасываемого в атмосферу, мг/м³; C_{ϕ} – фоновая концентрация вредного или токсичного вещества, мг/м³; ПДК – предельно допустимая концентрация вредного или токсичного вещества, мг/м³. Коэффициент экологической безопасности $\eta_{ЭБ}$ оценивает возможность постановки ПДВС на производство и на допуск к эксплуатации.

Используя изложенное, рассмотрим образование токсичных веществ при осуществлении рабочего цикла в рабочей камере ПДВС. Поцикловое сгорание энергоносителя в рабочей камере ПДВС как механизм образования вредных и токсичных компонентов отработавших газов еще не до конца раскрыт. Однако на современном уровне исследованы закономерности влияния режимных и регулировочных факторов на эмиссию отдельных компонентов, которые необходимо проанализировать:

- образование оксида углерода происходит из-за недостатка окислителя:



Концентрация CO в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия обычно не превышает 0,-0,4%, а его удельный выброс находится в пределах 5-9 г/кВт·ч;

- образование углеводородов происходит в виде продуктов неполного разложения и окисления энергоносителя, а также пары топлива. Углеводороды СН образуются также на границе топливной струи с нижним концентрационным пределом и при попадании топлива на холодные стенки поверхности камеры сгорания. При хорошо организованном рабочем цикле концентрация СН в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия составляет 400-600 млн⁻¹, а удельный выброс – 1,4-4,2 г/кВт·ч;
- образование диоксида азота происходит при локальной температуре 2500 К в камере сгорания ПДВС с воспламенением от сжатия. Концентрация NO_x колеблется от 1200-4400 млн⁻¹, а удельный выброс достигает 17-19 г/кВт·ч;
- сажа образуется в течение всего процесса сгорания энергоносителя в виде частиц размером 0,4-0,8 мкм.

Далее рассмотрим *основные факторы*, влияющие на образование токсичных выбросов: оксиды углерода и азота, углеводороды и сажа. Определяющими факторами их образования являются:

- коэффициенты избытка воздуха локальный и общий;
- равномерность макроструктуры и рациональная микроструктура рабочей смеси.

В ПДВС с воспламенением от сжатия общий и локальный коэффициент избытка воздуха обеспечивает содержание в отработавших газах твердых частиц (сажи) R_z и углеводородов СН, но мало влияет на концентрацию оксида углерода CO. Заметное увеличение продуктов неполного сгорания и сажеобразование наблюдается при коэффициенте избытка воздуха 1,25-1,45.

Равновесность макроструктуры и рациональная микроструктура требует рационального угла момента впрыска энергоносителя под высоким давлением и образования рациональной рабочей смеси, позволяющая получить наиболее выгодные энергетические, экономические и экологические показатели в рабочей камере цилиндра ПДВС. Однако при работе ПДВС по скоростной характеристике (рис. 1) (с подачей топлива по минимальному содержанию CO – нижние кривые, и на полной подаче топлива – верхние кривые) с увеличением частоты вращения наблюдается некоторое снижение (по всему фронту подачи топлива) CO, СН, NO_x, сажи и дымности, что объясняется интенсификацией процессов впрыскивания, распыливания, подогрева, испарения и смешения энергоносителя с усилением вращения воздуха вокруг и вдоль продольной оси цилиндра. Такое улучшение экологических характеристик происходит только до определенного режима (по данным эксперимента до

$n = (0,77...0,81) \cdot n_n$). Дальнейший рост частоты вращения коленчатого вала сокращает время и ухудшает качество смесеобразования, что ведет к повышению концентрации CO , CH , NO_x , сажи и дымности по всему фронту и ограничивает его быстроходность. На рис. 1 максимальное значение содержания NO_x по всему фронту соответствует режиму полного и быстрого сгорания энергоносителя, когда содержание CO и CH минимально.

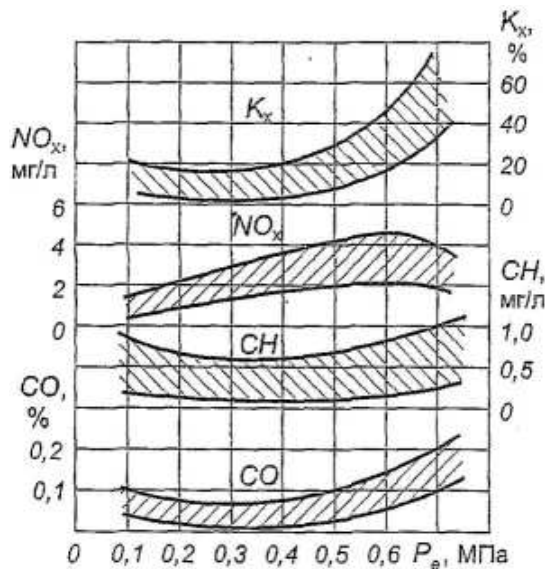


Рис. 2. Зависимость содержания токсичных веществ в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия от нагрузки

Общей закономерностью образования токсичных компонентов в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия является рост продуктов неполного сгорания (CO , CH , сажи) по мере увеличения нагрузки (рис. 2), когда коэффициент избытка воздуха понижается от 6,5-8,5 единиц на холостом ходу до 1,6-1,8 на режиме номинальной мощности. В отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия (рис. 2) на режиме холостого хода содержится 0,1% (по объему) CO , концентрация которого по всему фронту увеличивается при росте среднего эффективного давления вплоть до 0,2% на режиме полной подачи топлива.

Образованию CH в продуктах сгорания ПДВС с воспламенением от сжатия способствуют относительно низкие температуры среды и локальный дефицит кислорода. Поэтому на малых нагрузках по всему фронту образуется наибольшее количество углеводородов (вплоть до $0,8 \text{ г/м}^3$). Минимум выбросов CH происходит при $p_{me} = 0,45-0,65$ МПа, а при полной подаче энергоносителя, вследствие локального дефицита кислорода в зонах диффузионного горения, концентрация CH вновь повышается.

Образование сажи с повышением нагрузки более значительное. Резкое повышение дымности начинается по всему фронту с $p_{me} = 0,45-0,55$ МПа из-за ухудшения процесса смесеобразования, при рациональном значении цикловой подачи, обеспечивающее выполнение нормативов по дымности отработавших газов.

Количество оксидов азота NO_x в отработавших газах ПДВС с воспламенением от сжатия по мере роста нагрузки также возрастает по всему фронту, достигая максимума при $p_{me} = 0,55-0,65$ МПа, что объясняется ростом температурного уровня рабочего цикла при сохранении достаточного количества несвязанного кислорода. Дальнейший рост нагрузки приводит к ухудшению смесеобразования вследствие увеличения цикловой подачи энергоносителя и появления в камере сгорания большого числа зон переобогащения топливом. В этих зонах уменьшается температура и недостаточна концентрация несвязанного кислорода, что уменьшает эмиссию NO_x в отработавших газах.

Предельно допустимая концентрация основных токсичных компонентов обработавших газов ПДВС в атмосфере представлена в табл. 1 предельные значения выбросов NO_x по ИМО на рис. 3. Экспериментами установлено, что эффективность методов снижения выбросов NO_x (рис. 4).

Таблица 1

Предельные значения выбросов NO_x по ИМО

Период действия	NO_x , г/кВт при номинальной частоте вращения n , мин ⁻¹			Испытательная процедура
	$n < 130$	$130 < n < 2000$	$n > 2000$	
Tier I (01.01.2000...01.01.2011)	17,0	$45 \cdot n^{-0,2}$	9,84	четырёхступенчатые циклы E2, E3 (ISO 8178/4) цикл D2
Tier II (01.01.2011...01.01.2016)	14,36	$44 \cdot n^{-0,23}$	7,66	
Tier III (в зонах ЕСА после 01.01.2016)	3,4	$9 \cdot n^{-0,2}$	1,97	

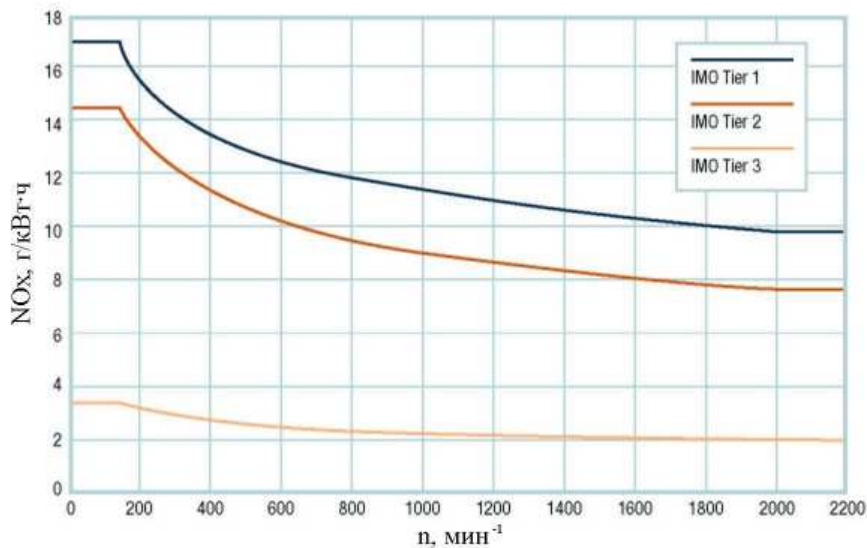


Рис. 3. Предельные значения выбросов NO_x по ИМО

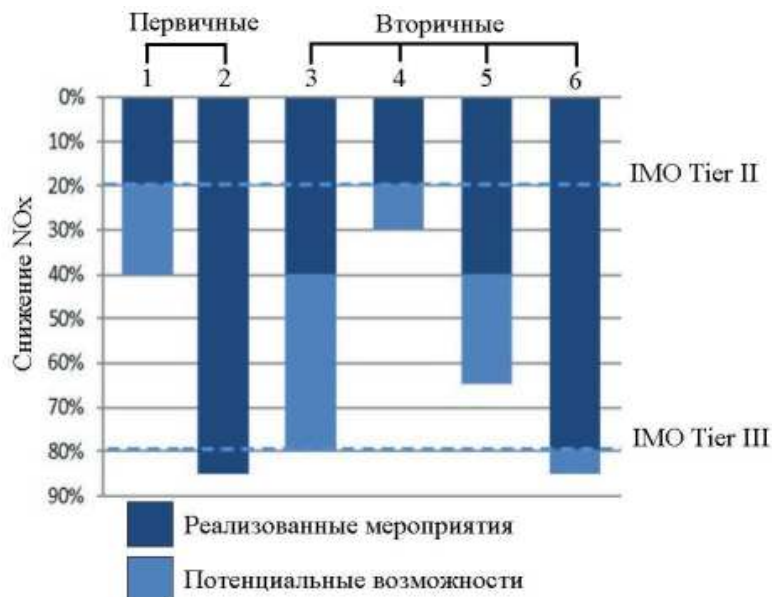


Рис. 4. Методы снижения выбросов NO_x

Анализ рис. 4 показывает, что одним из основных методов снижения выбросов NO_x является метод совершенствования рабочего цикла ПДВС, который позволит обеспечивать экологическую безопасность по выбросам NO_x по отечественным и европейским стандартам IMO Tier II.

Рассмотрим предлагаемый модернизированный термодинамический цикл.

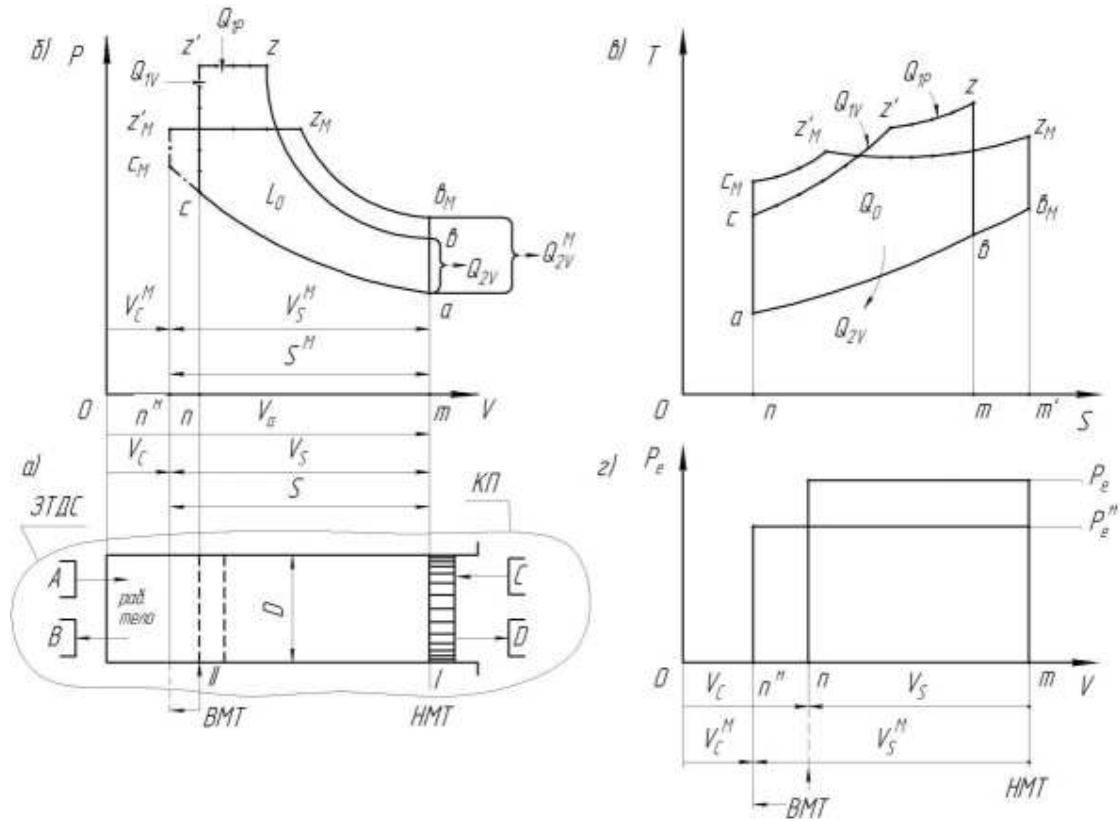


Рис. 5. Теоретический ПДВС 8ЧН 22/28 работающий:

a – по циклу Тринклера с $\epsilon=13,5$; *б* – по модернизированному циклу Тринклера с $\epsilon=15$ в V, p и s, T диаграммах; 1 – полезная работа L_0 рабочего цикла Тринклера равна площади диаграммы F , т.е. $L_0 = F_{acz'ba}$; 2 – полезная работа L_0^M модернизированного цикла, равна площади диаграммы F^M , т.е. $L_0^M = F^M_{acmz'mzmbma}$; $L_0 = L_0^M$ – по условиям эксперимента (рис. 5, б); $Q_0 = Q_0^M$ – по условиям эксперимента (рис. 5, в); $P_e \neq P_e^M$ – по условиям эксперимента (рис. 5, г)

На рис. 5 приведен теоретический ПДВС, работающий по циклу Тринклера. Теоретический ПДВС состоит: 1) из геометрической модели (рис. 5, а), в которую входит размерность ПДВС 8ЧН 22/28 ($D=0,220$ м, $S=0,280$ м, $V_a=0,011524846660$ м³, $V_s=0,010638320$ м³, $V_c=0,00088652660$ м³, $\epsilon=13$, $\Theta = S/D = 1,273$, $k = r/l = 1/4,643$, НМТ, ВМТ, цилиндр закрытый подвижным поршнем). Для проведения всесторонних исследований Θ и k необходимо иметь точку отсчета. Такой точкой отсчета предлагается минимальная степень сжатия $\epsilon=11$ для ПДВС с воспламенением от сжатия и полный объем цилиндра $V_a=0,011524846660$ м³ исследуемого двигателя, по которым определяется начальный рабочий объем цилиндра и ход поршня ($V_s^n = 0,0104771333330$ м³, $S^n = 0,275758$ м, $\Theta^n = S^n/D = 1,253444$). Исследование на геометрической модели – получение максимальной энергии энергоносителя и его энергопреобразование (при степенях сжатия $\epsilon=11, 13, 15, 20, 25, 30, 40, 50$), получение наивыгоднейших термодинамических показателей.

Физическая модель (рис. 5, б), включает: рабочее тело (воздух как идеальный газ и энергоноситель подвода количества энергии к рабочему телу, помещенных в цилиндр ПДВС;

источник [С и приемник [D механической энергии; источник и приемник энергии рабочему телу и от рабочего тела соответственно А] и В]; контрольная поверхность КП).

Термодинамическая модель включает: $acz'zba$ – рабочий цикл ПДВС, работающий по циклу Тринклера (ac – адиабатический процесс сжатия; cz' – изохорический процесс подвода теплоты $Q_{1v}=0,6 \cdot Q_1$; $z'z$ – изобарический процесс подвода теплоты $Q_{1p}=0,4 \cdot Q_1$; zb – адиабатический процесс расширения; ba – изохорический процесс отвода теплоты Q_{2v}), позволяющий получить наивыгоднейшие энергетические, экономические и экологические показатели.

Для выполнения экологической безопасности по выбросам NO_x с отработавшими газами ПДВС предлагается модернизированный термодинамический цикл Тринклера (рис. 5):

1) в геометрической модели введено изменение: степень сжатия увеличена с 13 до 15;
2) в физической модели введено изменение: четыре топливных факела (1, 3, 5, 7) имеют угол наклона 72° , а другие четыре топливных факела (2, 4, 6, 8) имеют угол наклона 75° , как на серийном ПДВС;

3) в термодинамической модели введено изменение: ac_m – процесс сжатия представлен в виде двух последовательно повторяющихся процессов (ac – адиабатический процесс сжатия и cc_m – политропический процесс сжатия при увеличении степени сжатия с 13 до 15 с дополнительным подводом энергии $Q_{1m} = 0,14Q_1$ от теплоисточника А]; $c_mz'_m$ – изохорический процесс с подводом энергии $Q_{1v} = 0,2Q_1$ от теплоисточника А]; z'_mz_m – изобарический процесс с подводом энергии $Q_{1p} = 0,66Q_1$ от теплоисточника А]; $z_m b_m$ – адиабатический процесс расширения; $b_m a$ – изохорический процесс отвода энергии от рабочего тела Q_{2v}^m в теплоприемник В) [4, 5, 6].

Проведен синтез в САПР ДВС (исследование) циклов Тринклера и скорректированного цикла Тринклера, у которых полезные работы одинаковые, но температуры в точке z у скорректированного цикла ниже на 400 К по сравнению с циклом Тринклера, что резко уменьшает образование оксидов азота на действительном процессе в камере сгорания ПДВС с воспламенением от сжатия (табл. 2).

Таблица 2

Результаты экспериментального исследования базового и модернизированного рабочего цикла ПДВС 8ЧН 22/28

Оценочные показатели	Базовый рабочий цикл	Модernизированный рабочий цикл
Частота вращения коленчатого вала, мин ⁻¹	1000	1000
Среднее индикаторное давление, МПа	1,707	1,707
Коэффициент избытка воздуха	2,22	2,20
Угол момента опережения впрыска топлива, п.к.в. до ВМТ	18,0	12,0
Эмиссия NO_x , г/кВт·ч	11,99	8,59
Комплекс суммарной эмиссии NO_x и РМ	1,9	1,84
Индикаторный КПД	0,556	0,557

Анализ экспериментальных значений основных технических показателей работы модернизированного и базового рабочих циклов ПДВС, приведенных в табл. 2, показывает: 1) улучшение экологических показателей за счет модернизации рабочего цикла по первичным мероприятиям позволило выполнить нормы отечественных и зарубежных стандартов по выбросам оксидов азота NO_x с отработавшими газами; 2) сохранение индикаторных показателей ПДВС 8ЧН 22/28 без изменения.

Библиографический список

1. **Захаров, Л.А.** Метод оценки термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по циклу Отто на ранней стадии проектирования / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.Н. Тарасов // Журнал ААИ. 2011. №2(67). С. 42–47.
2. **Захаров, Л.А.** Повышение топливной экономичности дизельного двигателя за счет снижения механических потерь / Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, А.В. Сеземин // Журнал ААИ. 2011. №3(68). С. 41–43.
3. Современный поршневой ДВС с перспективными энергетическими, экономическим и экологическими показателями, получаемыми за счет повышения внутренней энергии рабочего тела / Л.А. Захаров [и др.] // Журнал ААИ. 2013. №2(79). С. 14–20.
4. Совершенствование термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по гибриднему циклу / Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1 (86). С. 174–184.
5. Анализ технических характеристик и тенденций развития атмосферных поршневых двигателей внутреннего сгорания / Л.А. Захаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013.
6. **Захаров, Л.А.** Исследование и расчет термодинамических показателей поршневого двигателя внутреннего сгорания, работающего по циклу Дизеля, методом технической термодинамики: метод. указ. / сост.: Л.А. Захаров [и др.]; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород 2010. – 32 с.

*Дата поступления
в редакцию: 29.04.2014*

L.A. Zakharov, A.V. Sezemin, I.L. Zakharov, A.N. Tarasov, A.V. Degtyarev

**METHODS OF ECOLOGICAL SECURITY OF INTERNAL COMBUSTION PISTON
ENGINE WITH COMPRESSION-IGNITION BY JSC "RUMO" 8CHN 22/28**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
JSC RUMO (Nizhny Novgorod),
JSC CDB for HF n.a. R.E. Alexeev (Nizhny Novgorod)

Subject: The theoretical and experimental studies to improve the environmental safety piston internal combustion engine with compression ignition and methods for achieving this is considered.

Design/methodology/approach: Proposed duty cycle corrected and engineering solutions with a rational geometrical, physical and thermodynamic models, ensuring compliance with modern standards for toxic substances 8CHN HDR 22/28 to exhaust domestic and foreign standards IMO Tier II while maintaining energy and economic indicators.

Findings: The analysis of the experimental values of the basic technical parameters of work of the modernized and source operating cycles shows: improvement of ecological parameters due to modernization of the operating cycle on primary measures allowed to observe the norms of domestic and foreign standards for emissions of nitrogen oxides in exhaust gases; the preservation of indicator indicators of the piston internal combustion engine 8CHN 22/28 without changes.

Key words: internal combustion engine, environment, exhaust gases, the duty cycle, cycle model.

УДК 621.18

А.В. Локтев, А.В. Малахов

ТЕХНИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ МОДЕРНИЗАЦИИ ГАЗОГОРЕЛОЧНЫХ УСТРОЙСТВ ОТОПИТЕЛЬНЫХ КОТЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработано техническое решение модернизации газогорелочных устройств водогрейных котлов большой мощности в целях повышении уровня их автоматизации. Рассмотрены особенности плавного регулирования подачи газа к шести горелкам котла ПТВМ-30М поворотными заслонками.

Ключевые слова: водогрейные котлы, газогорелочные устройства, расход газа, автоматическое регулирование расхода газа.

Модернизация газовых котлов большой мощности 70–80-х годов выпуска с повышением уровня автоматизации может производиться путём замены горелок на современные или без такой замены применением современных систем автоматизации котельных установок. Первый способ более дорогой, второй требует меньших затрат, но связан с тщательной проработкой вопросов топливоподачи, особенно для котлов, оборудованных группой горелок. Автоматизация процесса регулирования тепловой мощности требует разработки алгоритма регулирования расхода газа.

В предлагаемой статье приводится методика разработки алгоритма регулирования режимов работы горелок, что позволяет автоматизировать процессы управления котлом.

Котлы ПТВМ-30М производства 70–80-х годов оборудованы шестью газовыми горелками, включаемыми в работу в основном попарно. Регулирование расхода газа на каждой горелке производится поворотными заслонками. Так как горелки подключены к общему газовому коллектору параллельно, существует взаимное влияние гидравлических режимов их работы. При ручном управлении горелками схема регулирования производится на основе графиков и номограмм, полученных при наладочных испытаниях (рис. 1 и рис. 2).

За основу при разработке алгоритма регулирования расхода газа принимается регулирование попарным включением горелок и регулирование на самих горелках расхода газа поворотными заслонками.

Регулирование расхода газа на котёл будет плавным, если:

- весь интервал расходов по режимной карте котла охватывается поддиапазонами работы последовательно включаемых горелок;
- в каждом поддиапазоне регулирование расхода обеспечивается при углах поворота заслонок, не выходящих за пределы $10-0^\circ$.

Выполнение первого требования, как это следует из режимной карты котла, обеспечивается имеющимися в котле шестью горелками. Выполнение второго требования рассмотрим подробнее.

Для анализа расхода газа через параллельно работающие горелки используем такие параметры, как «условное сопротивление» S и «проводимость» $a = 1/\sqrt{S}$ участков гидравлических сетей.

Используя эти параметры, зависимость расхода газа через горелку V от перепада давлений Δp на ней можно выразить соотношением

$$V = a\sqrt{\Delta p} = \frac{1}{\sqrt{S}}\sqrt{\Delta p}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (1)$$

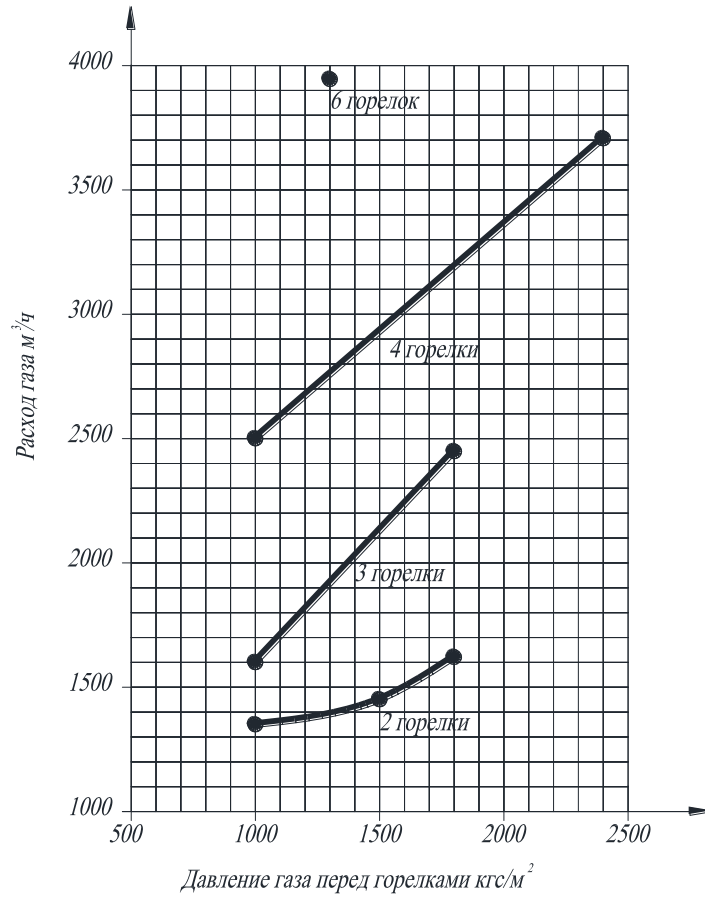


Рис. 1. Расходная характеристика горелок

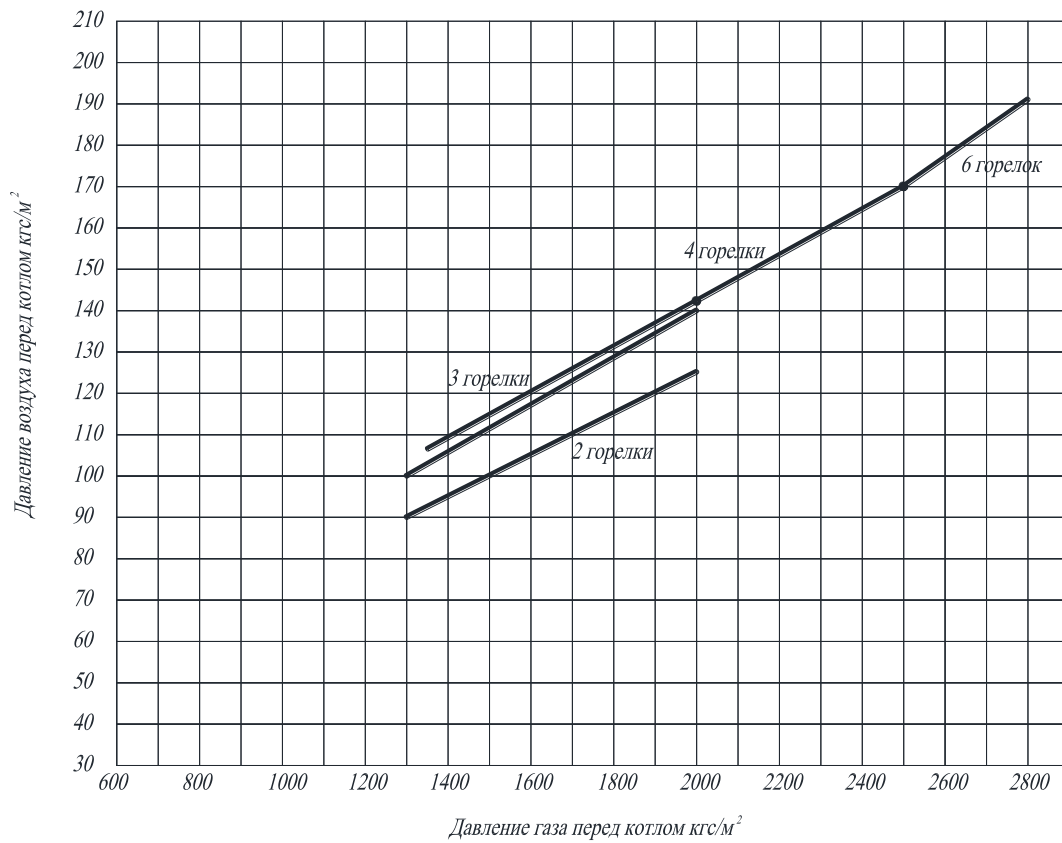


Рис. 2. График соотношения «газ-воздух»

Перепад давления на горелке

$$\Delta p = p_1 - p_2, \quad (2)$$

где p_1 – давление перед горелкой, Па; p_2 – давление в топке, Па.

Так как давление в топке составляет $p_2=20$ Па и значительно меньше, чем давление перед горелками $p_1 \geq 10000$ Па, можно принять $\Delta p \approx p_1$. Исходя из этого выражение (1) можно записать в виде

$$V = a\sqrt{p_1} = \frac{1}{\sqrt{S}}\sqrt{p_1}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (3)$$

Для параллельно работающих горелок котла расход газа складывается из их «проводимости». Используя фактические данные расходов и давлений из режимной карты котла ПТВМ-30М, можно получить зависимость расходов через n - работающих горелок:

$$V = \frac{n}{600}\sqrt{p_1}, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (4)$$

где n – количество работающих горелок.

Незначительное несовпадение расчётных значений по данному выражению в некоторых точках расходной характеристики горелок связаны с влиянием режимов течения газа на «проводимость» горелок и точностью измерений. В рассматриваемом диапазоне параметров газа данная функция непрерывна, т.е. обеспечивается весь диапазон регулирования расходов.

Диапазон расходов в соответствии с режимной картой составляет: $V_{2\min}=1350$ нм³/ч (0,375 нм³/с); $V_{2\max}=1828$ нм³/ч (0,508 нм³/с); соответственно через одну горелку: $V_{1\min}=0,188$ нм³/с; $V_{1\max}=0,254$ нм³/с.

Используя выражение (4) можно найти значения $p_{1\min}$ и $p_{1\max}$, т.е

$$p_i = \left(\frac{600V}{n} \right)^2. \quad (5)$$

Получим $p_{1\min}=12724$ Па и $p_{1\max}=23165$ Па.

Давление перед горелками регулируется поворотными заслонками. Определим угол поворота заслонок при этих расходах. Давление в газовом коллекторе Ду 250 примем равным 55000 Па (по данным эксплуатационной организации), тогда перепады давления на поворотных заслонках составят:

- при $V_{2\min}\Delta p_{\text{засл}}=55000 - 12724$ Па;
- при $V_{2\max}\Delta p_{\text{засл}}=55000 - 23165$ Па.

Коэффициенты сопротивления заслонок определяются выражением

$$\zeta = 2\Delta p_{\text{засл}}\rho v, \text{ м}^3/\text{с}, \quad (6)$$

где ρ – плотность газа; v – скорость в трубе Ду 100.

Для режима $V_{2\min}$ $\xi=192$, соответственно для $V_{2\max}$ $\xi=79$. Используя зависимость коэффициента местного сопротивления поворотных заслонок от расхода, находим углы поворота заслонок на этих режимах [5]. Аналогично процесс будет происходить при включении следующих горелок. Если дополнительно к двум ввести в работу третью горелку, то для того чтобы не произошёл скачок расхода, угол поворота всех трёх заслонок должен составлять $\alpha = 64^\circ$. То есть при переходе с двух горелок на три надо одновременно с открытием третьей горелки на двух работающих угол перекрытия перевести с 57° на 64° . Аналогично будет происходить процесс при включении четвертой горелки, а также пятой и шестой (одновременно).

Результаты расчёта для конкретной котельной приведены в табл. 1, при этом давление в общем газовом коллекторе Ду 250 составляет 55 кПа.

Таблица 1

Расчёт углов поворота регулирующих заслонок

Расход газа на котёл м ³ /ч м ³ /с	Кол-во горелок	Расход газа через одну горелку, м ³ /с	Скоростной напор $\rho v^2/2$	Давление перед заслонками P_1 , Па	Давление после заслонок P_2 , Па	Перепад давлений на заслонках $\Delta P = P_2 - P_1$, Па	Коэффициент сопротивления заслонки $\zeta_{зас} = 2\Delta P / \rho v^2$	Угол поворота заслонки, град.
1350	2	0,188	220	55 000	10 000	45 000	204	63
0375								
1630	2	0,225	320		18 000	37 000	115	60
0,45								
1600	3	0,148	137		10 000	45 000	328	67
0,44								
2450	3	0,226	321		18 000	37 000	115	60
0,68								
2500	4	0,172	186		10 000	45 000	241	64
0,69								
3720	4	0,258	417		24 000	31 000	74	57
1,03								
4487	6	0,207	267	13 000	42 000	157	62	
1,25								

Выполненные расчёты во всём диапазоне расходов газа показывают, что углы поворота заслонок будут в диапазоне 57-67°. Графически характер регулирования приведён на рис. 3.

При рабочем проектировании исходные данные должны быть уточнены, и для обеспечения большего запаса может быть введена дополнительная диафрагма. Кроме того, для автоматизации процессов управления горелками котла необходимо рассчитывать нестационарные режимы работы установки (рис. 4 и рис. 5).



Рис. 3. Характер регулирования расхода газа на котёл изменением количества работающих горелок и углов поворота заслонок

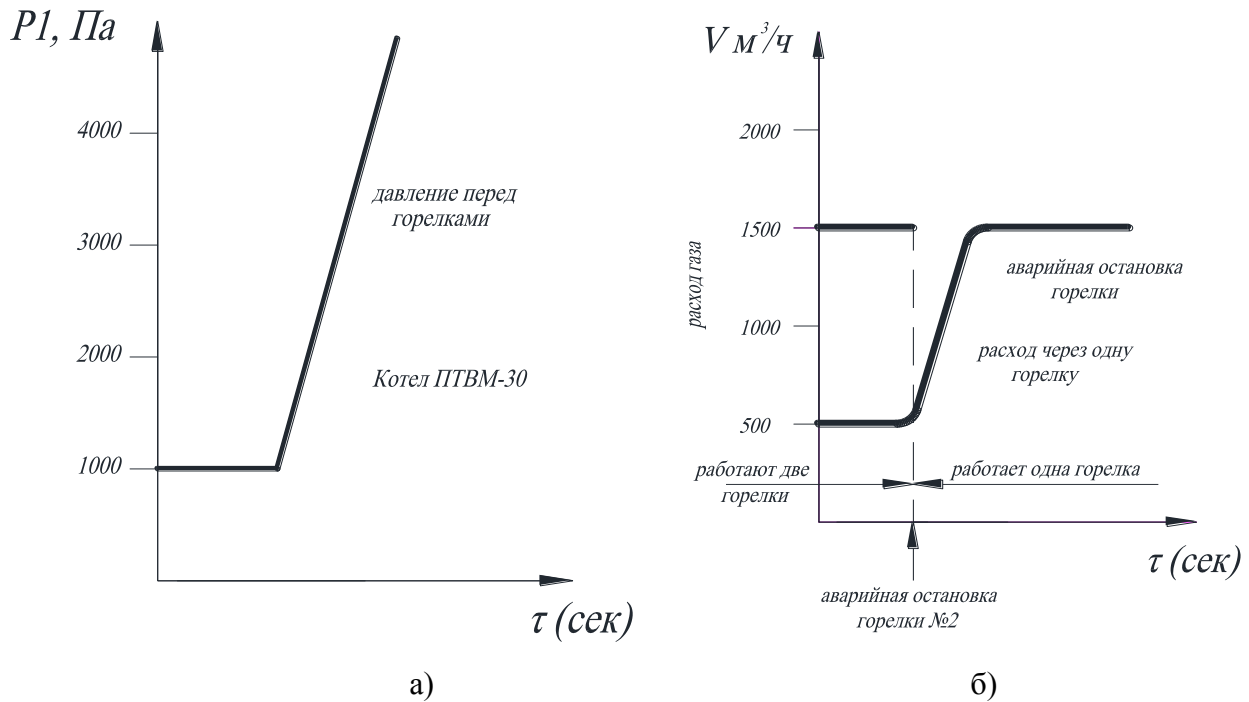


Рис. 4. Схема процессов при аварийной остановке одной из двух горелок работающих на минимальном режиме:

a – изменение давления, *б* – изменение расхода

Выводы

1. Принципиально схема регулирования расхода газа будет сводиться к следующему. По сигналу о запуске котла поворотные заслонки на первой паре горелок из закрытого положения плавно переводят в положение максимального расхода газа, это отслеживается по расходомеру газа, одновременно производится регулирование расхода воздуха по своему расходомерному устройству. Если температура теплоносителя по температурному графику недостаточна, будет происходить дальнейшее открытие заслонок (уменьшение угла поворота). При достижении максимального расхода газа для двух горелок поступает сигнал о включении третьей горелки. При этом на уже работающих горелках угол поворота заслонок будет плавно увеличен, а на запускаемой горелке заслонка будет плавно открываться (на установленном режиме углы поворота работающих заслонок будут одинаковы). Одновременно производится регулирование расхода воздуха и т.д. Алгоритм регулирования будет реализовываться системой АСУТП.

2. Расчёты во всём диапазоне регулирования расхода газа показывают, что углы поворота заслонок не превышают 67° , т.е. заслонки будут работать в зоне плавного регулирования.

3. Предлагаемая схема расчётов учитывает аварийные режимы работы горелок.

4. Приведённые результаты исследований могут быть использованы для решения вопросов автоматизации и других котлов, оборудованных группой горелок.

Библиографический список

1. Бузник, Е.Ф. Производственные и отопительные котельные / Е.Ф. Бузник. – М: Энергоатомиздат, 1984. – 232 с.
2. Справочник по пуску, наладке и эксплуатации котельных установок / И.Е. Герасиненко [и др.]. – Киев: Техника, 1986. – 334 с.
3. Гольстрем, В.А. Энергетический справочник инженера / В.А. Гольстрем. – Киев: Техника, 1983. – 48 с.

4. Локтев, А.В. Котельные установки для децентрализованного теплоснабжения / А.В. Локтев / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н.Новгород, 2007. – 95 с.
5. Промышленная теплоэнергетика и теплотехника: справочник / под ред. В.А. Григорьева, В.М Зорина. – М.: Энергоиздат. 1991. Кн. 4. – 586 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.04.2014*

A.V. Loktev, A.V. Malakhov

MODERNIZATION SOLUTIONS GAS BURNER UNITS HEATING BOILERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Developing an algorithm process automation mode control boilers with original manual control.

Design/methodology/approach: Theoretically investigated the processes controlling the supply of gas to the burner connected in parallel, working in pairs.

Findings: An algorithm for modulating fuel gas for the selection of actuators and control system development.

Research limitations/implications: The developed approaches are suitable for automation of such boilers equipped with a group of burners.

Originality/value: In the study used the known laws of hydrodynamics technical, but for this circuit are shown for the first time.

Key words: boilers, gas-burning devices, gas flow, automatic control of gas flow.

УДК 629.124

М.Ю. Сандаков

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСЧЁТА ЛЕДОВОЙ ХОДКОСТИ СУДОВ С ПОЛНЫМИ ОБВОДАМИ В БИТОМ ЛЬДУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья затрагивает вопросы движения транспортного судна, имеющего большой коэффициент общей полноты корпуса, в битом льду. В работе предложена новая гипотеза взаимодействия корпуса судна и обломков ледяного покрова. При движении в битом сплочённом льду полные обводы носовой оконечности корпуса судна толкают перед собой массы льда, тем самым достраивая корпус до более обтекаемой формы. Изучена форма достроенной «ледовой наделки» и определены её параметры. Создана и предложена методика расчёта сил ледового сопротивления движению судов с большим коэффициентом общей полноты в сплочённых битых льдах.

Ключевые слова: битый лёд, корпус судна с большим коэффициентом полноты, «ледовая наделка», трёхосный эллипсоид, ледовая ходкость, функции геометрии обвод корпуса, силы ледового сопротивления.

Актуальность работ по ледовой ходкости судов остаётся достаточно острой для России, что связано с увеличением добычи углеводородного сырья на Арктическом шельфе, работой промыслового флота в районах Крайнего Севера, транспортировкой редкоземельных металлов с полуострова Таймыр, охраной наших арктических территориальных водных границ. Для решения этих задач исследования ледопроеходимости транспортных судов в условиях битых льдов остаются актуальными и сегодня.

В настоящее время не существует научно обоснованного подхода к проектированию транспортных несамоходных речных судов, приспособленных работать в условиях ледовой навигации. Методы расчёта ледового сопротивления, созданные для транспортных судов многими авторами [5], не всегда могут быть применимы по отношению к данному типу судов из-за особенностей форм носовых оконечностей и соотношений главных размерений $V/T = (6\sim 8)$, а также значительных величин коэффициента общей полноты $\delta = (0,75\sim 0,95)$. Необходимо учесть, что несамоходные баржи имеют продолжительную цилиндрическую вставку в составе корпуса, около 90% длины конструктивной ватерлинии. Основным фактором невозможности применения ранее разработанных методик расчёта сил ледового сопротивления при движении судов в битых льдах является то, что во многие расчётные формулы очень часто входит тангенс угла притыкания действующей ватерлинии к диаметральной плоскости корпуса судна [5]. Рассматриваемые в исследовании суда имеют значение, упомянутого угла близким к 90 град., что соответствует близким к бесконечным величинам тангенса. Данное обстоятельство даёт в расчётах сил ледового сопротивления сильно завышенные значения, что не соответствует природе наблюдаемого явления движения судна с большим коэффициентом общей полноты в битом льду. Реальные суда обладают низкими качествами ледовой ходкости, но имеют установившееся движение в слое мелкобитого льда.

Наблюдения за работой судна в битых льдах позволяют заметить явление образования «ледовой наделки» в носовой части корпуса судна и определить геометрическую форму этой «наделки». Гипотеза достраивания частицами льда носовой оконечности наблюдаемого судна до четверти эллипсоида не противоречит картине взаимодействия корпуса судна с большим коэффициентом общей полноты и битым многослойным льдом.

Данный эллипсоид имеет все три главные оси различной величины, поэтому не может являться эллипсоидом вращения, как видно из рис. 1. Этот факт позволяет применить математический аппарат для дальнейших исследований аналитически описанной поверхности.

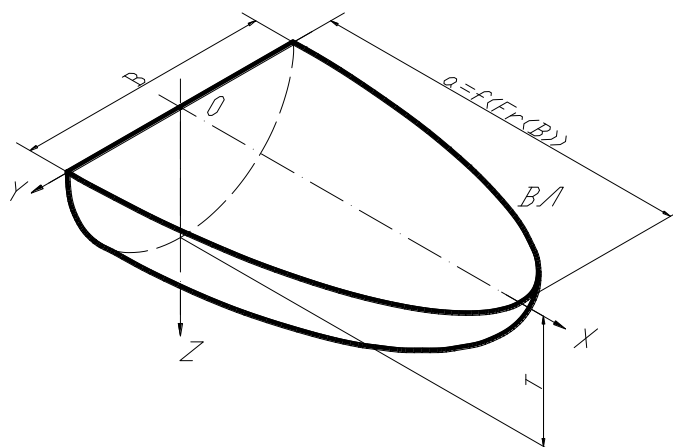


Рис. 1. Геометрия «ледовой наделки» из мелкобитого льда в виде эллипсоида

Каноническое уравнение эллипса имеет вид

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2}, \quad (1)$$

где $a \neq b \neq c$ – полуоси эллипсоида.

Согласно натурным исследованиям и результатам модельного эксперимента, длина полуосей эллипсоида определится следующим образом [6; 7]:

$$a = B2,61e^{-7,85Fr_B}, b = \frac{B}{2}, c = T, \quad (2)$$

где B – ширина судна; T – осадка судна; Fr_B – число Фруда, выраженное через ширину судна.

Так как для описания «ледовой наделки» необходима лишь часть эллипсоида – его четверть, – то создадим граничные условия

$$0 \leq x \leq a, -\frac{B}{2} \leq y \leq \frac{B}{2}, 0 \leq z \leq T. \quad (3)$$

В результате исследования граничных условий и данных модельного эксперимента получим уравнение формы поверхности эллипсоида (4)

$$\frac{x^2}{(2,61e^{-7,85Fr_B B})^2} + \frac{y^2}{[\frac{B}{2}]^2} + \frac{z^2}{T^2} = 1. \quad (4)$$

Уравнение (4) позволяет в дальнейшем провести аналитическое исследование в определении сил ледового сопротивления движению судна, имеющего большой коэффициент общей полноты корпуса, используя методику расчёта ледовой ходкости в битых льдах [5].

Изучаемый нами объект представляет собой толкаемый состав, состоящий из баржи и толкача. Суммарное значение ледового сопротивления битого льда, очевидно, будет состоять из суммы сил

$$R_{\text{сум}} = R_{\text{тол}} + R_{\text{л.н}}, \quad (5)$$

где $R_{\text{тол}}$ – ледовое сопротивление толкача; $R_{\text{л.н}}$ – ледовое сопротивление достроенной обломками льда носовой оконечности баржи, «ледовой наделки». Значением $R_{\text{тол}}$ можно пренебречь, в виду того, что корпус толкача имеет меньшую осадку, чем баржа (около 70%), и, самое главное, что его ширина корпуса составляет 60-70% от ширины корпуса толкаемого судна. Поэтому толкач (при условии грузовой осадки баржи) движется в «ледовом канале» с битым льдом меньшей сплочённости, а, как известно, битый лёд сплочённостью менее 4 баллов не оказывает значительное сопротивление движению судов [4].

Значение $R_{\text{л.н}}$ определяется по методу Е.М. Грамузова. Работа, затрачиваемая на преодоление обломков льда, является значительной частью энергетических затрат судна, движущегося в ледяном поле. Как отмечается в [5], сопротивление обломков льда можно представить в виде

$$R_0 = (\rho_B - \rho_L)gh\Omega_L(\Phi_{\text{п}} + f\Phi_{\text{пт}}) + c_{\text{и}}\rho_L hBv^2(\Phi_{\text{и}} + f\Phi_{\text{пт}}) + c_{\text{г}}\Omega_L v^2(\Phi_{\text{г}} + f\Phi_{\text{гт}}) \quad (6)$$

где ρ_B – плотность воды; ρ_L – плотность льда; g – ускорение свободного падения; h – тол-

щина льда; $\Omega_{\text{л}}$ – площади смоченной поверхности носовой оконечности; f – коэффициент трения льда; $c_{\text{и}}$ – коэффициент инерционных сил; $c_{\text{г}}$ – коэффициент гидродинамических сил; v – скорость движения судна; $\Phi_{\text{п}}$ – функция, обусловленная притапливанием льдин; $\Phi_{\text{п.т}}$ – функция сопутствующего трения льдин; $\Phi_{\text{и}}$ – функция импульсного (инерционного) сопротивления; $\Phi_{\text{и.т}}$ – функция трения импульсного (инерционного) сопротивления, обусловленного потерей кинетической энергии при ударе о льдины; $\Phi_{\text{г}}$ – функция гидродинамической составляющей пространственного взаимодействия обломков льда; $\Phi_{\text{г.т}}$ – функция трения гидродинамической составляющей.

Параметрами формы корпуса, оказывающими влияние на ледовую ходкость в битом льду, служат некоторые функции геометрии ($\Phi_{\text{п}}$, $\Phi_{\text{п.т}}$, $\Phi_{\text{и}}$, $\Phi_{\text{и.т}}$, $\Phi_{\text{г}}$, $\Phi_{\text{г.т}}$) характеризующие обводы корпуса судна (в нашем случае также и формы «ледовой наделки») с точки зрения ледового сопротивления.

В работе [3] предлагается следующий метод расчёта функций геометрии. Направляющие косинусы рассчитываются через частные производные от уравнения судовой поверхности. В нашем случае уравнение судовой поверхности легко выразить через уравнение формы «ледовой наделки». Расчёт производится в следующей последовательности: вычисление частных производных, вычисление подынтегральной функции в узлах сетки и численное интегрирование.

Для функций инерционной силы и инерционной силы трения необходимо рассчитать определённые интегралы:

$$\Phi_{\text{и}} = \frac{2}{B} \int_0^B n_x^2 dy; \quad \Phi_{\text{и.т}} = \frac{2}{B} \int_0^B n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy. \quad (7), (8)$$

Для их расчета, средствами Mathcad выразим из уравнения эллипсоида значение x :

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{T^2} - 1 \text{ solve, } x \rightarrow \left(\frac{a\sqrt{T^2 b^2 - T^2 y^2 - b^2 z^2}}{Tb} - \frac{a\sqrt{T^2 b^2 - T^2 y^2 - b^2 z^2}}{Tb} \right); \quad x = \frac{a\sqrt{T^2 b^2 - T^2 y^2 - b^2 z^2}}{Tb} \quad (9)$$

Найдем через частные производные значение направляющего косинуса n_x при условии, что $z = 0$,

$$n_x = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{d}{dy}x\right)^2 + \left(\frac{d}{dz}x\right)^2}}; \quad n_x \rightarrow \left[\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1 \right]^{-1/2}. \quad (10)$$

Вызвав подынтегральные выражения, получим

$$n_x^2 \rightarrow \frac{1}{\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1} \text{ simplify} \rightarrow \frac{b^2(b^2 - y^2)}{a^2 y^2 + b^4 - b^2 y^2};$$

$$n_x \sqrt{1 - n_x^2} \rightarrow \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1}}}{\sqrt{\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1}} \rightarrow \text{simplify} \rightarrow \frac{\sqrt{a^2 y^2 / a^2 y^2 + b^4 - b^2 y^2}}{\sqrt{a^2 y^2 + b^4 - b^2 y^2 / b^4 - b^2 y^2}}. \quad (11)$$

Поскольку определённые интегралы можно рассчитать аналитически, вычислим их средствами Mathcad

$$\Phi_{\text{и}} = \frac{2}{B} \int_0^B n_x^2 dy = \frac{2}{B} \int_0^B \frac{b^2(b^2 - y^2)}{a^2 y^2 + b^4 - b^2 y^2} dy, \quad (12)$$

$$\Phi_{\text{и.т}} = \frac{2}{B} \int_0^B n_x \sqrt{1 - n_x^2} dy = \frac{2}{B} \int_0^B \frac{\sqrt{1 - \frac{1}{\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1}}}{\sqrt{\frac{T^2 a^2 y^2}{b^2(T^2 b^2 - T^2 y^2)} + 1}} dy, \quad (13)$$

Для расчета гидродинамических функций и функций притапливания необходимо рассчитать поверхностные интегралы:

$$\Phi_{\text{п}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} n_x n_z d\Omega; \quad \Phi_{\text{п.т}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} n_z \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega, \quad (14), (15)$$

$$\Phi_{\text{г}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} n_x^3 d\Omega; \quad \Phi_{\text{г.т}} = \frac{1}{\Omega} \int_{\Omega} n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} d\Omega. \quad (16), (17)$$

Интегрирование по поверхности заменяется интегрированием на плоскости:

$$d\Omega = n_z dx dy. \quad (18)$$

Таким образом, функции геометрии примут вид

$$\Phi_{\Pi} = \frac{1}{\Omega} \int_0^a \int_0^b n_x n_z n_z dy dx; \Phi_{\Pi T} = \frac{1}{\Omega} \int_0^a \int_0^b n_z \sqrt{1 - n_x^2} n_z dy dx, \quad (19), (20)$$

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{1}{\Omega} \int_0^a \int_0^b n_x^3 n_z dy dx; \Phi_{\Gamma T} = \frac{1}{\Omega} \int_0^a \int_0^b n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} n_z dy dx. \quad (21), (22)$$

Не все интегральные выражения могут быть определены аналитически. Для вычисления функций Φ_{Π} , $\Phi_{\Pi T}$, Φ_{Γ} , $\Phi_{\Gamma T}$ применим метод численного интегрирования, используя программу Mathcad. При выполнении численного интегрирования необходимо разбить поверхность эллипсоида на мелкие интервалы. Количество шагов деления hx и hy (вдоль осей x и y соответственно), влияющих на точность вычислений, можно задать самостоятельно, при этом изменение точности расчета с трудоемкостью не связано, поскольку все вычисления автоматизированы и объем ручной работы остается постоянным, изменяется только продолжительность вычислительных процессов.

Вычисления будут производиться для правой половины четверти эллипсоида, а в последующем найденные величины интегралов будут удвоены.

Средствами Mathcad вычислено z при всех значениях

$$x \in \left\{0, \frac{a}{hx}, \frac{2a}{hx} \dots a\right\} \text{ и } y \in \left\{0, \frac{a}{hy}, \frac{2a}{hy} \dots b\right\}.$$

Таким образом, поверхность эллипсоида, а значит, и поверхность «ледовой наделки», можно задать в виде табл. 1.

Таблица 1

Координатная сетка поверхности эллипсоида

	$x_0 = 0$	$x_1 = \frac{a}{hx}$	...	$x_i = \frac{i \cdot a}{hx}$	...	$x_m = \frac{m \cdot a}{hx} = a$
$y_0 = 0$	$z(x_0, y_0)$	$z(x_1, y_0)$	...	$z(x_i, y_0)$	...	$z(x_m, y_0)$
$y_1 = \frac{b}{hy}$	$z(x_0, y_1)$	$z(x_1, y_1)$	...	$z(x_i, y_1)$	...	$z(x_m, y_1)$
...
$y_j = \frac{j \cdot b}{hy}$	$z(x_0, y_j)$	$z(x_m, y_j)$	...	$z(x_i, y_j)$	...	$z(x_m, y_j)$
...
$y_n = \frac{n \cdot b}{hy} = b$	$z(x_0, y_n)$	$z(x_1, y_n)$	...	$z(x_i, y_n)$	...	$z(x_m, y_n)$

Значения z в правом нижнем углу таблицы являются комплексными числами. Это связано с тем, что данные точки (где $z(x, y) \in \mathbb{C}$) не принадлежат поверхности эллипсоида и находятся снаружи по отношению к нему. Чтобы не учитывать эти точки, во всех дальнейших расчетах воспользуемся условием: если в данной ячейке при заданных x и y значение $z(x, y) \in \mathbb{C}$, то значение числа в ячейке равно нулю. Таким образом, будут учитываться только те точки, которые принадлежат поверхности эллипсоида.

Далее вычисляются значения подынтегральных выражений при $x \in \left\{0, \frac{a}{hx}, \frac{2a}{hx} \dots a\right\}$ и $y \in \left\{0, \frac{a}{hy}, \frac{2a}{hy} \dots b\right\}$ с учетом условия $z(x, y) \in \mathbb{C}$ (\mathbb{C} – множество вещественных чисел).

Затем необходимо суммировать значения вычисленных подынтегральных выражений во всех заданных точках поверхности эллипсоида, а найденные суммы удвоить и умножить на $dx dy = \frac{a}{hx} \frac{b}{hy}$. Выражения для гидродинамических функций и функций притапливания примут следующий вид:

$$\Phi_{\Pi} = \frac{2}{\Omega} \sum (n_x n_z^2(x, y)) \frac{a}{hx} \frac{b}{hy}, \quad (23)$$

$$\Phi_{\Pi T} = \frac{2}{\Omega} \sum (n_z \sqrt{1 - n_x^2} n_z(x, y)) \frac{a}{hx} \frac{b}{hy}, \quad (24)$$

$$\Phi_{\Gamma} = \frac{2}{\Omega} \sum (n_x^3 n_z(x, y)) \frac{a}{hx} \frac{b}{hy}, \quad (25)$$

$$\Phi_{\Gamma\Gamma} = \frac{2}{\Omega} \sum \left(n_x^2 \sqrt{1 - n_x^2} n_z(x, y) \right) \frac{a}{hx} \frac{b}{hy}. \quad (26)$$

В выражениях функции геометрии неизвестной осталась величина площади смоченной поверхности Ω . Площадь поверхности эллипсоида можно вычислить приближённо по формуле [8]

$$\Omega_{\text{эллипсоида}} = 4\pi \cdot \left[\frac{a^p b^p + b^p c^p + c^p a^p}{3} \right]^{\frac{1}{p}}, \quad (26)$$

где a , b , c - полуоси эллипсоида. Если взять $p = 1,6075$, то максимальная относительная ошибка будет равна 1.061%.

Таким образом площадь смоченной поверхности Ω , равную четверти площади поверхности эллипсоида ($\Omega = \Omega_{\text{эллипсоида}}/4$), можно рассчитать по формуле

$$\Omega = \pi \left[\frac{a^p \cdot b^p + b^p \cdot c^p + c^p \cdot a^p}{3} \right]^{\frac{1}{p}}. \quad (27)$$

Используя указанную методику, рассчитаем сопротивление обломков льда движению баржи проекта Р-167 при различных скоростях движения и различной толщине льда. Исходными данными будут: $L = 111$ м; $B = 21$ м; $T = 3,5$ м.

Скорость будет изменяться в пределах от 0 до 2,5 м/с, что сопоставимо с реальными скоростями движения барж в битых льдах.

Толщину льда будем принимать из интервала от 0,1 м до 0,5 м с шагом 0,2 м, что часто наблюдается при работе судна в ледовых условиях.

По результатам расчёта построим кривые зависимости ледового сопротивления носовой оконечности судна от скорости при различных толщинах льда (рис. 2).

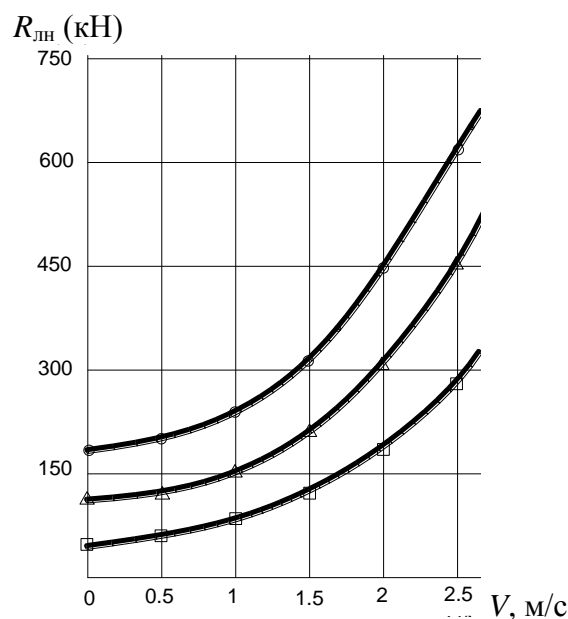


Рис. 2. Кривые зависимости ледового сопротивления носовой оконечности судна от скорости при различных толщинах льда:
 (□ — 0,1 м; △ — 0,3 м; ○ — 0,5 м)

Данная математическая модель расчёта сил ледового сопротивления судна с большим коэффициентом общей полноты в битых льдах позволяет провести расчёты ледовой ходкости для плавающих сооружений с нестандартными обводами корпуса и предоставляет попытку рассчитать буксировочные кривые для ледовых составов и караванов судов, движущихся в битом льду.

Библиографический список

1. **Зуев, В.А.** Динамические расчеты ледоколов / В.А. Зуев, М.Е. Рабинович, М.С. Яковлев. – Горький: ГПИ, 1979. – 67 с.
2. **Алексеев, Ю.Н.** Метод расчета сопротивления льда движению судов / Ю.Н. Алексеев, К.Е. Сазонов // Вопросы судостроения. Сер. Проектирование судов. 1984. Вып. 41. С. 28–36.
3. **Грамузов, Е.М.** Прогнозирование сопротивления сплошного льда при проектировании формы корпуса речного ледокола: дисс. ... канд. техн. наук / Е.М. Грамузов. – Горький, 1988.
4. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
5. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов: монография / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение, 2001. – 512 с.
6. **Сандаков, М.Ю.** Проведение натурных испытаний нефтеналивной баржи пр. 167 в ледовых условиях совместно с разными толкачами и ледоколами // Современные технологии в кораблестроительном образовании, науке и производстве: материалы конф. – Н.Новгород, 2006. С. 151–152.
7. **Сандаков, М.Ю.** Модельные исследования ледовой ходкости судов с большим коэффициентом полноты в битом льду / М.Ю. Сандаков, Е.А. Гуцин // Будущее технической науки: материалы конф.; НГТУ. Н. Новгород, 2010. С. 237–238.

*Дата поступления
в редакцию: 29.04.2014*

M.Y. Sandakov

**MATHEMATICAL MODEL OF CALCULATION OF ICE MOVEMENT
OF VESSELS WITH LARGE COEFFICIENT OF FULLNESS IN BROKEN ICE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject: The article touches upon the issues of movement of transport ship with great fullness coefficient corps, in broken ice, and determination of the forces of the resistance of the broken ice at movement of the ship

Design/methodology/approach: The paper proposed a new hypothesis of interaction between ship hull and fragments of ice cover. On movement in broken cohesive ice full contours bow of the hull of a vessel being pushed in front of a mass of ice. The shape of the hull is changed to a more streamlined

Results: The completed form of ice accumulation and defined its parameters was studied. There was created and proposed a method of calculation of strength of ice resistance movement of vessels with great fullness coefficient in dense broken ice.

Key words: the broken ice, the vessel's hull with a large coefficient of fullness, ice accumulation, triaxial ellipsoid, ice propulsion, the geometry of the hull, ice resistance force.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.68

О.А. Бурмакин, Ю.С. Малышев, Ю.В. Варечкин, И.В. Сычушкин

ОБОСНОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ СУДОВЫХ ВЕТРОГЕНЕРАТОРНЫХ УСТАНОВОК

Волжская государственная академия водного транспорта

Цель: Определить эффективность применения судовых ветрогенераторных установок.

Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически.

Результат: Рассмотрены перспективы внедрения ветроэнергетической установки на судах Северного флота, а также применение валогенераторной установки с целью снижения себестоимости электроэнергии. Определены экономические и экологические показатели внедрения альтернативных источников энергии на судно.

Вывод: Применение ветроэнергетической установки на судне в совокупности с валогенераторной энергетической установкой значительно снижает потребление топлива, стоимость электроэнергии и уменьшает вредное влияния на окружающую среду.

Ключевые слова: альтернативный источник энергии, валогенераторная установка, экономия электроэнергии, ветроэнергетическая установка

В связи с ростом цен на топливо все актуальнее встает вопрос об энергосбережении и использовании на судах различных альтернативных источников энергии. Одним из таких источников являются установки, преобразующие энергию ветра.

Сегодня существует достаточно много различных проектов судовых ветродвижителей и ветродвигателей, как реализованных, так и находящихся на стадии разработок. Наиболее целесообразным вариантом является установка на морских и речных судах ветродвижителя как дополнения к основному механическому двигателю. Это даст 25-30 % экономии топлива и обеспечит судам вполне приемлемую скорость в 16 узлов, а кроме того, позволит вместо мощной энергетической установки применять сравнительно небольшую [1].

Ветрогенераторы на судах практически не применяются, однако, с точки зрения электроэнергетики, использование ветроэнергетической установки (ВЭУ) для электропитания судовых потребителей может быть перспективной областью для исследований. Мощность судовой ВЭУ ограничена габаритами и характеристиками судна. Поэтому наиболее выгодно, по мнению авторов, обеспечить совместную работу ВЭУ и валогенераторной установки (ВГУ) морских судов для самого продолжительного по времени и малого по электрической нагрузке ходового режима, а также для стояночного режима. В качестве ветродвигателя наиболее предпочтительны спиральные ветровые турбины. Они производят до 50% больше электроэнергии в год по сравнению с генераторами с горизонтальной осью вращения и вырабатывают электроэнергию при скорости ветра от 1 до 60 м/с, выдерживают мороз, лед, песок и влажность [2, 3]. Экономически обоснованным будет применение ВЭУ и судов, оснащенных ВЭУ, в северных и восточных районах России, где среднегодовые скорости ветров превышают 5 м/с.

Для оценки экономической эффективности применения ВЭУ на сухогрузном теплоходе грузоподъемностью 1000 т, мощностью 800 э.л.с., класса "М". Проект Фин. 1000/800, будем пользоваться следующими показателями:

- капиталовложения;
- себестоимость электроэнергии;

- расход топлива за навигационный период;
- расход денежных средств на покупку топлива;
- экономия денежных средств на покупку топлива за навигацию;
- время окупаемости проекта.

Капиталовложение в основном включает в себя стоимость комплектующих (табл. 1).

Таблица 1

Капиталовложение

№ п/п	Наименование	Тип(код заказа)	Количество, шт	Цена за ед., руб.	Сумма, руб.
1	Асинхронный двигатель	A250S8	2	53700	107400
2	Преобразователь частоты	Altivar 71	2	145000	290000
3	Конденсаторная установка	УКМ58-0,4-50-5 У1	1	34175	34175
4	Ветроприемник	ВВТ "ЭНЭКСИС"	1	500000	500000
5	Транзистор	IRG4PSC71UPBF	7	300	2100
6	Диод	80EPF12	12	480	5760
7	Редуктор	1Ц2У 100	2	13300	26600
8	Автоматический выключатель	A3110P	2	1000	2000
9	Автоматический выключатель	A3130	1	1300	1300
10	ИТОГ				969335

Расчет себестоимости электроэнергии проведен для следующих случаев: без подключения ВЭУ в ходовом режиме, с использованием ВЭУ в ходовом режиме на 100% и на 50% всего времени.

Среднюю себестоимость электроэнергии определяем по формуле:

$$C_{\text{Э}} = 10^{-6} C_{\text{T}} g \frac{t_{\text{Э}} - t_{\text{X}} - t_{\text{C}}}{t_{\text{Э}}} + 10^{-6} C_{\text{GA}} g_{\text{GA}} \frac{t_{\text{X}}}{t_{\text{Э}}} + \frac{0,15K}{A},$$

где C_{T} , C_{GA} – стоимость топлива, включая бункеровочные расходы (в тоннах); g – удельный расход топлива; $g = K_{\text{T}} \cdot g_{\text{НОМ}}$; $K_{\text{T}} = 0,98$ - коэффициент удельного расхода топлива; A – годовая выработка электроэнергии;

$$A = (P_{\text{X}} t_{\text{X}} + P_{\text{M}} t_{\text{M}} + P_{\text{C}} t_{\text{C}} + P_{\text{A}} t_{\text{A}}),$$

где P_{X} , P_{M} , P_{C} , P_{A} – нагрузка СЭС в ходовом, маневренном, стояночном и аварийном режимах(кВт); t_{X} , t_{M} , t_{C} , t_{A} - продолжительность режимов в течение навигационного периода(ч); K – капиталовложения; $K = 1,5 \cdot K$ руб. (с учетом транспортных и монтажных работ).

Снижение себестоимости электроэнергии вызвано уменьшением расхода топлива дизель-генератора, использование ВГУ позволяет снизить себестоимость электроэнергии на 32%, а при использовании ВЭУ на 100% себестоимость уменьшается на 76%.

Расход топлива за навигационный период определяется по формуле:

$$Q_{\text{П}} = g t_{\text{X}} P_{\text{X}} + g t_{\text{M}} P_{\text{M}} + g t_{\text{C}} P_{\text{C}} + g t_{\text{A}} P_{\text{A}}.$$

Таким образом, при загрузке ВЭУ на 100% ее возможностей расход топлива снижается на 34,65т за навигацию. При использовании ВГУ тоже наблюдается снижение расхода топлива. Оно вызвано меньшим удельным расходом топлива главным двигателем по сравнению с дизель-генератором. Однако нельзя забывать, что в этом случае нагрузка на главный двигатель увеличивается.

Расходы денежных средств на покупку топлива:

$$B = Q_{\text{П}} \cdot C_{\text{T}}.$$

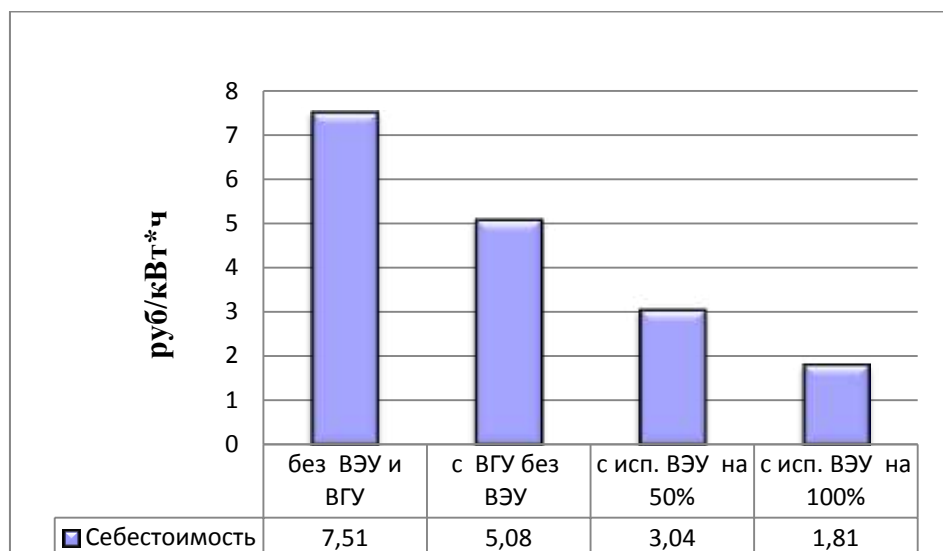


Рис. 1. Себестоимость электроэнергии

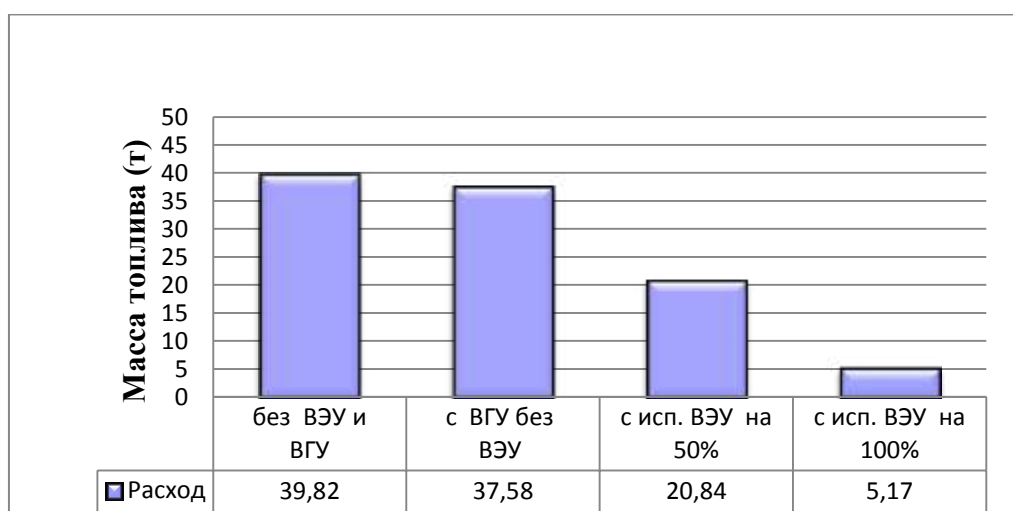


Рис. 2. Расход топлива

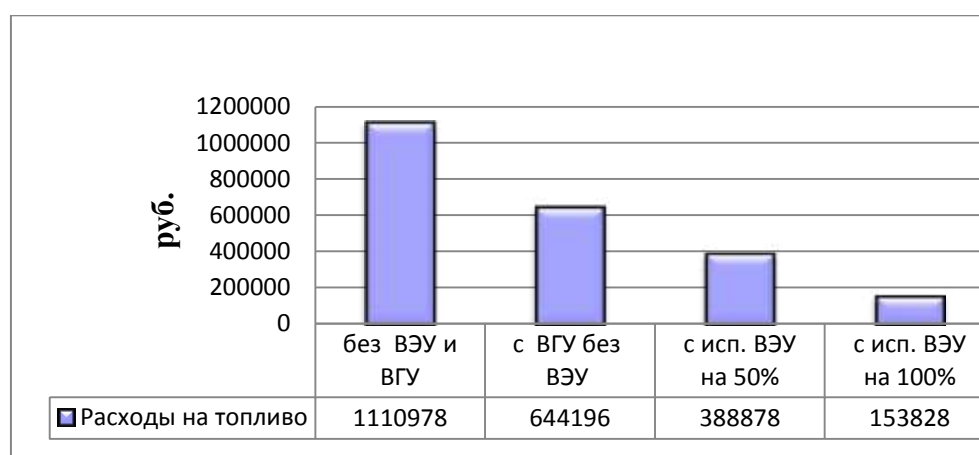


Рис. 3. Расход денежных средств на покупку топлива

Расчет производится с учетом, что стоимость дизельного топлива за тонну для валогенератора составляет 15000 руб., а для дизель-генератора 27900 руб.

Экономия денежных средств на покупке топлива за навигацию

$$\Delta B = B - B_1,$$

где B_1 – расход на топливо при использовании энергосберегающих средств ВЭУ и ВГУ.

Расчет окупаемости данного проекта

$$OK = \frac{K}{\Delta B}$$

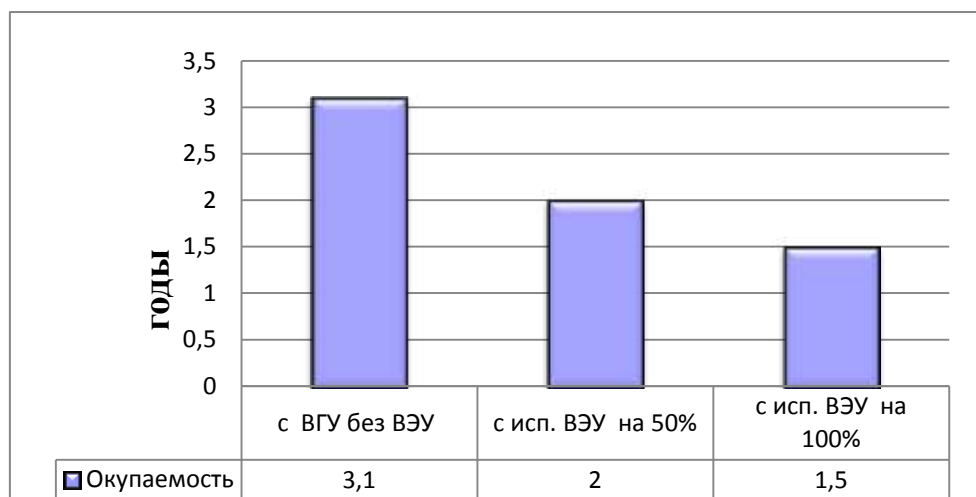


Рис. 4. Окупаемость проекта

Срок окупаемости проекта внедрения судовой ВЭУ уменьшается в два раза по сравнению со сроком окупаемости ВГУ.

Экологическая безопасность

Воздействие на окружающую среду

В данном проекте разрабатывается электростанция для сухогрузного судна, в состав которой входит валогенераторная и ветроэнергетическая установка. При эксплуатации данного судна с такой электростанцией возникает выброс в атмосферу продуктов горения и воздействие на окружающую среду электромагнитного поля

Количественные и качественные характеристики искусственного ЭМП существенно отличаются от значений, к которым человек и другие объекты биосферы приспособились в течение эволюции, поэтому могут вызвать функциональные нарушения, в связи с этим вполне справедлива постановка вопроса об оптимизации электромагнитных воздействий.

Воздействие напряженности ЭМП на окружающую среду связано с возникновением заряда на предметах, не имеющих связи с землёй. В соответствии с санитарными нормами плотность электромагнитного излучения внутри жилой зоны должна быть не более 0,5 кВ/м, так как электростанция находится в машинном отделении, излучения в окружающую среду практически не будет (настолько мало, что с трудом поддается измерению).

Расчет выбросов продуктов горения в атмосферу за навигационный период

Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха вносят отработавшие газы двигателей. Количество ингредиентов и их масса зависит при прочих равных условиях от сорта и массы сжигаемого топлива.

Масса каждого компонента рассчитывается по формуле:

$$M = gQ,$$

где M – масса выбрасываемого вещества, кг; g – удельное содержание вещества в одной тонне сжигаемого топлива, кг/т; Q – масса сжигаемого топлива за рассматриваемый промежуток времени, т.

Расчет выбросов вредных веществ выполняем с учетом расхода топлива без использования ВЭУ и ВГУ ($Q=43,18$ т/нав.) при использовании ВЭУ и ВГУ на 50% ($Q=25,2$ т/нав.) и на 100% $Q=7$ т/нав. Результаты расчетов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетов выбросов вредных веществ

Выбрасываемое вещество	Удельное содержание вещества в одной тонне сжигаемого топлива, кг/т	Масса выбрасываемого вещества без ВЭУ и ВГУ, кг/нав	Масса выбрасываемого вещества при использовании ВЭУ и ВГУ на 50%, кг/нав	Масса выбрасываемого вещества при использовании ВЭУ и ВГУ на 100%, кг/нав
Оксид серы	3,9	168,4	98,2	27,3
Оксид углерода	25,6	1105,4	645,12	179,2
Оксид азота	68,1	2940,5	1716,1	476,7
Углерод	18,1	781,5	456,12	126,7
Сажа	0,9	38,86	22,68	6,3
Бенз-а-пирен	0,006	0,26	0,15	0,042
CO ₂		38862	22680	6300

Доля выбросов CO₂ в атмосферу составляет 90% от массы сжигаемого топлива, поэтому расчет проводится по формуле:

$$M = Q \cdot 0,9.$$

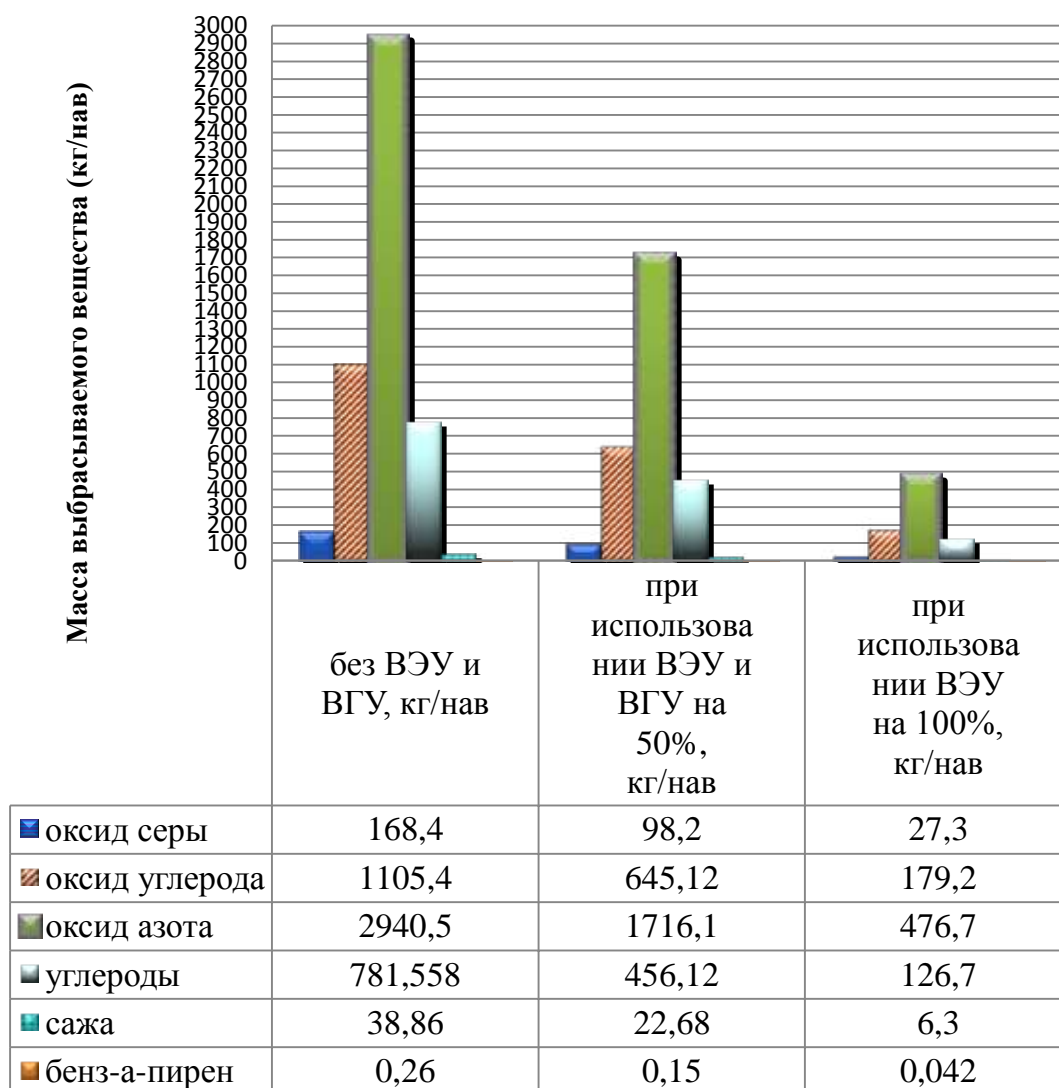


Рис. 5. Выбросы в атмосферу загрязняющих веществ

Таким образом, применение ветроэнергетической установки на судне в совокупности с валогенераторной энергетической установкой значительно снижает потребление топлива и, как следствие, уменьшает стоимость электроэнергии, кроме того, электростанция с ВЭУ и ВГУ с учётом мероприятий по ограничению воздействий не оказывает вредного влияния на окружающую среду и является экологически безопасной.

Библиографический список

1. **Городов, Р.В.** Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учеб. пособие / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – 1-е изд. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 294 с.
2. <http://helixturbineenergy.com/>
3. <http://greenpeace.narod.ru/windpwr.htm>

*Дата поступления
в редакцию: 22.04.2014*

O.A. Burmakin, Yu.S. Malyshev, Yu.V. Varechkin, I.V. Sychushkin

SUBSTANTIATION OF THE EFFECTIVENESS OF SHIPS WIND GENERATOR INSTALLATIONS

Volga state academy of water transport

Purpose: The definition of efficiency of application of marine wind installations.

Approach: Investigation was conducted both numerically and analytically.

Findings: The prospects of introduction of wind power plants on ships of the Northern fleet, as well as the application shaft generator units to reduce the cost of electricity. Defined economic and ecological parameters of the alternative energy sources on the vessel.

Originality/value: the use of wind power plants on the ship together with shaft generator power plant significantly reduces fuel consumption, energy cost and reduces harmful influence on the environment.

Key words: alternative energy source, shaft generator sets, saving energy, wind power sets.

УДК 621.3

А.А. Кралин¹, Б.Ю. Алтунин¹, И.А. Карнавский², В.В. Гуляев³

МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕСИММЕТРИЧНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТРЕХФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА В ПАКЕТЕ SIMULINK

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
 ООО «ЛОТЕС ТМ», Н. Новгород²,
 Волжская государственная академия водного транспорта³

Рассмотрены вопросы моделирования и исследования нелинейных трехфазных трансформаторов с расщепленной первичной обмоткой, в том числе трансформаторов с тиристорными переключающими устройствами (ТПУ). Модели трансформаторов выполнены в пакете Simulink и состоят из схем замещения магнитной и электрической цепей. Модели позволяют исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТПУ с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, тиристорное переключающее устройство, моделирование, несимметричные режимы.

Исследование несимметричных режимов работы трехфазных трансформаторов с расщепленными первичными обмотками целесообразно осуществлять с помощью компьютерного моделирования с использованием мощных современных программных средств, таких как Matlab со встроенным пакетом визуального моделирования Simulink [1, 2, 3].

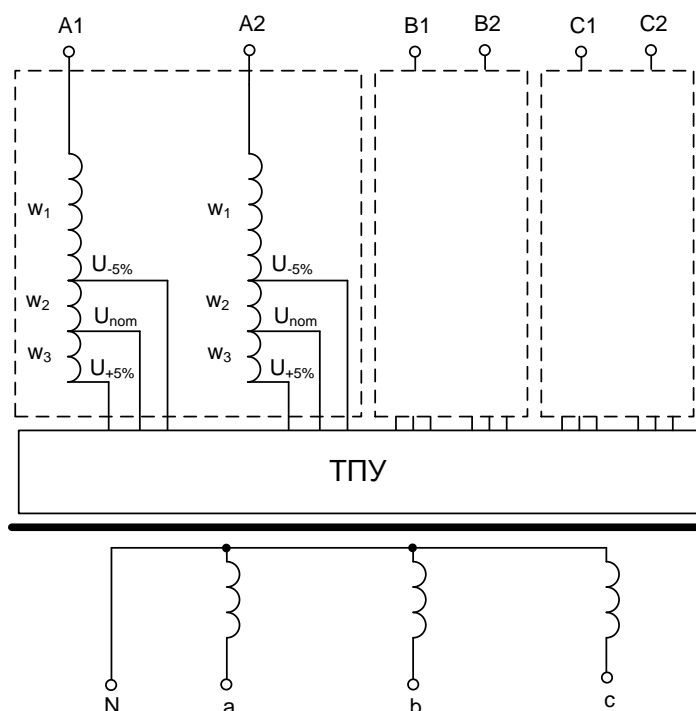


Рис. 1. Электрическая схема трансформатора ТСЗН-400/10

В исследуемых устройствах процессы регулирования напряжения осуществляются с помощью тиристорного переключающего устройства. Данные процессы сопровождаются изменением структуры многообмоточных трехфазных трансформаторов на первичной стороне. При этом возникают режимы работы, сопровождающиеся изменением насыщения магнитопровода трансформатора, которые требуют адекватного математического представле-

ния. В нестационарных режимах, связанных с нарушением нормального функционирования, возможны глубокие насыщения магнитопровода и значительные изменения электромагнитных связей между обмотками трансформатора.

Электрическая схема трехфазного трансформатора ТСЗН-400/10 со схемой Y/Y-0 представлена на рис. 1. Тиристорное переключающее устройство (ТПУ) обеспечивает автоматическое или ручное переключение ответвлений независимо каждой фазы в пределах $\pm 5\%$ номинального напряжения и протекания каждой полуволны тока через свою часть обмотки.

Многообмоточный трансформатор ТСЗН-400/10 имеет трехстержневой магнитопровод. Каждая фаза разделена на две полуобмотки с регулировочными отводами $\pm 5\%$ от номинального значения.

Модель трехфазного трансформатора состоит из двух частей - модели электрической системы и модели магнитной системы [1, 2].

Составим математическое описание электромагнитной системы трансформатора. Для схемы замещения (рис. 2) запишем уравнения по первому закону Кирхгофа, а также по второму закону Кирхгофа для контуров I, II и III:

$$\Phi_a + \Phi_b + \Phi_c = \Phi_0; \tag{1}$$

$$Fa - Fb = Ha \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) - Hb \cdot l_{leg}; \tag{2}$$

$$Fb - Fc = Hb \cdot l_{leg} - Hc \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}); \tag{3}$$

$$Fb = Hb \cdot l_{leg} + R_0 \cdot \Phi_0; \tag{4}$$

$$Fa = (w_{a11}i_{a11} + w_{a12}i_{a12} + w_{a13}i_{a13}) + (w_{a21}i_{a21} + w_{a22}i_{a22} + w_{a23}i_{a23}) + w_{a14}i_{a14}; \tag{5}$$

$$Fb = (w_{b11}i_{b11} + w_{b12}i_{b12} + w_{b13}i_{b13}) + (w_{b21}i_{b21} + w_{b22}i_{b22} + w_{b23}i_{b23}) + w_{b14}i_{b14}; \tag{6}$$

$$Fc = (w_{c11}i_{c11} + w_{c12}i_{c12} + w_{c13}i_{c13}) + (w_{c21}i_{c21} + w_{c22}i_{c22} + w_{c23}i_{c23}) + w_{c14}i_{c14}. \tag{7}$$

Сформируем канал вычисления Φ_b по уравнению (1):

$$\Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c; \tag{8}$$

$$\begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = S \cdot \begin{bmatrix} Ba \\ Bb \\ Bc \end{bmatrix}; \tag{9}$$

где S – площадь сечения магнитопровода;

$$Bb = \Phi_b / S. \tag{10}$$

По уравнениям (2) и (3) сформируем канал вычисления $Ha \cdot lc$ и $Hc \cdot lc$:

$$Ha \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = Fa - Fb + Hb \cdot l_{leg}; \tag{11}$$

$$Hc \cdot (l_{leg} + 2l_{yoke}) = Fc - Fb + Hb \cdot l_{leg}. \tag{12}$$

Соотношение между магнитной индукцией B и напряженностью магнитного поля H в сердечнике – функция $B = f(H)$, составляемая по таблице или графику намагничивания:

$$Ba = f(Ha);$$

$$Bc = f(Hc).$$

Получили:

$$\left\{ \begin{array}{l} Ha = (Fa - Fb + Hb \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ Hc = (Fc - Fb + Hb \cdot l_{leg}) / (l_{leg} + 2l_{yoke}) \\ Ba = f(Ha); \quad Bc = f(Hc) \\ \Phi_a = Ba \cdot S; \quad \Phi_c = Bc \cdot S \\ \Phi_0 = (Fb - Hb \cdot l_{leg}) / R_0 \\ \Phi_b = \Phi_0 - \Phi_a - \Phi_c \\ Bb = \Phi_b / S \\ Hb = f^{-1}(Bb) \end{array} \right.$$

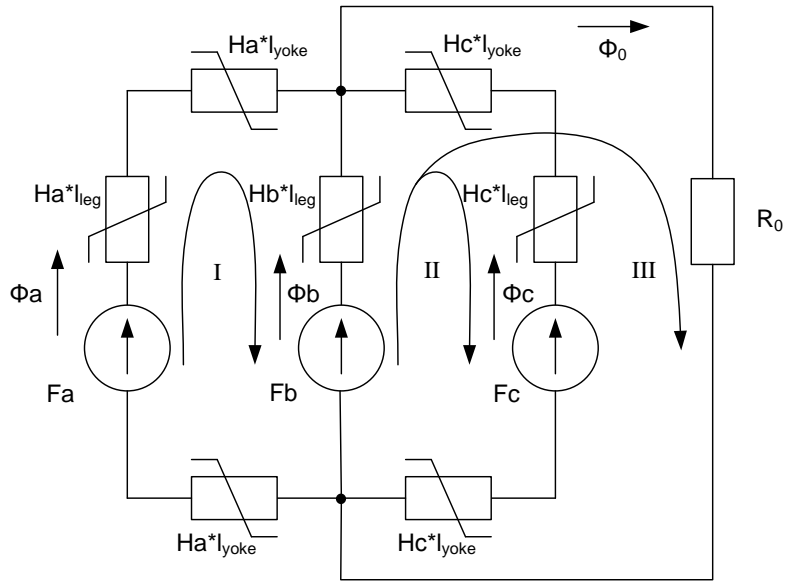


Рис. 2. Схема замещения магнитной цепи

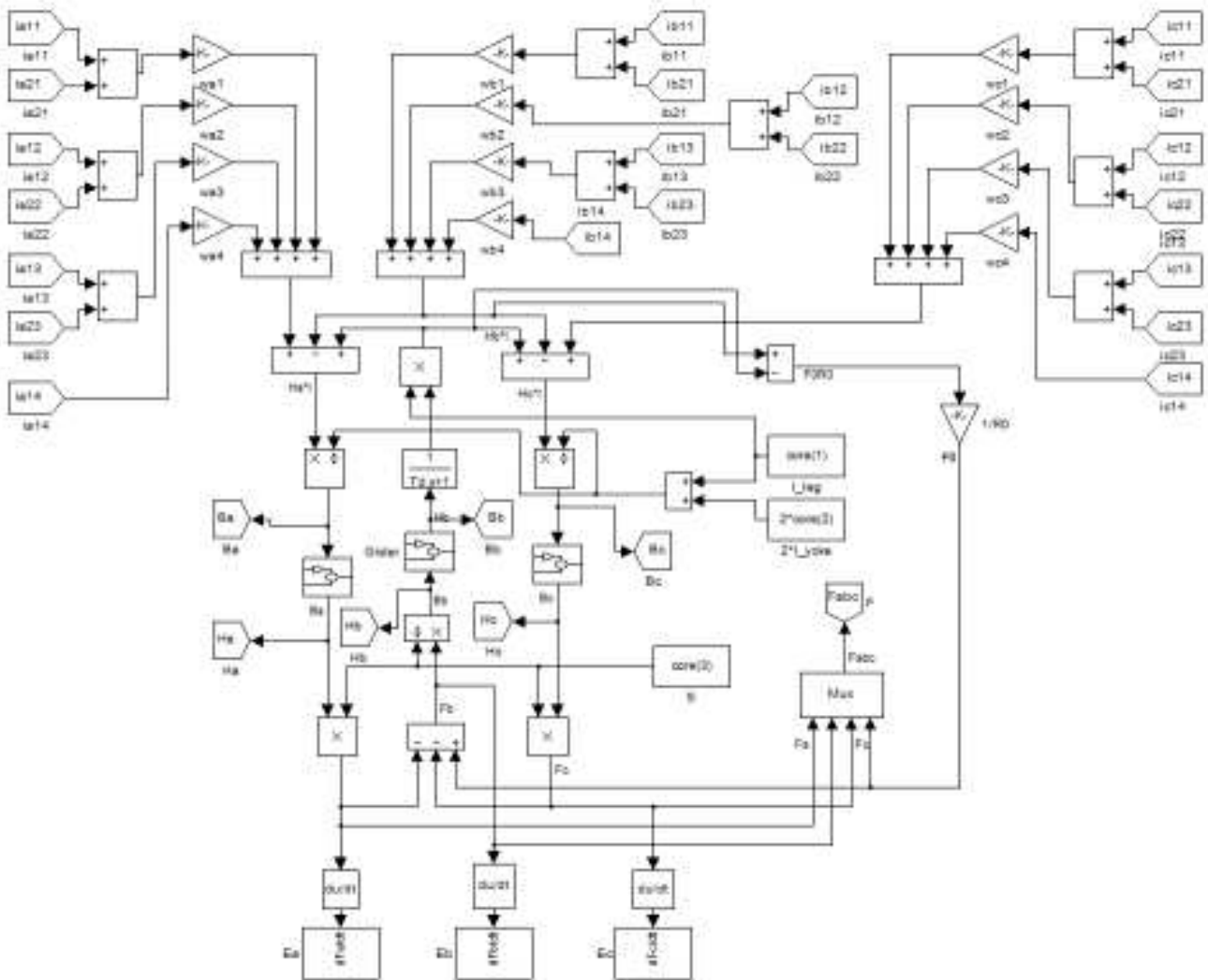


Рис. 3. Модель магнитной системы трехфазного трансформатора в Simulink

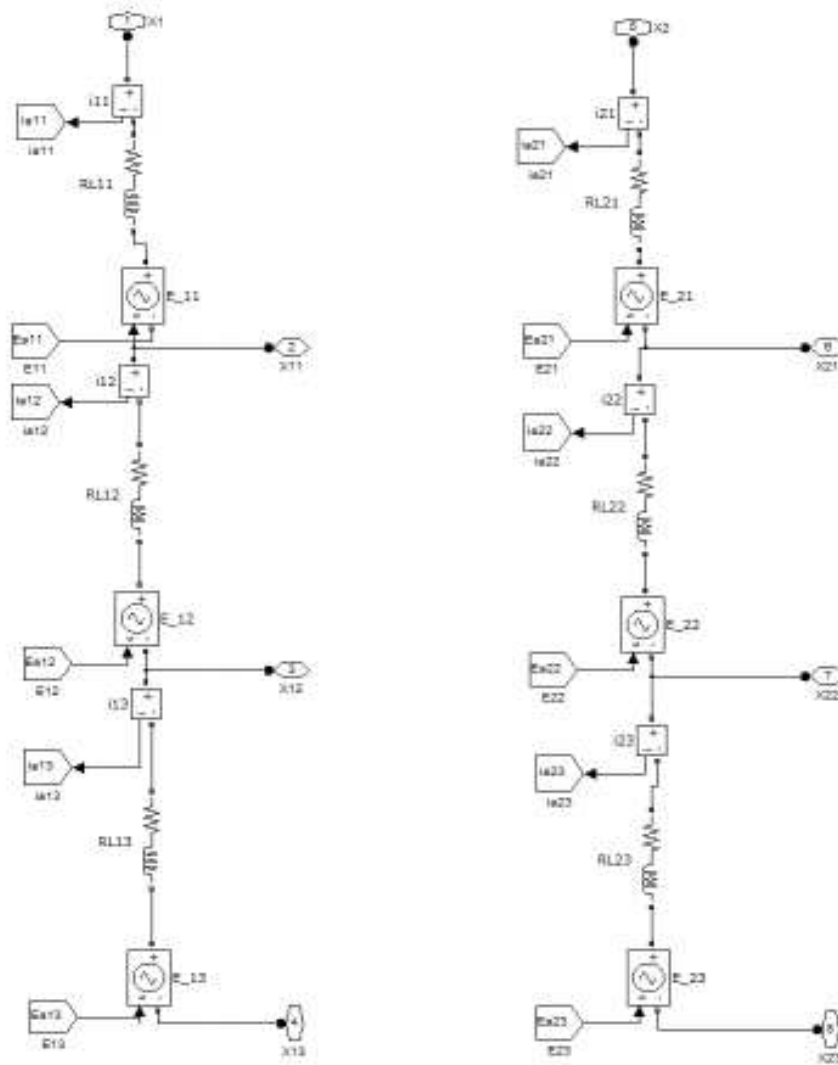


Рис. 4. Первичная обмотка фазы А трехфазного трансформатора в Simulink

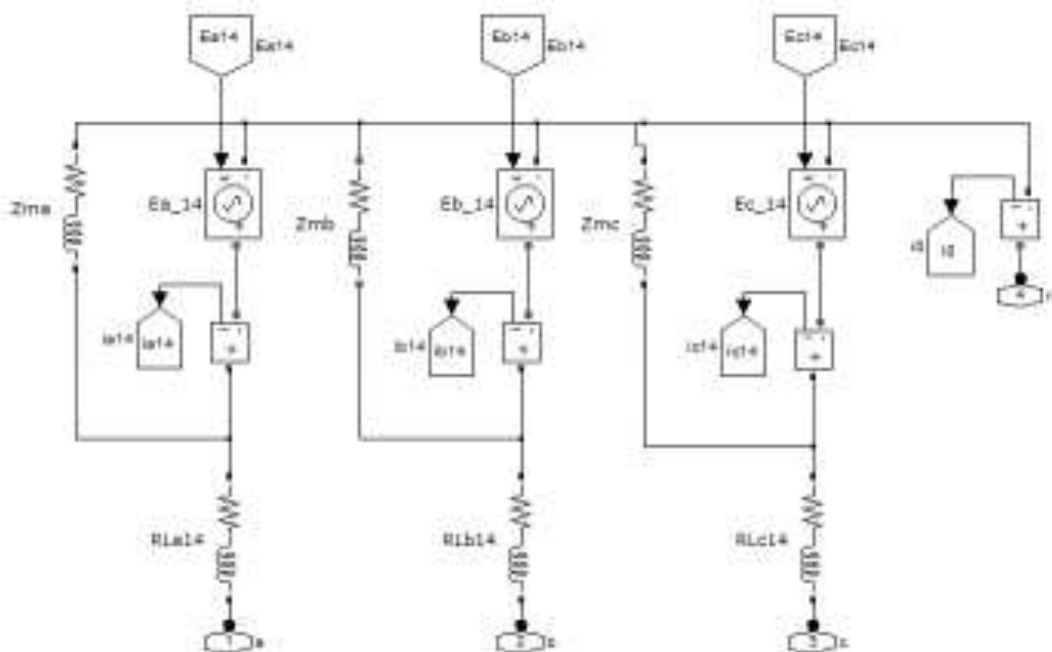


Рис. 5. Вторичные обмотки трехфазного трансформатора в Simulink

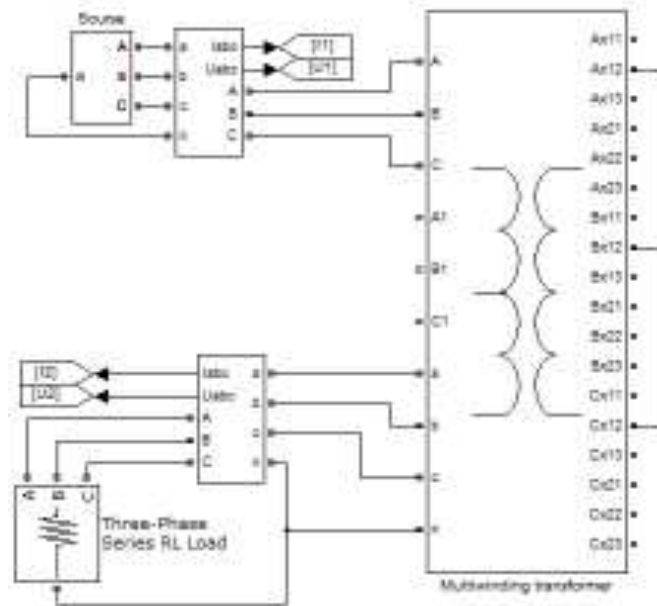


Рис. 6. Имитационная модель исследуемого трехфазного трансформатора

По структурной схеме магнитной цепи, схемам замещения электрических цепей трансформатора разработана имитационная модель трехфазного трансформатора в Simulink.

В дополнение к системе нелинейных алгебраических уравнений (1)–(12) составлена модель электрической системы первичных (рис. 3) и вторичных (рис. 4) обмоток трансформатора по следующим выражениям:

$$U_1 = L_{S1.1} \frac{di_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_A}{dt} + R_1 i_1; \quad (13)$$

$$U_2 = L_{S2.2} \frac{di_2}{dt} + w_2 \frac{d\Phi_2}{dt} + R_2 i_2; \quad (14)$$

$$U_Y = L_{SY.Y} \frac{di_Y}{dt} + w_Y \frac{d\Phi_Y}{dt} + R_Y i_Y, \quad (15)$$

где U_n - напряжение соответствующей обмотки; $L_{Sm.m}$ - собственные индуктивности рассеяния обмоток; R_n - активные сопротивления обмоток; w_n - число витков обмоток.

Приведенные ранее уравнения представляют собой нелинейные дифференциальные уравнения электромагнитных связей трехфазного многообмоточного трансформатора.

Разработанные модели трансформаторов могут быть использованы для исследования устройств, содержащих в своем составе трехфазные многообмоточные трансформаторы с расщепленной первичной обмоткой, в том числе для трансформаторов с тиристорными регуляторами напряжения и мощности (ТТРНМ), предназначенных для регулирования параметров электроэнергии. Модели позволяют исследовать важнейшие энергетические показатели трансформаторов с ТТРНМ с различными группами соединения обмоток в динамических и статических режимах работы при симметричной и несимметричной нагрузках. Модели реализуют следующие функции: отображение переходных электромагнитных величин, таких как ток, напряжение, магнитная индукция, магнитный поток трансформатора, что позволяет измерять основные характеристики трехфазных трансформаторов в режимах холостого хода, короткого замыкания и под нагрузкой.

В ходе проведенного моделирования установлено, что негативное влияние на качество напряжения вторичной обмотки оказывает несимметричная нагрузка, причем наибольшая

несимметрия напряжения наблюдается при однофазной нагрузке близкой к номинальной. При этом несимметричные режимы, особенно однофазный нагрузочный режим, характеризуются значительным повышением тока в нулевом проводе. Во избежание значительного неравенства фазных напряжений необходимо ограничивать нагрузку нулевого провода не допуская значений выше 25% номинального тока обмотки. Для снижения несимметрии напряжения и тока в нулевом проводе необходимо либо выравнять нагрузку по фазам, либо ее снизить.

В соответствии с ГОСТ на нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения, несимметрия напряжений характеризуется коэффициентами несимметрии напряжений по обратной $K2U\%$ и нулевой $K0U\%$ последовательностям. Нормально допустимые и предельно допустимые значения данных коэффициентов равны 2,0 и 4,0 % соответственно.

Результаты моделирования однофазного КЗ представлены в табл. 1. Результаты несимметричного однофазного нагрузочного режима представлены в табл. 2. Из представленных данных видно, что качество электроэнергии значительно выходит за допустимые значения по нормируемым коэффициентам несимметрии напряжения по нулевой и обратной последовательностям.

Таблица 1

Режим короткого замыкания фазы A , $Pb=Pn$, $Pc=Pn$

	A	B	C
Ток первичной обмотки, А	92,58	36,46	61,33
Ток вторичной обмотки, А	2918	836,6	911,9
Фазные напряжения первичной обмотки, В	1432	8569	9281
Фазные напряжения вторичной обмотке, В	0	331,2	359,4
Ток в нулевом проводе, А / %	2148 / 372,3		
	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
Ток первичной обмотки, %	240,3	165,3	0
Ток вторичной обмотки, %	239,8	165,5	124,1
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0,418	78,36
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	91,57	9,515	82,95

Таблица 2

Однофазный нагрузочный режим $Pa=Pn$, $Pb=0$, $Pc=0$

	A	B	C
1	2	3	4
Ток первичной обмотки, А	14,24	7,255	6,984
Ток вторичной обмотки, А	530,7	0	0
Фазные напряжения первичной обмотки, В	5306	6905	5291
Фазные напряжения вторичной обмотке, В	209,6	274,1	212,4
Ток в нулевом проводе, А / %	530,7 / 91,97		
	Прямая последовательность	Обратная последовательность	Нулевая последовательность
Ток первичной обмотки, %	31,02	30,57	0
Ток вторичной обмотки, %	30,63	30,63	30,63

Окончание табл. 2

1	2	3	4
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0,1983	19,5
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	100,8	1.812	20.65
Ток первичной обмотки, %	1818	3,202	0
Ток вторичной обмотки, %	1820	3,191	0,03929
Фазные напряжения первичной обмотки, %	100	0.139	0.00107
Фазные напряжения вторичной обмотки, %	-	-	-

Библиографический список

1. **Алтунин, Б.Ю.** Исследование несимметричных режимов работы трансформаторно-тиристорного регулятора напряжения и мощности / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, И.А. Карнавский // Промышленная энергетика. 2013. №12. С. 13–16.
2. **Алтунин, Б.Ю.** Исследование режимов работы нелинейного трехфазного трансформатора в пакете Simulink / Б.Ю. Алтунин, А.А. Кралин, В.В. Гуляев // Вестник волжской государственной академии водного транспорта. 2012. № 32. С. 195–198.
3. **Лоскутов, А.Б.** Имитационная модель активного фильтра для четырехпроводной сети / А.Б. Лоскутов, Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский // Промышленная энергетика. 2013. №10. С. 40–44.

Дата поступления
в редакцию: 29.04.2014

A.A. Kralin, B.Y. Altunin, I.A. Karnavsky, V.V. Gulyaev

ASYMMETRICAL MODE MODELING OF THE THREE-PHASE TRANSFORMER IN SIMULINK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
Volga state academy of water transport,
"LOTES TM" ltd, N. Novgorod

Problems of modeling and study of nonlinear three-phase transformer with a split primary winding, including transformers, thyristor switching devices (TSD). Model transformers are made in Simulink package and consist of the equivalent circuits of the magnetic and electric circuits. Models allow us to explore the most important energy performance of transformers with TSD with different groups of winding connections in dynamic and static modes for symmetrical and asymmetrical loads.

Key words: three-phase transformer, thyristor switching device modeling, unbalanced modes.

УДК 621.3

А.Б. Лоскутов, А.А. Лоскутов, Д.В. Зырин, Л.А. Ларионов

ГИБКИЕ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫЕ СЕТИ С АДАПТИВНЫМИ АЛГОРИТМАМИ – РЕШЕНИЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛИЗАЦИИ ГОРОДСКИХ СЕТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен вопрос формирования интеллектуальной сети, способной автоматически функционировать, благодаря ее топологии и универсальным алгоритмам управления. Предложены классификация алгоритмов управления, а также их структурные схемы. Определен стандарт обмена информацией между элементами рассматриваемой сети на разных уровнях взаимодействия.

Ключевые слова: активно-адаптивная система управления, адаптивные алгоритмы управления, распределительные электрические сети, гексагональная конфигурация распределительных сетей, информационная сеть, интерфейс, МЭК 61850, интеллектуальные сети.

Современное развитие населенных пунктов и городских центров приводит к увеличению плотности нагрузок, что характеризуется большими единичными мощностями, активным ростом нагрузок во времени, большими трудностями в размещении новых распределительных сетей и модернизации существующих. В сетевых компаниях отсутствует единая политика построения распределительных сетей, что приводит к хаотичности развития городских сетей, а последний фактор ведет за собой усложнение их эксплуатации. Основные проблемы, с которыми сталкиваются сетевые компании, это дефицит мощности, высокие потери электроэнергии, низкая надежность распределительных сетей, рост годовых перерывов в электроснабжении (рис. 1). Кроме того, в сетях среднего напряжения отсутствуют какие-либо автоматизированные системы управления. Все переключения осуществляются вручную оперативным персоналом.

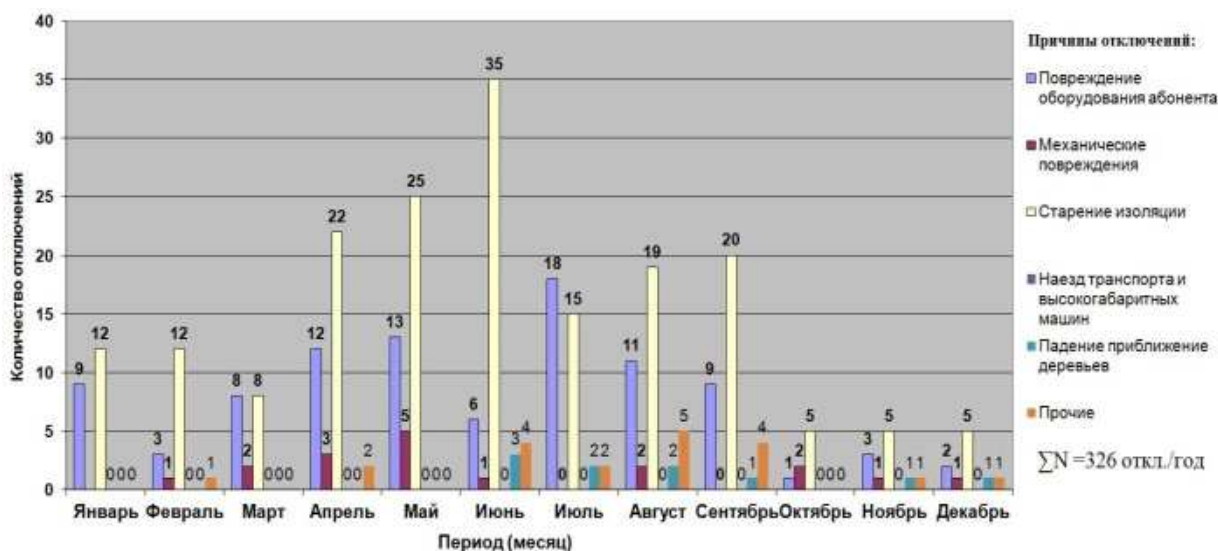


Рис. 1. Сводный анализ основных причин внезапных отключений в распределительных сетях за 2013 г.

В последнее десятилетие во многих странах мира развивается технология Smart Grid (интеллектуальная сеть). В России идет речь о создании Интеллектуальной электроэнергети-

ческой системы с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) [1]. Ведущая роль в концепции ИЭС ААС отводится электрической сети, которая из пассивного устройства транспорта и распределения электроэнергии превращается в активный элемент, параметры и характеристики которого изменяются в реальном времени в зависимости от режимов работы энергосистемы. Реализовать данную концепцию возможно только модернизируя и оптимизируя топологию распределительных сетей и внедрением в нее автоматизированной системы управления с адаптивными алгоритмами функционирования (ААФ).

Авторами предложена политика построения и новый принцип организации распределительных сетей крупных городов с высокой плотностью нагрузки – распределенная электрическая сеть гексагонального типа [2, 3].

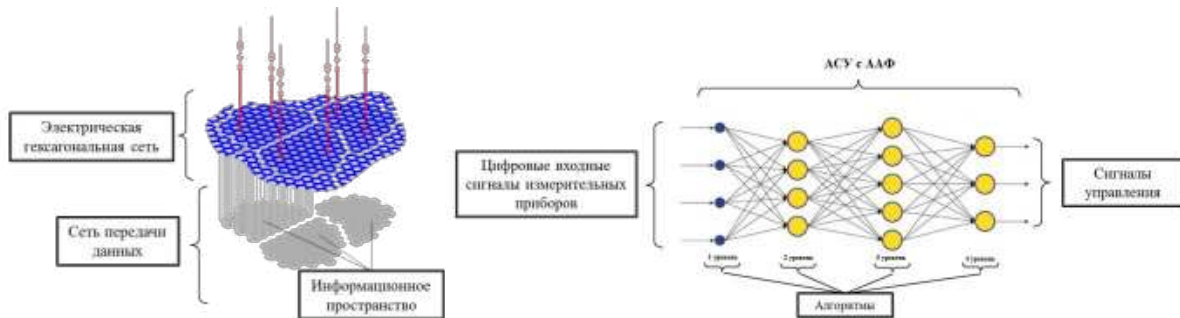


Рис. 2. Принцип построения гексагональной сети и структура ААФ

Гексагональная сеть предусматривает параллельную работу информационной сети, которая осуществляет мониторинг, диагностику, контроль параметров, защиту, учет, агрегацию и хранение гетерогенной информации. Организация информационной сети выполняется путем размещения в каждом узле нагрузки интегрированного модуля распределенной системы управления (ИМРСУ), который осуществляет информационный обмен пакетами информации с соседними узлами (рис. 2).

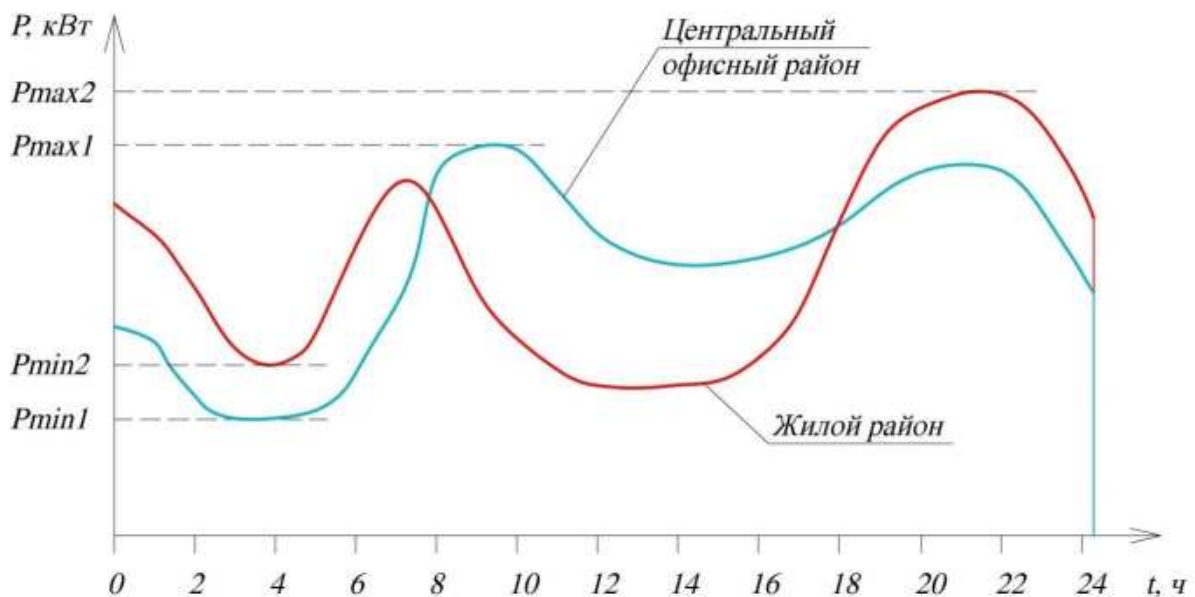


Рис. 3. Суточный график нагрузки разных городских районов

Для существующих городских сетей характерен неравномерный суточный график электрической нагрузки (СГН), что ведет к повышению потребления топлива, ухудшению экологических показателей энергосистем, снижению качества энергии и ее удорожанию.

Следует отметить, что СГН в разных районах города выглядит по-разному (рис. 3). Например, спальный микрорайон "Медвежья долина" и офисный район в окружении ул. Большая Печерская.

Из графика видно, что максимум нагрузки в центральном районе наблюдается в то время, когда нагрузка спального района не значительна. Предложенная концепция построения сетей с применением современных цифровых устройств защиты и регулирования позволит сгладить общий СГН за счет перетоков мощности из профицитного района в дефицитный (рис. 4). Тем самым, повысится энергосбережение и энергоэффективность сети в целом.

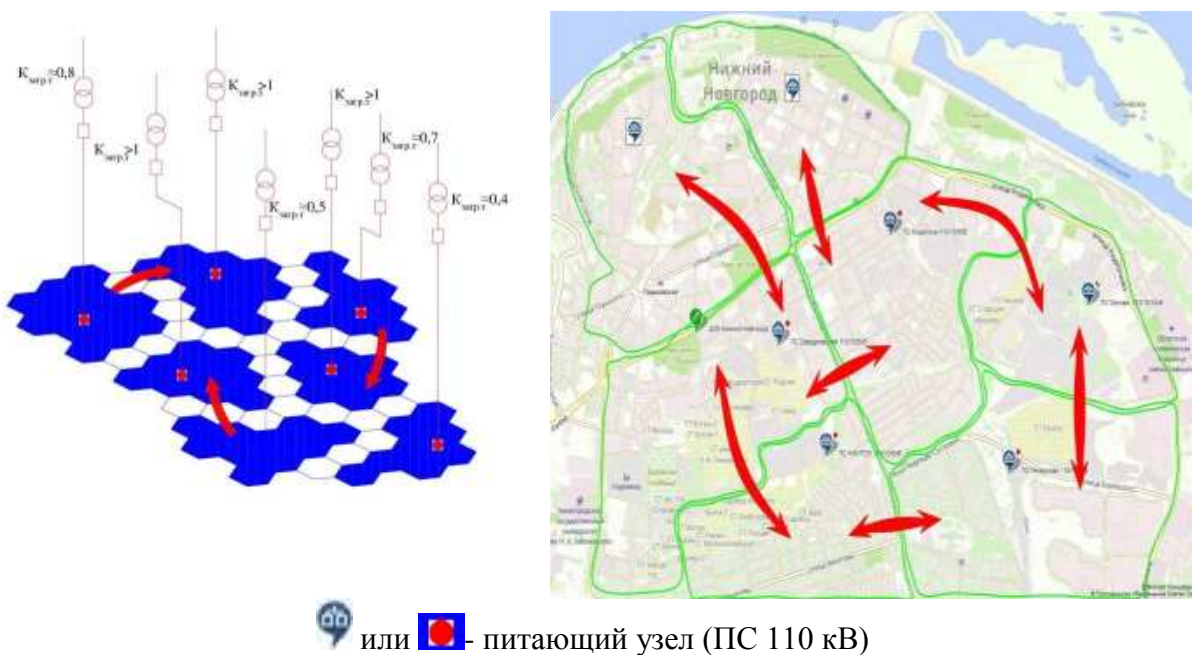


Рис. 4. Перетоки мощности между городскими районами в течение суток

Универсальная "сотовая" топология сети делает возможным использование типовых трехлучевых узлов нагрузки. В них реализованы стандартные схемные и компоновочные решения, ИМРСУ с едиными алгоритмами функционирования. Унифицированность электротехнических и информационных решений упрощает монтаж оборудования, делает его компактным и простым в эксплуатации.

Автоматическое функционирование сети гексагонального типа основано на реализации различных алгоритмов. Основная классификация ААФ представлена на рис. 5.



Рис. 5. Классификация адаптивных алгоритмов функционирования

Алгоритмы, определяющие состояние схем узлов нагрузки, имеют ряд ограничений в результате их отработки. Это определяет очередность отработки алгоритмов, а также необходимые временные задержки между циклами алгоритмов различных уровней.

Для формирования автоматической сети нужно разделить уровни алгоритмизации сети: аппаратный, межузловой (межподстанционный) и межзональный.

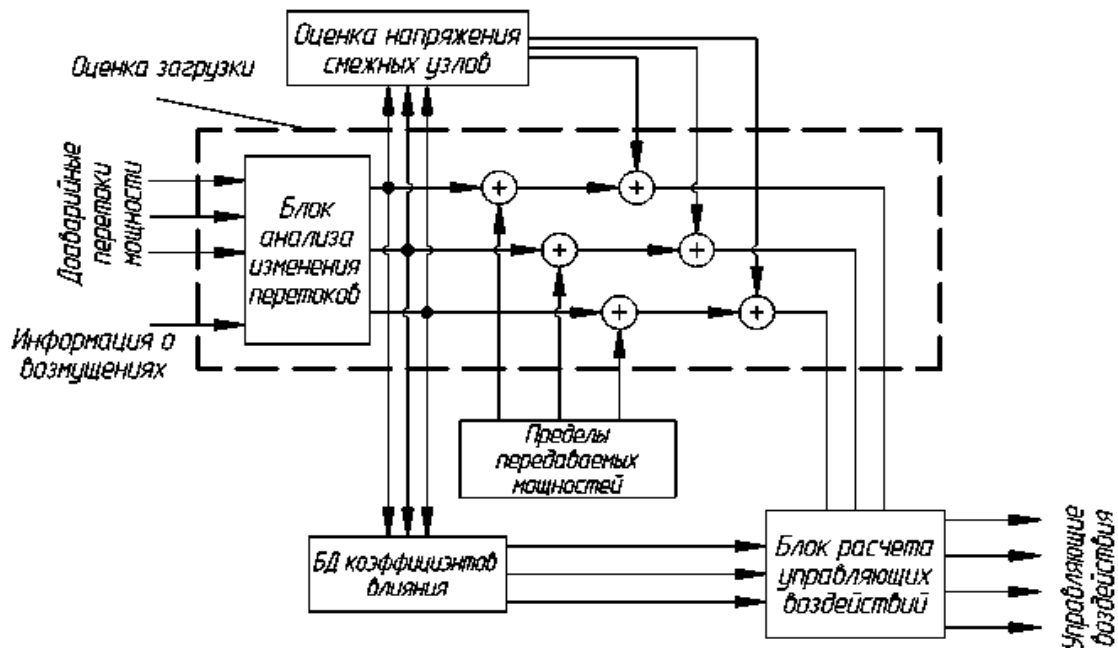


Рис. 6. Структурная схема алгоритма функционирования по допустимой нагрузке силового оборудования

Основа алгоритма функционирования по допустимой нагрузке силового оборудования это оценка перегрузки кабельных линий сети и питающих трансформаторов (рис. 6). Результатом его действия являются формирования управляющих воздействий, которые анализируются блоком управляющих воздействий.

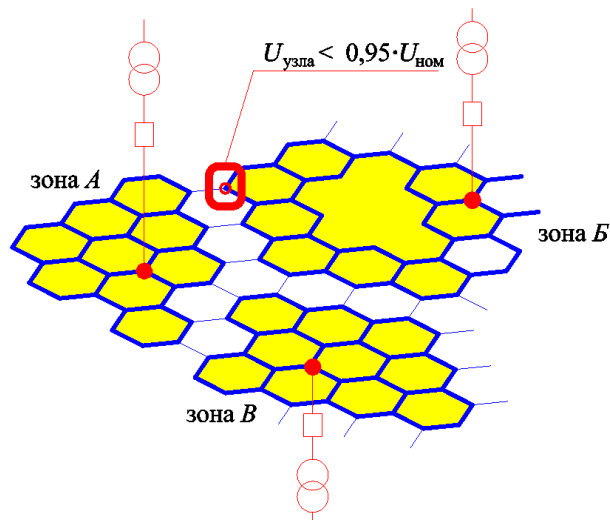


Рис. 7. Схема сети при аварийном отключении ее участка в одной из гексагональных зон

Одной из ключевых особенностей гексагональных сетей является возможность гибких переключений, например, в случаях просадки напряжения в удаленном узле, как результат аварийного отключения участка сети (рис. 7), следствием которого является увеличение длины пути протекания тока от источника к потребителю (выход из строя резервных связей). При этом соблюдения ГОСТ на качество электроэнергии, а именно поддержание необходи-

мого уровня напряжения возможно путем автоматического переключения питания проблемного узла от источника соседней гексагональной зоны. Здесь ключевым является алгоритм функционирования по допустимому уровню напряжения (рис. 8).

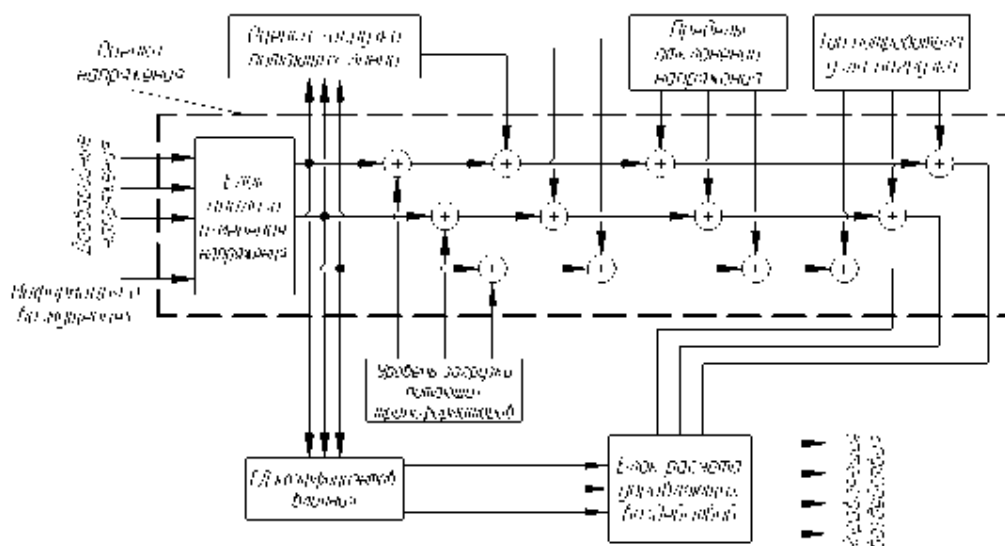


Рис. 8. Структурная схема алгоритма функционирования по допустимому уровню напряжения

Управляющие воздействия, сформированные различными алгоритмами, анализируются в блоке, представленном на рис. 9. Данный блок является ключевым элементом взаимодействия между узлами (подстанциями) сети: здесь анализируются сигналы управления от смежных подстанций и принимаются окончательные управляющие оборудованием сигналы.

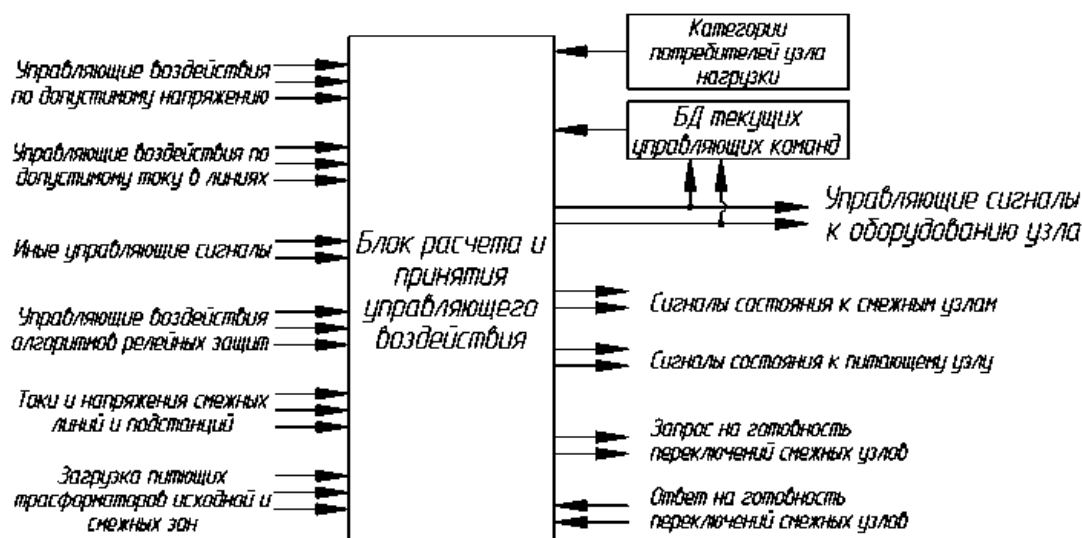


Рис. 9. Структурная схема блока анализа алгоритмов управления

Особое внимание уделяется стандарту обмена информацией между элементами сети разных уровней. Системы управления узловой релейной защиты, системы противоаварийной автоматики, системы телемеханики и диагностики нового поколения реализуются посредством протоколов (IEC 61850-9-2 LE). Причиной использования стандарта IEC 61850 является поддержка его новыми типами первичного оборудования, что облегчает возможность информационной интеграции, управления и диагностики. Основным новшеством является со-

здание шины процессов (ProcessBus), под которой подразумевается высокоскоростная оптическая среда передача данных, обеспечивающая передачу измеренных и преобразованных в цифровой вид (в формат GOOSE) мгновенных значений тока и напряжения, а также положений коммутационного оборудования для выполнения всех задач управления (РЗА ЦСУ, учета электроэнергии и др.).

Ввиду большой значимости узлов нагрузки и системы цифровых коммуникаций, для функционирования гексагональной сети, актуальны повышенные требования к информационной безопасности, в том числе защита данных от внешних и внутренних угроз, защита каждой точки потенциального вторжения в цифровую сеть передачи данных, фильтрация сетевого трафика.

Библиографический список

1. Концепция интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной. Редакция 5,0. – М., 2012.
2. **Лоскутов, А.Б.** Интеллектуальные распределительные сети 10-20 кВ с гексагональной конфигурацией / А.Б. Лоскутов [и др.] // Промышленная энергетика. 2013. № 12. С. 3–7.
3. **Лоскутов, А.Б.** Топология городских распределительных интеллектуальных электрических сетей 20 кВ / А.Б. Лоскутов, Е.Н. Соснина, А.А. Лоскутов // Промышленная энергетика. 2012. № 5. С. 11–17.

Дата поступления

в редакцию: 29.04.2014

A.B. Loskutov, A.A. Loskutov, D.V. Zyrin, L.A. Larionov,

FLEXIBLE DISTRIBUTION NETWORK WITH ADAPTIVE ALGORITHMS AS DECISION INTELLECTUALIZATION OF URBAN ELECTRICAL GRIDS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: Concept of new configuration of active-adaptive electric grids with typical control algorithms was proposed.

Design/methodology/approach: Existing urban distribution electric grids are highly depreciation and have a large number of non-ordered reserve links. In existing radial distribution networks may be organized automatic operation. Hexagonal networks have precise system configuration and they are able to complete algorithmization control due to their configuration.

Findings: Hexagonal grids which consist of universal three-prong nodes were developed. Adaptive control algorithms have been developed for hexagonal grids. Power grids with a hexagonal configuration will be more flexible to changes in electric regime.

Research limitations/implications: Hexagonal configuration of electrical networks achieves maximum efficiency when new distribution networks are formed from individual hexagonal zones. Hexagonal zones have reserve connection with each other. Every network node becomes an independent operating unit. Operation algorithms are universal for all nodes of the circuit.

Originality/value: Implementation of hexagonal electric grids is possible while using the equipment load nodes with digital control. Digital electrical substations will be the main element of an active-adaptive uniformly distributed power grids in the future. Digital information space of hexagonal grids allows quick generate the control actions. Adaptive control algorithms in hexagonal grids allow to make electric network flexible. Implementation of adaptive control algorithms allow to abandon dispatching in electric networks.

Key words: active-adaptive control system, adaptive control algorithms, distribution electric grids, hexagonal configuration of the distribution electric grids, information network, interface, IEC 61850, smart grid.

УДК 621.3.016.31

Д.Г. Садиков¹, Д.С. Мочалин¹, В.Г. Титов²

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЧАСТОТЫ НА КОМПРЕССОРНЫХ СТАНЦИЯХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

ОАО «Гипрогазцентр», Н. Новгород¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассматривается применение преобразователей частоты на компрессорных станциях магистральных газопроводов.

Главным направлением уменьшения потребления электроэнергии на компрессорных станциях (КС) магистральных газопроводов (МГ) на сегодняшний день является внедрение регулируемого электропривода на объектах основной технологии и вспомогательных объектах [1, 2].

Применение высоковольтных преобразователей частоты

Мощные высоковольтные преобразователи частоты применяются на КС в составе электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА). В состав ЭГПА такого типа входят следующие основные узлы:

- высокоскоростная, высоковольтная асинхронная машина;
- преобразователь частоты (далее ПЧ);
- согласующий трансформатор (один или несколько);
- система магнитного подвеса ротора электродвигателя и центробежного нагнетателя;
- агрегатная система автоматического управления (САУ).

При реконструкции и новом строительстве КС применяются современные типы ЭГПА, производимые как у нас в стране, так и за рубежом, которые в полной мере обеспечивают выполнение требований по энергетическим и пускорегулировочным характеристикам, обеспечению высокой надежности, ремонтпригодности и безаварийности работы основных узлов.

Самым экономичным способом плавного автоматического регулирования скорости вращения и производительности ЭГПА является использование преобразователей частоты для плавного автоматического регулирования скорости приводного двигателя. Это позволяет наиболее эффективно обеспечить:

- энергосберегающие режимы, так как центробежный нагнетатель (ЦБН) получает от сети ровно столько энергии, сколько нужно для оптимальной работы с максимальным КПД;
- стабилизацию параметров давления, температуры, подачи газа;
- надежность эксплуатации агрегатов и их ресурс при снижении затрат на ТОиР;
- экологичность, электромагнитную совместимость и интеграции в АСУТП КС.

Для эксплуатации высокооборотного асинхронного электродвигателя специального исполнения необходим ПЧ с выходной частотой не менее 100-150 Гц [3].

Высокая стоимость ПЧ практически не сдерживает широкое промышленное использование их, так как эффект энергосбережения обеспечивает быструю окупаемость первичных капитальных затрат. Маркетинговые исследования компании IMS Research в области силовой электроники показывают, что мировой объем продаж высоковольтных ПЧ в 2011 г. составил более \$21 млрд, превысив аналогичные показатели 2010 г. на 6%. Прогнозируется и дальнейший рост объемов продаж высоковольтных ПЧ на в период с 2013 по 2016 г. при удельной стоимости \$200-400 на кВт [4].

Конструктивные особенности высоковольтных преобразователей частоты

В качестве элементной базы ПЧ используются силовые полупроводниковые приборы: тиристоры типа GCT, IGCT, SGST; биполярные транзисторы с изолированным затвором IGBT. Современные мощные IGBT транзисторы и модули на их основе позволяют создавать инверторы средней и большой мощности в соответствии с приведенной классификацией [5].

Таблица 1

Сравнительные характеристики преобразователей частоты различных заводов-изготовителей

Фирма / Показатели	ABB		Siemens		Alstom (Converteam)
1	2		3		4
Серия	ACS 1000i	ACS 5000	Sinamics GM 150	Perfect Harmony	MV 7000
Выходное напряжение, В	2200, 3300, (6000 - с вых. тр-ром)	6000, 6600, 6900	3300, 6000, 6600, 7200	3300, 6000, 6600, 10 000, 13 800	3300, 6600, 10000
Мощность, кВт	315...5000	4400...20 500	600...10 000	300...17 500	4200...33600
Диапазон изменения выходной частоты, Гц	0...66 (200)	0...75	0...250	0...60 (250)	0...150
Схема преобразователя (стандартное исполнение)	12(24)-пульсный НВ, АИН по схеме NPC с выходным LC-фильтром	36-пульсный НВ, АИН по схеме NPC на каждую фазу	12(24)-пульсный НВ, АИН по схеме - 3 уровневый NPC (опция выходной LC-фильтр)	Многообмот. трансформ. с последоват. соединением IGBT - АИН в фазе	12,(24)-пульсный НВ (AFE - опция), АИН на IGBT по схеме - 3 уровневый NPC с ШИМ
КПД, %	98 (без тр-ра)	> 98,5 (без тр-ра)	98,5 (без тр-ра)	96 (с тр-ром)	99
Входной коэффициент мощности	0,96	> 0,96	0,96	0,96	≥0,96 (1 при AFE)
Тип силовых полупроводниковых приборов	Диоды — НВ, IGCT - АИН	Диоды - НВ, IGCT-АИН	Диоды — НВ, АИН -IGBT и IGCT	Диоды — НВ, IGBT - АИН	Диоды — НВ, АИН -IGBT
Принцип коммутации в инверторе	Трехуровневый ШИМ	Многоуровневый/ (9-уровневый) ШИМ	Трехуровневый ШИМ	Многоуровневый ШИМ (Multi-Level PWM)	Трехуровневый ШИМ
ТНД сетевой, %;	5,2% (напр.) 6,5 % (ток) для Хисточн = 5,75%	1,5%(напр.) 1,0% (ток)	5,2% (напр.) 6,5% (ток) для Хисточн = 5,75%	1,2% (напр) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	5,2% (напр.) 6,5 % (ток) для Хисточн = 5,75%
ТНД нагрузки, %	≤ 5% с выходным sin-фильтром	<5%	≤ 5% с выходным sin-фильтром	< 2,5%	<5%
Фирма / Показатели	Allen-Bradley	Mitsubishi	General Electric	Toshiba	Фирма / Показатели
Серия	PowerFlex 7000	MELTRAC-F500HV	TM Drive	Innovation MV	Toshvert MV
Выходное напряжение, В	2400, 3300, 4160, 6600	3300, 6600	3300/3000, 6600/6000	3300,4160, 6600,10000	3300, 6000
Мощность, кВт	300... 6340	500... 6600	250... 7700	2000...12 500	500... 5450
Диапазон изменения выходной частоты, Гц	0...75	0...50 (60)	0...50 (60)	0...60	0...60 (120)
Схема преобразователя	6 (18)-пульсный УВ AFE, АИТ с ШИМ	Многообмот. трансформатор 18,36,54-пульсный НВ и IGBT - АИН в фз	Многообмот. трансформ. 18-пульсный НВ и IGBT - АИН в фазе	6-пульсный УВ с IGCT -ШИМ. АИН с IGCT -ШИМ и выходным LC-фильтром	Многообмот. трансформ. 18, 30 и 36-пульсный НВ и IGBT - АИН, AFE —опция
КПД, %	98,0 (без тр-ра)	98 (с тр-ром)	97,0 (с тр-ром)	97,5	97,6 (с тр-ром)
Входной коэффициент мощности	0,96 (18-пул.)	0,96	0,95	0,98...1,0	0,95
Тип силовых полупроводниковых приборов	Тир-ры — УВ. SGCT - АИТ	Диоды — НВ, IGBT - АИН	Диоды — НВ. IGBT - АИН	IGBT - УВ и АИН	Диоды, IGBT – НВ, IGBT - АИН
Принцип коммутации в инверторе	ШИМ с избир. подавлением высших гармоник	Многоуровневый ШИМ (Multi-Level PWM)	Многоуровневый ШИМ (Multi-Level PWM)	Комбиниров. ШИМ (Multi-Level PWM bridge topologies)	Многоуровневый ШИМ (Multi-Level PWM)

Окончание табл. 1

1	2	3	4	
ТНД сетевой, %;	≤3,5% (напр.), ≤3%(ток)– для 18-пульсного выпрямителя	1,2% (напр) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	1,2% (напр) 0,8% (ток) для Хисточн = 5,75%	≤3,5% (напр.) 5,5% (ток) для Хисточн = 5,75%
ТНД нагрузки, %	≤5%	<5%	<5%	<3%

Сравнительные характеристики ПЧ различных фирм производителей представлены в табл. 1 [6, 7].

Для регулирования скорости вращения и производительности ЭГПА наибольшее распространение получили ПЧ, построенные по различным вариантам топологии двухзвенного автономного инвертора напряжения (АИН).

Для улучшения формы и гармонического состава выходного тока ПЧ в составе ЭГПА применяются трехуровневые АИН. Идея многоуровневой топологии заключается в делении напряжения в звене постоянного тока на конденсаторах и последовательном включении групп полупроводниковых ключей на транзисторах или тиристорах с комбинированным управлением. При этом вдвое уменьшается величина коммутлируемого напряжения и достигается улучшение формы выходного напряжения, что сокращает мощность выходного фильтра. На базе трехуровневой топологии производятся ПЧ таких фирм, как АВВ (серия ACS1000 напряжением до 4160 В на IGCT тиристорах), Siemens (серии SimoverMV, Sinamics GM 150 и Sinamics SM 150 на IGCT и IGBT), Convertteam (тип MV7000 на IGBT). Один из вариантов данной топологии представлен на рис. 1.

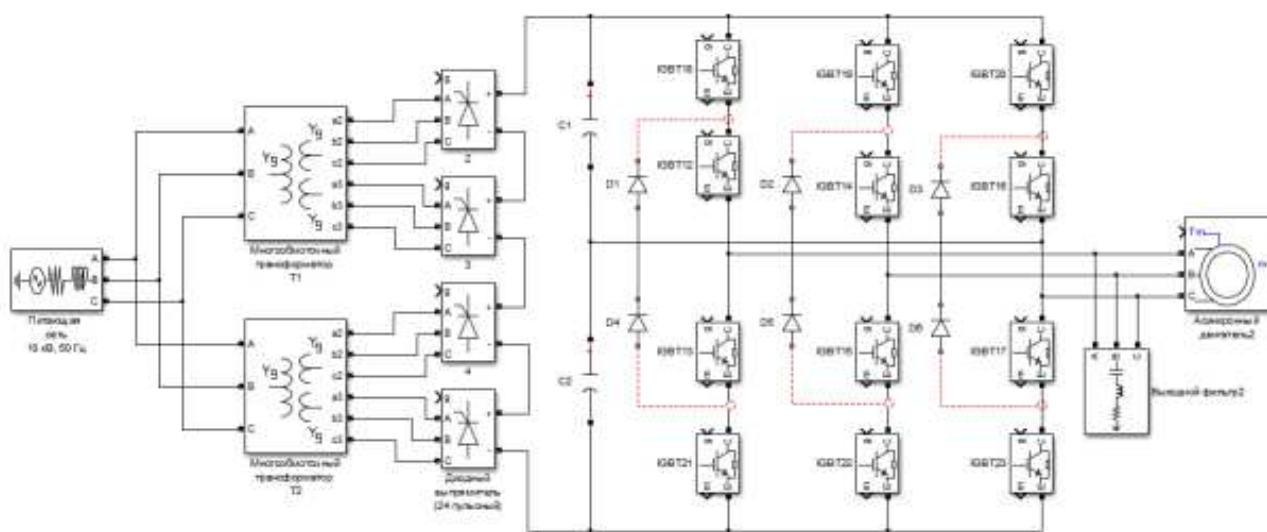
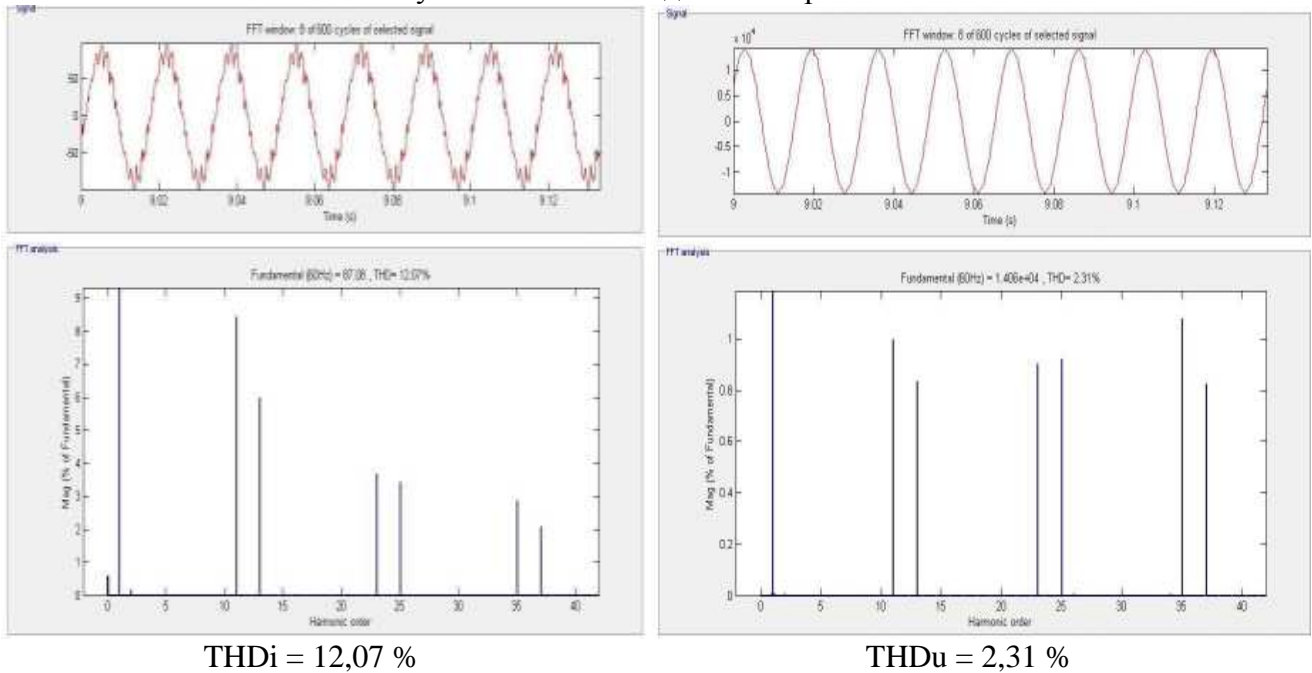


Рис. 1. Структурная схема двухзвенного трехуровневого АИН (24-пульсная схема выпрямления)

Для улучшения гармонического состава входного тока и напряжения, обеспечения требований электромагнитной совместимости (ЭМС) и обеспечения показателей качества электроэнергии на шинах ЗРУ-10 кВ в рамках ГОСТ 13109-97 применяется увеличение "пульсности" входного выпрямителя. Для этого на входе ЭГПА устанавливаются один или несколько согласующих трансформаторов с расщепленной вторичной обмоткой к которым подключены несколько неуправляемых выпрямителей, соединенных последовательно (рис. 1).

Анализ гармонического состава входного тока и напряжения двухзвенного трехуровневого АИН при 12- и 24- пульсной схеме выпрямления на входе представлен на рис. 2.

12-пульсная схема входного выпрямителя



24-пульсная схема входного выпрямителя

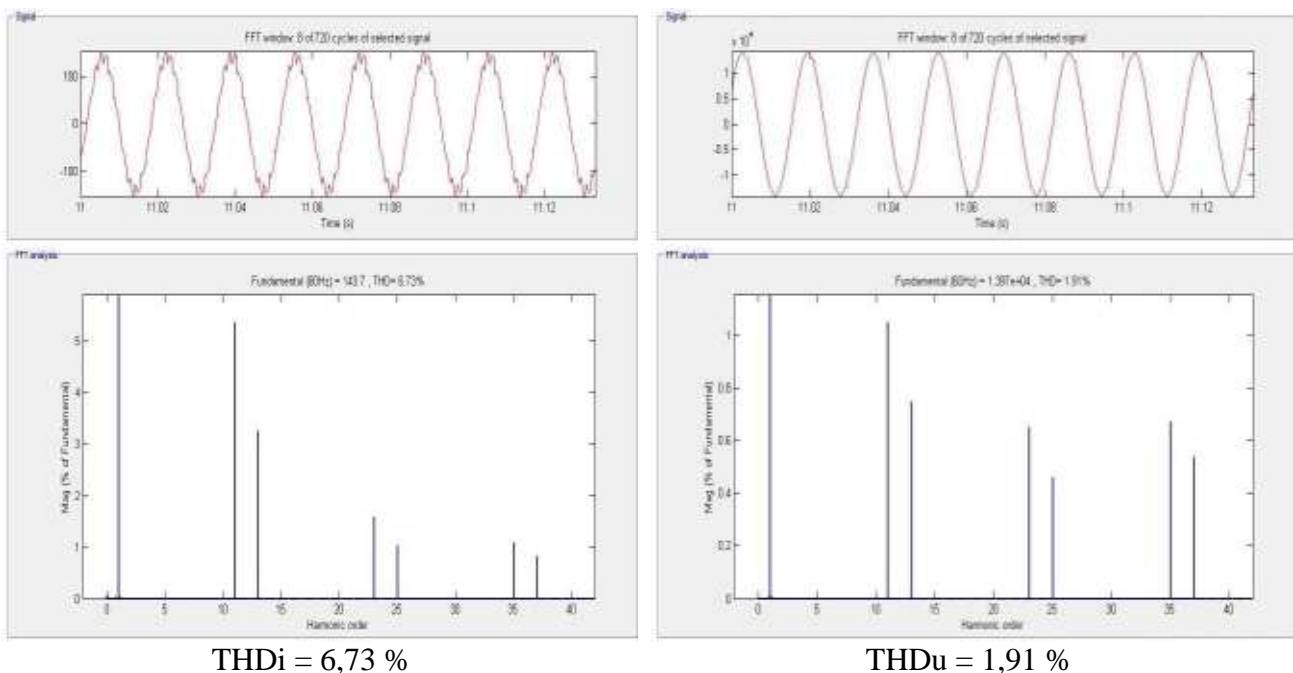


Рис. 2. Форма и гармонический состав входного тока и напряжения двухзвенного трехуровневого АИН при 12- и 24-пульсных схемах входных выпрямителей

Как видно из рис. 2, с увеличением "пульсности" схемы выпрямления значительно улучшается гармонический состав входного тока и напряжения ПЧ, что позволяет отказаться от применения фильтров для обеспечения показателей качества электроэнергии, согласно требованиям ГОСТ 13109-97, и избежать дополнительных финансовых затрат.

Дальнейшее увеличение уровней выходного напряжения ПЧ достигается при использовании многоуровневой (Multilevel, [8]) топологии АИН. Основным достоинством таких преобразователей является практически синусоидальная форма выходного тока и напряжения, что позволяет отказаться от установки выходных фильтров и обеспечить совместимость со стандартными общепромышленными асинхронными двигателями. Такие преобразователи выпускают фирмы АВВ

(серия ACS5000 на IGCT), Siemens (серия Perfect Harmony на IGBT), Mitsubishi (серия MELTRAC-F500HV на IGBT), Toshiba (серия Toshvert MV) и General Electric (серия TM Drive на IGBT).

Деление напряжения, с целью повышения числа уровней, производится посредством многообмоточного входного трансформатора. Преобразователь на 6 кВ содержит 15 однофазных ПЧ, каждый с максимальным выходным напряжением 690 В. Силовая ячейка – инвертор напряжения питается трехфазным напряжением от отдельных обмоток трансформатора, соединенных в треугольник. Пять инверторов по выходу соединены последовательно, образуя фазу выходного напряжения с максимальным напряжением 3450 В. Линейное напряжение на выходе ПЧ будет 6000 В.

Такое схемное решение за счет многократно увеличенного числа пульсаций входного напряжения путем последовательного соединения выпрямительных ячеек на входе сводит к минимуму эмиссию высших гармоник в питающую сеть. Также за счет этого полностью обеспечиваются требования электромагнитной совместимости (ЭМС) без применения дополнительных фильтров или активного компенсационного выпрямителя на входе ПЧ [9, 10]. Анализ гармонического состава входного тока и напряжения многоуровневого АИН представлен на рис. 3.

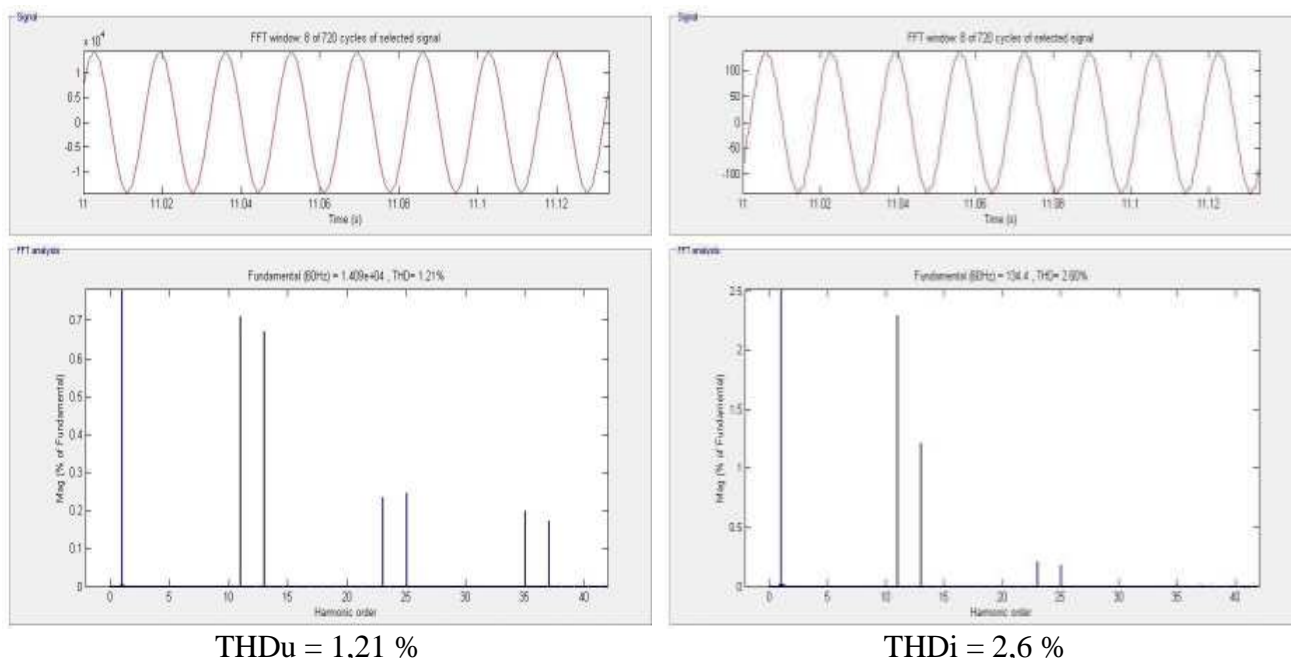


Рис. 3. Форма и гармонический состав входного тока и напряжения многоуровневого АИН

Еще одно достоинство преобразователей, построенных по многоуровневой топологии – высокая надежность. При выходе из строя одной или нескольких ячеек, ПЧ сохраняет свою работоспособность за счет автоматического шунтирования неисправных модулей и корректировки режима работы оставшихся ячеек системой автоматического управления. Выходная мощность при этом несколько снижается.

Многоуровневая схема построения высоковольтных ПЧ является перспективной для применения в составе ЭГПА. Работы в этом направлении позволят значительно улучшить энергетические характеристики агрегата и увеличить надежность всей системы в целом.

Применение низковольтных преобразователей частоты на примере аппаратов воздушного охлаждения газа

Начиная с 2000 г. в ОАО «Газпром» вопросы энергоэффективности и энергосбережения являются приоритетным направлением деятельности, и представляют собой комплекс

программных мер, направленных на рациональное использование и экономию расхода топливно-энергетических ресурсов.

Прогнозирование и планирование электропотребления на компрессорной станции является неотъемлемой частью экономии потребления топливно-энергетических ресурсов. Основными потребителями электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными газоперекачивающими агрегатами являются электродвигатели с короткозамкнутым ротором: маслонасосов, пожарных насосов, компрессоров, вентиляторов общеобменной вентиляции, вентиляторов воздушного охлаждения газа и запорно-регулирующей аппаратуры.

Анализ величины расхода электроэнергии показывает, что основным потребителем электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными перекачивающими агрегатами и в газотранспортной системе в целом является электропривод аппарата воздушного охлаждения газа. Охлаждение газа является наиболее энергоемким процессом (от 22 и до 48 % расхода электроэнергии на компрессорной станции с газотурбинными перекачивающими агрегатами [11, 12]).

В данной работе предлагается рассмотреть технико-экономическое сравнение вариантов построения схем электроснабжения аппаратов воздушного охлаждения (АВО) газа.

Электроснабжение АВО газа выполняется по радиальной схеме: комплектная трансформаторная подстанция – распределительное устройство низкого напряжения – шкаф питания и управления электродвигателем вентилятора аппарата воздушного охлаждения газа.

Построение схемы электроснабжения АВО газа осуществляется на основании СТО Газпром 2-6.2-149-2007 «Категорийность электроприемников промышленных объектов ОАО «Газпром», питание АВО газа осуществляется по второй категории надежности электроснабжения.

Также в работе рассматриваются варианты построения схемы электроснабжения и управления электродвигателями вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа:

- частотный регулируемый привод (ЧРП) на каждый двигатель вентилятора в аппарате воздушного охлаждения газа;
- плавный пуск на каждый двигатель вентилятора аппарата воздушного охлаждения газа;
- комбинированный способ управления – ЧРП на два двигателя вентиляторов и плавный пуск остальных двигателей [13, 14].

Прямой пуск асинхронного двигателя в работе не рассматривается, так как прямой пуск ведет к большим колебаниям сети, уменьшает возможность запуска нескольких электродвигателей вентиляторов АВО газа одновременно, большие пусковые токи уменьшают ресурс коммутационной аппаратуры.

Пуск асинхронных короткозамкнутых двигателей прямым подключением к сети сопровождается большим пусковым током, превышающим номинальное значение в несколько раз. Момент двигателя при прямом пуске также может достигать значений, существенно превышающих номинальное. Это приводит к большим нагрузкам как на приводимый в действие механизм, так и на питающую сеть. Для ряда механизмов требуется плавное увеличение или уменьшение момента двигателя в процессе разгона, замедления или торможения. Для решения этой проблемы используются специальные пусковые устройства, позволяющие снизить пусковой ток и момент двигателя.

Рассмотрены структурные схемы электроснабжения УВОГ с различными системами управления, исключающие прямой пуск двигателя:

- плавный пуск электропривода вентилятора АВО газа (рис. 4, а);
- частотно-регулируемый приводом вентилятора АВО газа (рис. 4, б);
- комбинированный способ управления - устройство плавного пуска и частотный регулируемый привод (рис. 4, в).

Далее представлены структурные схемы электроснабжения и управления электродвигателями аппаратов охлаждения газа.

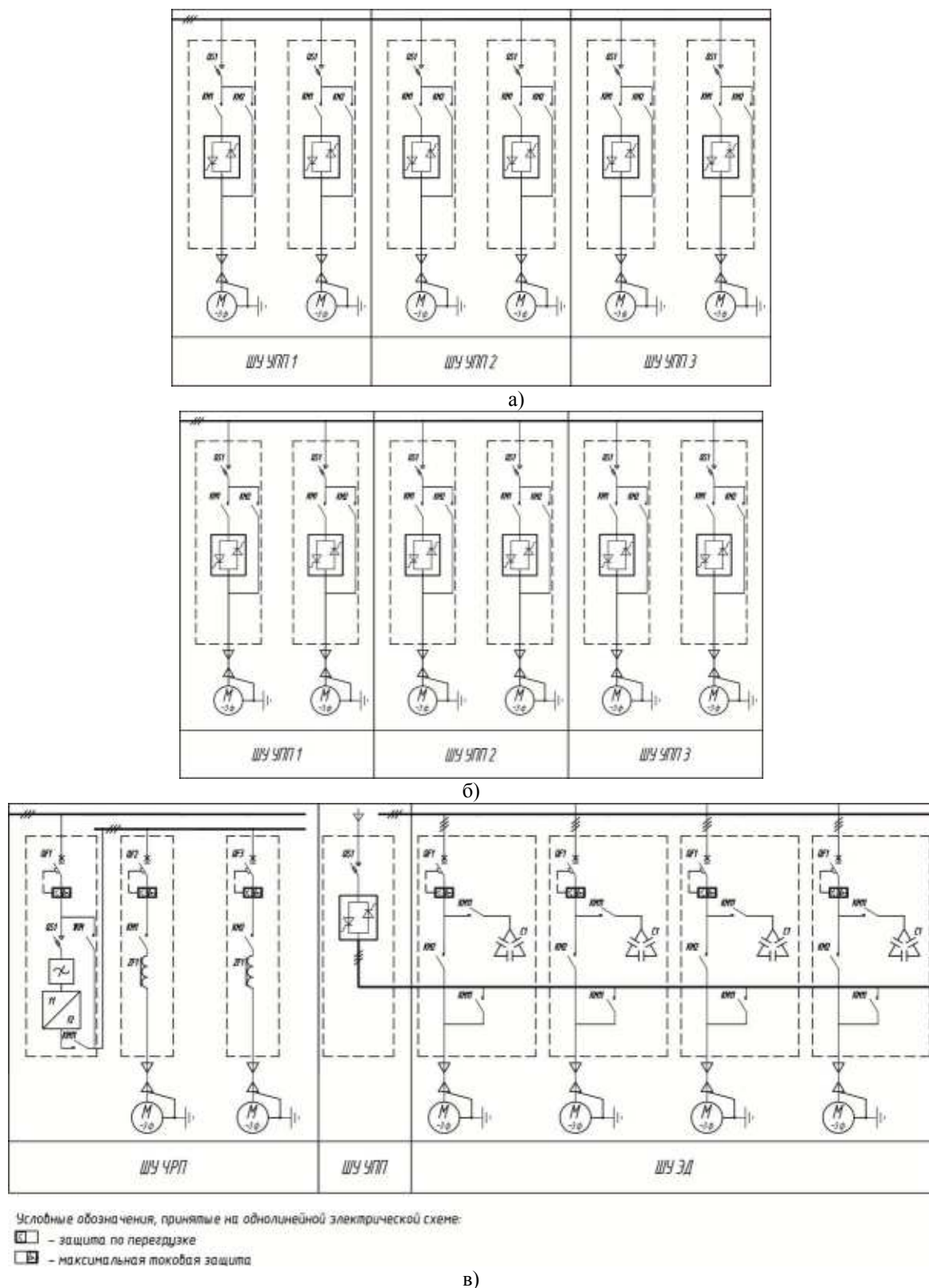


Рис. 4. Структурные схемы электроснабжения АВО газа с модулями плавного пуска (а), с частотно-регулируемым приводом (б), с частотно-регулируемым приводом и устройством плавного пуска (в)

1. Применение УПП позволяет: ограничить пиковые механические нагрузки как двигателя, так и механизма; выполнить мягкий, без толчков пуск; ограничить пусковой ток; повысить коэффициент мощности; экономить энергию при работе двигателя в ненагруженном

режиме; исключить пики тока при переключении; отказаться от контакторов, либо производить коммутацию контакторов в отсутствие тока.

2. Индивидуальное частотное регулирование привода позволяет осуществлять более гибкое (по сравнению с групповым и дискретным) управление процессом охлаждения на всей теплообменной поверхности без вмешательства оператора.

Использование частотных регуляторов обеспечивает плавные пуски электродвигателей, которые устраняют пусковые токи и перегрузки, что дает возможность увеличить ресурс двигателей, а также снизить потребление электроэнергии.

Следует также отметить, что использование частотных регуляторов обеспечивает автоматическое поддержание заданной температуры газа с высокой точностью (не ниже 0,2 °С). Кроме того, за счет использования всей теплообменной поверхности в процессе охлаждения достигается более равномерное распределение тепловых нагрузок по аппарату.

Достоинствами применения ЧРП также являются: полное использование поверхности теплообмена; сокращение периодических прямых пусков асинхронных двигателей от сети, что повышает их ресурс; экономия потребляемой электроэнергии; защита и постоянный мониторинг параметров работы каждого отдельного электродвигателя и диагностирование состояния подводящей сети; возможность контроля сопротивления изоляции подводящих кабелей; возможность автоподстройки ЧРП в соответствии с индивидуальными характеристиками электродвигателей; своевременное автоматическое отключение электродвигателей при возникновении аварийных и предаварийных ситуаций.

Применение индивидуальной системы частотного регулирования характеризуется минимальным количеством коммутационного оборудования, что определяет высокую эксплуатационную надежность системы, простоту и удобство ее обслуживания.

3. Комбинированная система управления – устройство плавного пуска и частотно-регулируемый привод вентилятора – совмещает в себе все положительные качества УПП и ЧРП, которые были отмечены ранее. Данную систему управления целесообразно использовать при оборудовании АВО газа ЧРП примерно 20%.

Таблица 2

УВОГ-1 (12 АВО газа в каждом по шесть АД)

	Схема построения	Количество, шт.	Стоимость одного шкафа управления (без НДС), руб.	Общая стоимость, руб.
Вариант 1	ШУ с ЧРП на каждый двигатель	12	5 796 000	69 552 000
Вариант 2	ШУ с ЧРП на пару двигателей	12	6 116 000	73 392 000
Вариант 3	ШУ с УПП	12	3 564 000	42 768 000
Вариант 4	ШУ с УПП и ЧРП	12	3 390 000	40 680 000

Таблица 3

УВОГ-2 (15 АВО газа в каждом по шесть АД)

	Схема построения	Количество, шт.	Стоимость одного шкафа управления (без НДС), руб.	Общая стоимость, руб.
Вариант 1	ШУ с ЧРП на каждый двигатель	15	5 796 000	86 940 000
Вариант 2	ШУ с ЧРП на пару двигателей	15	6 116 000	91 740 000
Вариант 3	ШУ с УПП	15	3 564 000	53 460 000
Вариант 4	ШУ с УПП и ЧРП	15	3 390 000	50 850 000

Комбинированный способ управления также позволяет: эффективно регулировать технологические параметры; экономить электроэнергию; при этом, кроме эффективного и экономичного регулирования, снижать общую аэродинамическую нагрузку вентилятора и механизмов привода.

Проанализируем стоимость применяемого оборудования на УВОГ при различных вариантах построения систем воздушного охлаждения газа.

Стоимость применяемого оборудования на УВОГ при различных вариантах построения систем воздушного охлаждения газа представлена в табл. 2, 3.

Данные расчеты по ценовым показателям без оценки стоимости коммутационной аппаратуры, стоимость в каждом варианте принимается одинаковой.

Также мы не учитывали применение асинхронных двигателей специальной конструкции на АВО газа с ЧРП (дополнительно устанавливается датчик температуры и вентилятор охлаждения), так как при уменьшении частоты вращения, увеличивается нагрев обмоток АД, появляется вибрация, снижение частоты вращения должно быть не менее 20-30 % от номинального.

Проведен анализ алгоритма работы УВОГ-1 и УВОГ-2 на дожимной компрессорной станции и режим работы установок охлаждения газа по годам (рис. 5).

Проведен анализ алгоритма работы УВОГ-1 и УВОГ-2 на дожимной компрессорной станции и режим работы установок охлаждения газа по годам (рис. 5). Применения ЧРП на стороне 0,4 кВ необходимо выполнять после анализа вариантов построения схем электроснабжения и алгоритмов регулирования АВО газа. В нашем случае алгоритм регулирования АВО газа выполняется в три ряда, в основном задействуется первый ряд как в летний, так и в зимний режим работы. Остальные два ряда асинхронных двигателей включаются по мере необходимости. Из чего следует, что наиболее предпочтительным является Вариант 4 – комбинированное управление асинхронными двигателями на АВО газа, приоритетным для данного проекта: 1 ряд – ЧРП; 2 ряд – устройство плавного пуска; 3 ряд – устройство плавного пуска.

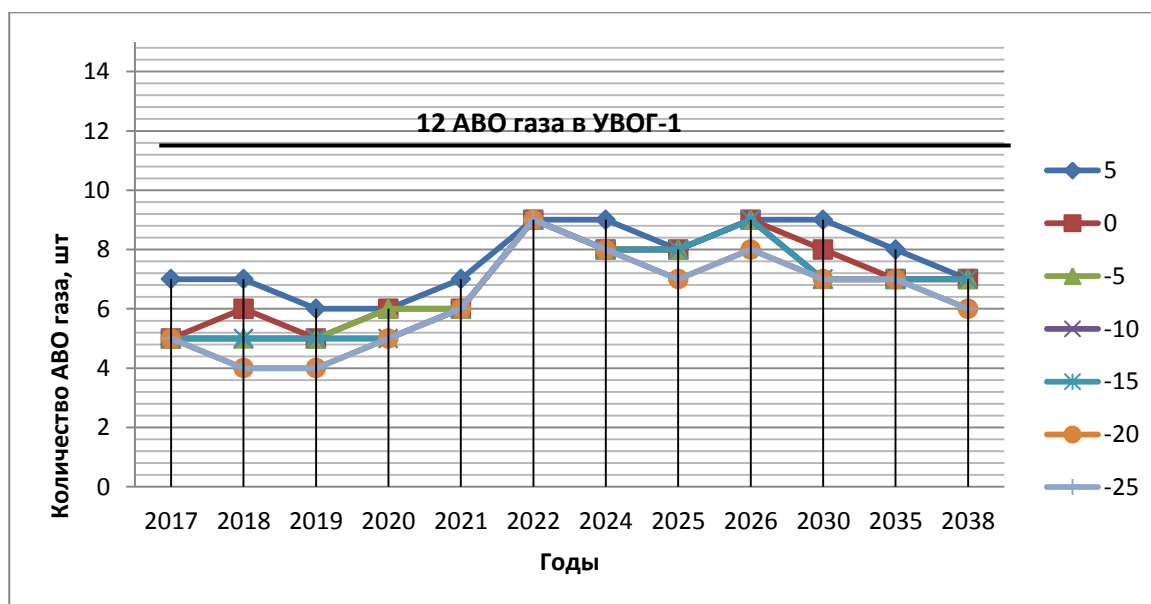


Рис. 5. Количество работающих АВО газа в УВОГ-1 с учетом температуры «точки росы» (зимний режим)

Заключение

Из рассмотренных топологий построения силовой части высоковольтных ПЧ различных заводов-изготовителей на сегодняшний день в составе ЭГПА применение находят схемы двух или трехуровневого АИН.

Многоуровневая схема построения высоковольтных ПЧ является перспективной для применения в составе ЭГПА. Работы в этом направлении позволят значительно улучшить энергетические характеристики агрегата и увеличить надежность всей системы в целом.

Так, применения ЧРП на стороне 0,4 кВ необходимо выполнять после анализа вариантов построения схем электроснабжения и алгоритмов регулирования АВО газа. В нашем случае алгоритм регулирования АВО газа выполняется в три ряда, в основном задействуется первый ряд, как в летний, так и в зимний режим работы. Остальные два ряда асинхронных двигателей включаются по мере необходимости.

И предпочтительным является Вариант 4 - комбинированное управление асинхронными двигателями на АВО газа, приоритетным для данного проекта: 1 ряд – ЧРП; 2 ряд – устройство плавного пуска; 3 ряд – устройство плавного пуска.

Библиографический список

1. **Крылов, Д.А.** Проблемы и перспективы использования электроэнергии в газотранспортной системе ОАО «Газпром» // Энергонадзор и энергобезопасность. 2006. №1. С. 37–45.
2. **Костенко, Д.А.** Вопросы реконструкции компрессорных станций Украины / Д.А. Костенко, В.П. Парафейник, А.В. Смирнов // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2009. № 4 (18). С. 8–13.
3. **Зипманн, В.** Модернизация компрессорных станций с использованием электроприводов: монография / В. Зипманн / Werner Siepmann. – Berlin, 2005. – 125 с.
4. **Eden, R.** The world market for semiconductors in AC-DC & DC-DC merchant power supplies-2012 Edition // IMS Research, Power & Energy, 2012 – Режим доступа: http://www.imsresearch.com/admin/download_files.php?type=report&value=3248_semiconductors_in_merchant_power_supplies_world_2012_brochure.pdf (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. англ.
5. **Чивенков, А.И.** Расширение функциональных возможностей инвертора напряжения систем интеграции возобновляемых источников энергии и промышленной сети / А.И. Чивенков [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2013. №1. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n1y2013/1564> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
6. **Лазарев, Г.Б.** Частотно-регулируемый электропривод насосных и вентиляторных установок // Силовая электроника. 2007. №3. С. 41–48.
7. Энергоснабжение и автоматизация энергооборудования компрессорных станций: монография / А.Ф. Пужайло [и др.]; под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС, 2011. – 664 с.
8. **Leon, M.** Tolbert, Thomas G. Habetler Novel multilevel inverter carrier-based PWM method // IEEE Transactions on industry applications. V. 35. №. 5. september/october 1999 – Режим доступа: <http://web.eecs.utk.edu/~tolbert/publications/tiasep99.pdf> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. англ.
9. **Колпаков, А.** Алгоритмы управления многоуровневыми преобразователями / А. Колпаков, Е. Карташев // Силовая электроника. 2009. №2. С. 57–65.
10. **Титов, В.Г.** Управление энергосберегающими полупроводниковыми преобразователями / В.Г. Титов [и др.] // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1909> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.

Дата поступления
в редакцию: 29.04.2014

D. Sadikov¹, D. Mochalin¹, V. Titov²

**USING A FREQUENCY CONVERTER ON A COMPRESSOR STATION
OF THE MAIN GAS PIPE LINE**

JSC «Giprogazcenter», N. Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

The article considers the design of modern electrically driven gas-pumping unit (EGPU). Provides an analysis of options for building the power part of the high-voltage frequency converters, used in the composition of the EGPU at compressor stations of main pipelines. Compare the characteristics of frequency converters of various manufacturers. Defined the most optimal scheme of the power part of frequency converters. The present article considers the results of research of the harmonic composition of the current and voltage consumed by frequency converters. Considered the influence of frequency converters on the power supply grid. Analysis method of suppression of higher harmonics.

The processes happening in system of power supply of the electric drive of the air cooled heat exchanger of gas are considered. The analysis of optimizing algorithms of work system of power supply of the electric drive of the air cooled heat exchanger of gas.

Key words: frequency converter, power supply grid, harmonics, filter, electromagnetic compatibility, compressor station; electric drive of the air cooled heat exchanger of gas are; mathematical model; the automated frequency and adjustable electric drive, the automated electric drive.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.745.456

В.А. Коровин¹, Т.Д. Курилина¹, П.П. Степанов²

ТЕРМОДИНАМИКА ВОССТАНОВЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗА ИЗ ЭЛЕКТРОПЕЧНОГО ШЛАКА И ИЗМЕНЕНИЕ ТЕПЛООВОГО БАЛАНСА В ПЕЧИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «Выксунский металлургический завод»²

Рассмотрена термодинамика восстановления железа из электропечного шлака электродуговой печи с алюмосодержащей высокоглиноземистой смесью. Приведен расчет теплового баланса реакций восстановления. Применение технологии с введением в период плавки в электродуговую сталеплавильную печь алюмосодержащей высокоглиноземистой смеси позволяет перевести часть железа из шлака в металл, а выделение тепла обеспечивает снижение расхода электроэнергии, сокращение цикла плавки и повышение производительности печи.

Ключевые слова: экзотермическая реакция, восстановление, электродуговая печь, железо, алюминий, прибыль, производительность.

Целью любого технологического процесса является сохранение и, что более предпочтительно, снижение расхода сырьевых материалов и энергоресурсов. Аналогичные требования стоят перед любым вариантом усовершенствованной технологии производства стали и чугуна.

Для детального рассмотрения процесса плавки и выявления параметров, влияющих на ход процесса и способных вносить изменения, могут быть проведены расчеты материального и теплового баланса электропечи в условиях ОАО «ОМК - Сталь».

Теоретические и практические данные свидетельствуют о важной роли степени окисленности шлака, причем следует выделять из общего содержания оксидов железа в шлаке долю Fe_2O_3 .

При одном и том же общем содержании оксидов железа в шлаке кардинально может меняться как масса образующегося шлака, так и его свойства. Причиной такого явления следует считать разное отношение FeO/Fe_2O_3 в печном шлаке.

Совершенствование технологии, применение активных компонентов и постоянный контроль над остаточным содержанием углерода в металле и оксидов железа в шлаке позволит регулировать шлаковый режим процесса. Причем недопустимо уменьшение соотношения FeO/Fe_2O_3 в шлаке.

При выплавке с использованием 100%-ного стального лома расход карбонизатора должен быть не менее 6-7 кг/т шихты. Содержание углерода в карбонизаторе должно быть не менее 85%. В противном случае нарушается равновесное содержание оксидов железа в шлаке и углерода в металле, уменьшается соотношение FeO/Fe_2O_3 и весь углерод расходуется не на восстановление оксидов железа, а на «сдерживание» дальнейшего окисления железа. При этом может наблюдаться неустойчивая пена шлака и его повышенное количество.

В настоящее время предлагается две технологии по использованию карбида кремния в сталеплавильном производстве: технология раскисления и легирования стали и технология подогрева металла за счет сжигания SiC .

Используемая в настоящее время технология производства стали предусматривает при выпуске металла из сталеплавильного агрегата в ковш предварительное раскисление.

В качестве раскислителей используются чушковый алюминий (первичный, вторичный), ферросилиций, силикокальций.

Расход конкретного раскислителя регламентируется особенностями технологии сталеплавильного агрегата, наличием специального оборудования, окисленностью металла и соответственно наличием указанных материалов.

Наиболее распространенным, является способ предварительного раскисления стали чушковым алюминием. Однако при этом возникают определенные проблемы, связанные с образованием трудноудаляемых неметаллических включений типа Al_2O_3 , а также трудности при разливе металла, в особенности на мелкосортовых МНЛЗ (затягивание стаканчика).

Предлагаемая технология раскисления основана на высоком сродстве к кислороду карбида кремния, при этом активность комплексного раскислителя (SiC) близка к активности алюминия и на много выше, чем отдельно у кремния и углерода.

Наиболее целесообразно отдавать карбид кремния непосредственно на струю при выпуске металла из печи (это связано с невысокой плотностью SiC и возможностью хорошего перемешивания в данном периоде).

В структуре расходного коэффициента металла в металлургическом переделе стали в электродуговой печи основной составляющей являются угар и потери железа, поэтому определение технологических решений по его снижению очень важно как с экономической точки зрения, так и с экологической.

Усвоение SiC (угар) колеблется от 70 до 80 % в зависимости от окисленности металла и шлака в ковше, от 20 до 30 % кремния и углерода переходит в металл в качестве легирующих компонентов, отсюда возможность использования SiC ограничено по нижнему пределу марками стали с содержанием $Si < 0,15\%$ и $C < 0,12\%$.

Практика использования SiC при раскислении стали на ОАО «Северсталь» показала возможность полного отказа от использования чушкового алюминия. При этом алюминий использовался только в виде катанки для обеспечения остаточного алюминия в стали в соответствии с требованиями ГОСТ или ТУ.

В настоящее время при наличии агрегатов печь-ковш, окончательное раскисление также может быть обеспечено SiC путем раскисления шлака в ковше, тем самым можно полностью отказаться от алюминия.

Эффективность данного мероприятия складывается из прямой замены карбидом кремния чушкового алюминия и снижения потребления ферросилиция, так как часть кремния из SiC идет на легирование.

Вторым положительным фактором, который пока не оценен в денежном эквиваленте, является факт значительного улучшения качества стали по структуре неметаллических включений.

А при разливе металла на мелкосортовых МНЛЗ полностью исключается проблема затягивания стаканчика шлаком (Al_2O_3).

С целью повышения степени восстановления железа из электропечного шлака и минимизации расхода электроэнергии можно применить для ввода в электродуговую печь алюмосодержащий высокоглиноземистый материал следующего состава: $Al_{мет}$ -15–20%, Al_2O_3 – 55–35%, SiC - 1–3%, $Si_{мет}$ – 10–8%, C – 9–6%. Восстановление железа из его окислов – это экзотермическая реакция с участием алюминия, позволяющая активно восстанавливать железо и использовать энергию химических реакций в процессе плавки вместо электроэнергии.

При введении алюмосодержащей высокоглиноземистой смеси (АВГС) в первичном шлаке дуговой печи происходят следующие реакции [1, 2, 3]:



Тепловой эффект реакции определяется:

$$\Delta H_{298}^0 = \Delta H_{298}^0(Al_2O_3) - 3 \cdot \Delta H_{298}^0(FeO),$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{Al}_2\text{O}_3) = -1675 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{FeO}) = -263,68 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 = -1675 - 3 \cdot (-263,68) = -883,96 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, тепловой эффект реакции восстановления железа из оксида металлическим алюминием составляет $-883,96$ кДж/моль, или при окислении 1 кг Al выделяется 16370 Дж тепла.

Принимаем, что теплоемкость компонентов реакции не зависит от температуры $\Delta C_p = \text{const}$ и находим тепловой эффект реакции при температуре 1600°C :

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{p298}^0 (T - 298),$$

$$C_{p298}^0 (\text{Al}_{\text{кр}}) = 24,34 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{Al}_2\text{O}_3) = 79 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{Fe}) = 25,23 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{FeO}) = 48,12 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$\Delta C_{p298}^0 = 79 + 3 \cdot 25,23 - 2 \cdot 24,34 - 3 \cdot 48,12 = -38,53 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

При температуре 1600°C тепловой эффект реакции составит:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{p298}^0 (T - 298) = -883960 - 38,53 \cdot (1873 - 298) = -944644,75 \text{ Дж/моль}$$

или $\Delta H^0 = -944,645$ кДж/моль.

Таким образом, при введении 1 кг Al выделяется 17493 Дж теплоты.



$$\Delta H_{298}^0 (\text{FeO}) = -263,68 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{SiO}_2) = -859,3 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 = -859,3 - 2 \cdot (-263,68) = -331,94 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, тепловой эффект реакции восстановления железа из оксида металлическим алюминием составляет $-331,94$ кДж/моль, или при окислении 1 кг Si выделяется 11855 Дж тепла.

Принимаем, что теплоемкость компонентов реакции не зависит от температуры $\Delta C_p = \text{const}$ и находим тепловой эффект реакции при температуре 1600°C :

$$C_{p298}^0 (\text{SiO}_2) = 44,68 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{Fe}) = 25,23 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{Si}_{\text{кр}}) = 19,8 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{p298}^0 (\text{FeO}) = 48,12 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

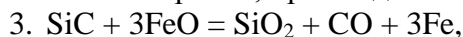
$$\Delta C_{p298}^0 = 44,68 + 2 \cdot 25,23 - 2 \cdot 48,12 - 19,8 = -20,9 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

При температуре 1600°C тепловой эффект реакции составит:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{p298}^0 (T - 298) = -331940 - 20,9 \cdot (1873 - 298) = -364857,5 \text{ Дж/моль}$$

или $\Delta H^0 = -364,858$ кДж/моль.

Таким образом, при введении 1 кг Si выделяется 13031 Дж теплоты.



$$\Delta H_{298}^0 (\text{CO}) = -110,5 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{SiO}_2) = -859,3 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{FeO}) = -263,68 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{SiC}) = -73,18 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 = -110,5 + (-859,3) - 3 \cdot (-263,68) - (-73,18) = -105,58 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, тепловой эффект реакции восстановления железа из оксида карбидом углерода составляет $-105,58$ кДж/моль, или при введении карбида углерода в количестве 1 кг произойдет выделение 2639,5 Дж тепла.

Принимаем, что теплоемкость компонентов реакции не зависит от температуры $\Delta C_p = \text{const}$ и находим тепловой эффект реакции при температуре 1600°C:

$$C_{P298}^0 (\text{SiO}_2) = 44,68 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{Fe}) = 25,23 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{CO}) = 29,15 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{FeO}) = 48,12 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{SiC}) = 5,75 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

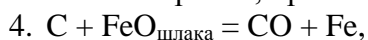
$$\Delta C_{P298}^0 = 44,68 + 29,15 + 3 \cdot 25,23 - 3 \cdot 48,12 - 5,75 = -0,59 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

При температуре 1600°C тепловой эффект реакции составит:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{P298}^0 (T - 298) = -105580 - 0,59 \cdot (1873 - 298) = -106509,25 \text{ Дж/моль}$$

или $\Delta H^0 = -106,51 \text{ кДж/моль}$.

Таким образом, при введении 1 кг SiC выделится 2663 Дж теплоты.



$$\Delta H_{298}^0 (\text{FeO}) = -263,68 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{CO}) = -110,5 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 = -110,5 - (-263,68) = 153,18 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, тепловой эффект реакции восстановления железа из оксида металлическим алюминием составляет 153,18 кДж/моль, или при восстановлении железа введением углерода в количестве 1 кг произойдет поглощение 12765 Дж тепла.

Принимаем, что теплоемкость компонентов реакции не зависит от температуры $\Delta C_p = \text{const}$ и находим тепловой эффект реакции при температуре 1600°C:

$$C_{P298}^0 (\text{CO}) = 29,15 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{Fe}) = 25,23 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{FeO}) = 48,12 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{C}) = 8,53 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$\Delta C_{P298}^0 = 29,15 + 25,23 - 48,12 - 8,53 = -2,27 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

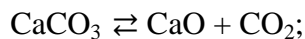
При температуре 1600°C тепловой эффект реакции составит:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{P298}^0 (T - 298) = 153180 - 2,27 \cdot (1873 - 298) = 149604,75 \text{ Дж/моль} \quad \text{или}$$

$\Delta H^0 = 149,605 \text{ кДж/моль}$.

Таким образом, при введении 1 кг C поглощается 12467 Дж теплоты.

5. При протекании плавки тепловой эффект реакции разложения карбоната кальция также вносит вклад в тепловой баланс:



$$\Delta H_{298}^0 (\text{CaCO}_3) = -1206 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{CaO}) = -635,1 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 (\text{CO}_2) = -393,51 \text{ кДж/моль},$$

$$\Delta H_{298}^0 = -635,1 - 393,51 - (-1206) = 177,39 \text{ кДж/моль}.$$

Следовательно, тепловой эффект реакции разложения CaCO_3 составляет 177,39 кДж/моль, или при разложении 1 кг произойдет поглощение 1773,9 Дж тепла.

Принимаем, что теплоемкость компонентов реакции не зависит от температуры $\Delta C_p = \text{const}$ и находим тепловой эффект реакции при температуре 1600°C:

$$C_{P298}^0 (\text{CaCO}_3) = 81,85 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{CaO}) = 42,8 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$C_{P298}^0 (\text{CO}_2) = 37,13 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град},$$

$$\Delta C_{P298}^0 = 42,8 + 37,13 - 81,85 = 1,92 \text{ Дж/моль} \cdot \text{град}.$$

При температуре 1600°C тепловой эффект реакции составит:

$$\Delta H_T^0 = \Delta H_{298}^0 + \Delta C_{P298}^0 (T - 298) = 177390 + 1,92 \cdot (1873 - 298) = 180414 \text{ Дж/моль} \quad \text{или}$$

$$\Delta H^0 = 180,414 \text{ кДж/моль}.$$

Таким образом, при введении 1 кг CaCO₃ поглощается 1804,14 Дж теплоты.

Результаты расчета теплового баланса плавки стали сведены в табл. 1.

Таблица 1

Расчет теплового баланса плавки

Компонент АВГС	Содержание компонентов смеси, %	На одну плавку		На одну тонну стали	
		Расход компонентов смеси, кг	Тепловой эффект, кДж	Расход компонентов смеси, кг	Тепловой эффект, кДж
Al металлический	15-20	345-460	(-6035,1)-(-8046,78)	1,125-1,5	(-19,68)-(-26,25)
Si металлический	8-10	184-230	(-2397,7) – (-2997,13)	0,6-0,75	(-7,82) – (-9,773)
SiC	1-3	23-69	(-61,25) – (-183,75)	0,075-0,225	(-0,2) – (-0,6)
Al ₂ O ₃	35-55	805-1265	-	2,625-4,125	-
C	6-9	138-207	1720,5 – 2580,7	0,45-0,675	5,61 – 8,415
Тепловой баланс:			(-6773,56)-(-8646,96)		(-22,09)-(-28,214)
CaCO ₃	-	1000-1200	1804,14 - 2165	6,25-7,5	11,28 – 13,53
Итого:			(-4969,42)-(-8625,31)		(-10,81)-(-14,684)

По реакциям 1,2,3,4 за счет 1 кг АВГС восстанавливается из шлака 1,33 кг железа, т.е. для того, чтобы снизить угар на 1%, необходимо затратить до 7,5 кг смеси на 1 т стали.

Введение экзотермической АВГС приводит к восстановлению железа, снижению угара элементов и к выделению тепла по сумме протекающих химических реакций.

В конечном итоге, за счет применения новой технологии с введением в период плавки в электродуговую сталеплавильную печь алюмосодержащей высокоглиноземистой смеси можно сократить массовую долю железа в электропечном шлаке примерно на 3-4%. Благодаря этому, железо, содержащееся в шлаке в виде оксида, переводится в расплав. При этом достигается экономия металла, что позволяет снизить затраты и уменьшить себестоимость тонны стали.

Важное практическое значение имеет и тот факт, что выделение тепла химических реакций обеспечивает снижение расхода электроэнергии, сокращение времени цикла плавки стали и повышение производительности электродуговой печи.

Сочетание этих факторов в итоге дает экономическую эффективность при промышленном использовании предлагаемого способа.

Библиографический список

1. Казачков Е.А. Расчеты по теории металлургических процессов: учеб. пособие для вузов / Е.А. Казачков. – М.: Металлургия, 1988. – 288 с.

2. Краткий справочник физико-химических величин / под ред. К.П. Мищенко, А.А. Равделя. – 7-е изд. – Л.: - Химия, 1974. – 200 с. [Электронный ресурс], <http://eugene980.narod.ru/fh.htm>, [Свободный доступ].
3. Steel times. Информационный портал о черной и цветной металлургии, [Электронный ресурс], <http://steeltimes.ru/books/theory/theorymetalproc/theorymetalproc.php>, [Свободный доступ].

*Дата поступления
в редакцию 01.04.2014*

V.A. Korovin¹, T.D. Kurilina¹, P.P. Stepanov²

**THERMODYNAMICS OF IRON REDUCTION FROM ELECTRIC FURNACE
SLAG AND CHANGING THE HEAT BALANCE IN THE FURNACE**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
OJSC «Vyksa metallurgical plant»²

Spoke about the thermodynamic of iron reduction from electric arc furnace slag, adding aluminum-containing high-alumina mixture. The calculation of the heat balance of redox reactions. Using technology with adding in an electric smelting furnace aluminum-containing high-alumina mixture in the period of melting, can translate some of the iron from the slag to the metal, the heat of reaction reduces the energy consumption, and reduces cycles of melting, increases productivity of the furnace.

Key words: exothermic reaction, reduction, electric arc furnace, iron, aluminum, performance.

УДК 669.13 (03)

К.В. Макаренко

**РАЦИОНАЛЬНОЕ СТРУКТУРИРОВАНИЕ
ГРАФИТИЗИРОВАННЫХ ЧУГУНОВ**

Брянский государственный технический университет

Произведен анализ влияния металлической основы на механические и эксплуатационные свойства чугуна с шаровидным графитом. С позиции теории графов рассмотрены процессы структурообразования графитизированных чугунов. Процесс рационального структурирования решается поэтапно на стадиях кристаллизации и при охлаждении в твердом состоянии. Представлены примеры реализации предложенного подхода к управлению процессами структурообразования графитизированных чугунов.

Ключевые слова: структурирование, чугун, управление, графит, металлическая матрица, регулируемое охлаждение.

Введение

Возрастающие требования к качеству, повышение механических и эксплуатационных свойств изделий в машиностроении требуют разработки новых эффективных способов контроля и управления процессами структурообразования при получении изделий, так как именно структура материала определяет его свойства. Однако современные подходы к методике выбора материалов базируются не только на критериях соответствия заданным свойствам, но и на экономии материальных и энергетических ресурсов в совокупности с экологической безопасностью на всех этапах жизненного цикла изделия, начиная от производства и заканчивая утилизацией. Традиционные железоуглеродистые сплавы все чаще заменяются цветными или композиционными материалами, которые, несмотря на более высокую стоимость, обладают меньшей плотностью и большей эксплуатационной стойкостью.

Применяемые в машиностроении Fe-C сплавы отличаются сравнительно низкой себестоимостью и высокими потребительскими свойствами. Конкурентоспособность изделий из сталей и чугунов на рынке можно улучшить путем повышения механических и эксплуатационных характеристик. В настоящее время разработано большое количество технологических способов, обеспечивающих улучшение свойств Fe-C сплавов, в большинстве своем они направлены на совершенствование структуры материалов.

Проводя сравнительный анализ двух основных типов Fe-C сплавов, можно отметить, что графитизированный чугун обладает лучшими литейными свойствами, чем сталь, это позволяет получать готовые изделия непосредственно из литого состояния. Масса деталей из чугуна ниже, чем стальных, что объясняется присутствием в структуре графитовой фазы. Графитовые включения в структуре чугуна способствуют повышению демпфирующей способности, теплопроводности и износостойкости изделий.

Однако графитовая фаза оказывает не только положительное, но и отрицательное воздействие на свойства чугуна. Графитовые включения, выступая в роли концентраторов напряжений, ослабляют металлическую матрицу, уменьшая механические свойства. Снизить отрицательное влияние включений графита можно за счет уменьшения их размеров и более равномерного их распределения в объеме металлической матрицы. Изменяя форму графитовых включений, их распределение и количество, в сочетании с рациональным структурированием металлической матрицы, можно эффективно управлять конечными свойствами чугуна.

Металлическая матрица в значительной степени определяет механические и эксплуатационные свойства графитизированных чугунов. Особенно очевидно это становится в чугунах с шаровидной формой графита, где негативная роль включений как концентраторов напряже-

ний нивелируется их сферической формой. В табл. 1 [1, 2] представлено сопоставление различных структур с механическими и эксплуатационными свойствами.

Таблица 1

Взаимосвязь механических и эксплуатационных свойств со структурой металлической матрицы высокопрочных чугунов с шаровидным графитом

Структура	Механические свойства					Эксплуатационные свойства		
	σ_B , МПа	σ_T , МПа	КС, кДж/м ²	НВ	δ , %	Износостойкость	Герметичность	Термостойкость
Ферритная	300 - 500	240 - 300	800 - 1500	150 - 200	10 - 20	Низкая	Отличная	Хорошая
Ферритно-перлитная	350 - 580	270 - 320	500 - 800	170 - 230	8 - 10	Низкая	Отличная	Хорошая
Перлитно-ферритная	400 - 600	300 - 380	300 - 500	140 - 270	5 - 8	Удовлетвор.	Хорошая	Хорошая
Перлитная (пластинчатый)	500 - 700	400 - 520	100 - 300	220 - 305	1 - 3	Хорошая	Хорошая	Удовлетвор.
Перлитная (зернистый)	560 - 680	450 - 640	540 - 850	200 - 320	3 - 8	Отличная	Хорошая	Удовлетвор.
Сорбитная	610 - 720	490 - 520	100 - 250	270 - 320	1 - 2	Отличная	Хорошая	Удовлетвор.
Трооститная	670 - 800	510 - 600	80 - 150	300 - 370	1 - 2	Отличная	Хорошая	Удовлетвор.
Верхний бейнит	850 - 1100	550 - 700	850 - 1000	250 - 350	4 - 15	Отличная	Удовлетвор.	Удовлетвор.
Нижний бейнит	1200 - 1600	850 - 1250	700 - 900	350 - 550	1 - 4	Отличная	Удовлетвор.	Удовлетвор.
Аусферритная	1000 - 1500	600 - 950	200 - 600	300 - 550	2 - 12	Отличная	Удовлетвор.	Удовлетвор.
Мартенситная	600 - 900	500 - 600	200 - 300	550 - 650	0,5 - 1	Отличная	Удовлетвор.	Удовлетвор.
Отпущенный мартенсит	600 - 1000	500 - 900	150 - 600	280 - 360	2 - 5	Отличная	Удовлетвор.	Удовлетвор.
Аустенитная	380 - 500	180 - 260	700 - 1200	140 - 225	15 - 30	Хорошая	Отличная	Отличная

Теоретический анализ

Задачу обеспечения в изделиях из графитизированных чугунов рациональной структуры можно решить, разбив ее на две стадии. *Во-первых*, обеспечить требуемые параметры графитовой фазы: форма, размеры, распределение и количество. Эта задача решается на уровне управления процессами кристаллизации, если не брать в расчет частный случай получения ковких чугунов в процессе графитизирующего отжига. *Во-вторых*, необходимо решить вопрос с оптимизацией характеристик металлической матрицы, ее структурными составляющими, их количественным и пространственным распределением.

При разработке технологического процесса, обеспечивающего получение требуемой металлической матрицы, необходимо учитывать большее количество разнообразных факторов. К наиболее важным факторам относятся: кристаллизационные процессы, теплофизические условия охлаждения, химический состав, а также возможность использования термической обработки как наиболее эффективного инструмента управления процессами получения требуемых структур металлических матриц. При таком подходе модель получения рациональных структур в изделиях из графитизированных чугунов можно представить в следующем виде (рис. 1).



Рис. 1. Модель обеспечения рациональной структуры в графитизированных чугунах

Используем данный подход для описания процессов структурообразования. В соответствии данным подходом разделим процессы на две составляющие части: первичное структурообразование, которое протекает при кристаллизации чугуна, и вторичное структурообразование, которое связано с превращением аустенита в процессе охлаждения из литого состояния или при термической обработке.

Представим процессы первичного структурообразования, протекающие в расплаве чугуна при охлаждении, в соответствии с теорией графов, как разновидность орграфа¹ (рис. 2).

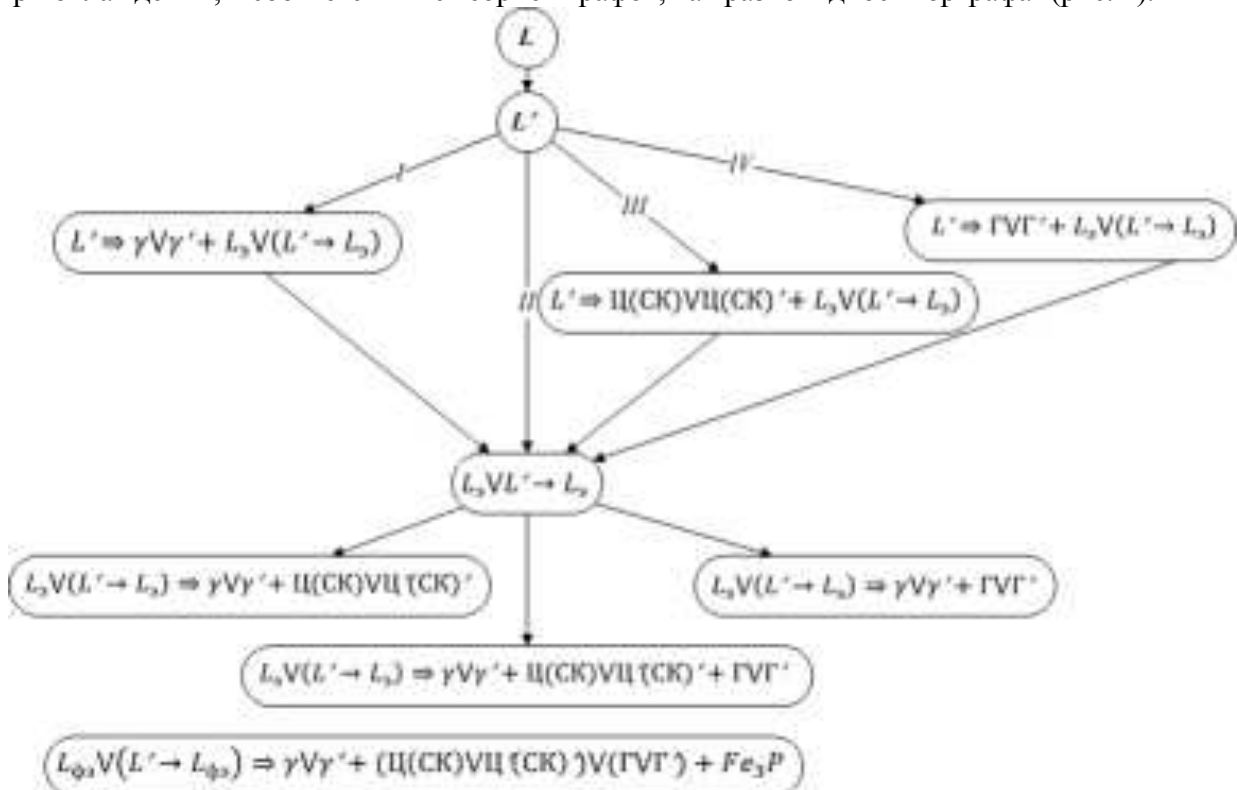


Рис. 2. Оргграф развития процессов первичного структурообразования в чугунах

Начальным состоянием процесса кристаллизации (корнем дерева) является расплав (L). При переохлаждении, которое считается необходимым условием начала процесса кри-

¹ Правильнее было бы назвать такой граф просто ориентированным деревом, но так как дерево по определению не содержит циклов, то в данном случае речь может идти о представлении оргграфа как дерева блоков и точек сочленения [3].

сталлизации, расплав переходит в метастабильное состояние (L'). Такое состояние отличается от стабильного гомогенного состояния возникновением и затуханием флуктуации состава и температур.

Кристаллизация в чугунах может развиваться различными путями: 1) в два этапа с формированием первичных фаз и последующей эвтектической (квазиэвтектической) кристаллизацией (I, III, IV); 2) в один этап, когда химический состав чугуна близок к эвтектическому (L_0) или в случае переохлаждения соответствует квазиэвтектике ($L' \rightarrow L_0$). В общем случае направление развития процессов кристаллизации зависит от химического состава, скорости охлаждения и модифицирования. При кристаллизации графитизированных чугунов путем воздействия управляющих факторов изменяется форма графитовой фазы, которая, наряду с металлической матрицей, определяет свойства чугунов.

Для комплексной оценки влияния химического состава на развитие процессов кристаллизации нелегированных чугунов может быть использован параметр – степень насыщенности [4]:

$$S_c = \frac{C, \%}{4,23 - 0,312Si, \% - 0,33P, \% + 0,18(Mn, \% - 1,76S, \%)},$$

где $C, \%$; $Si, \%$; $P, \%$; $Mn, \%$; $S, \%$ - концентрации в чугуне углерода, кремния, фосфора, марганца и серы соответственно. При медленном охлаждении, если $S_c > 1$, то кристаллизация развивается по дугам III и IV, $S_c < 1$ – дуга I, $S_c = 1$ – дуга II.

Помимо основных элементов, на развитие процессов первичного структурообразования оказывают легирующие элементы. В частности, карбидообразующие элементы (Cr, Mo, Ti, V, W) способствуют формированию специальных карбидов (СК) или карбидных эвтектик ($\gamma + СК$).

В условиях неравновесной кристаллизации наблюдается определенная метастабильность, свойственная всем фазам $L', \gamma', \Gamma', СК', Ц'^2$.

Для учета кристаллизации возможных легкоплавких эвтектик в чугунах изолированной вершиной в орграфе представлен процесс кристаллизации фосфидной эвтектики из точного расплава. Изолированная вершина орграфа может являться продолжением любого пути кристаллизации при соблюдении определенных условий концентрации (условие формирования фосфидной эвтектики $P, \% > 0,2$).

Вернемся к рассмотрению процессов структурообразования с позиции построения детерминированно-вероятностных систем. При развитии таких систем переход их одного состояния в другое осуществляется не чисто детерминированно или вероятно, а смешанно. Важное место в таких моделях отводится точкам бифуркаций³, в которых система делает выбор в направлении своего будущего развития [5]. В приложении к нашему случаю исследования процессов структурообразования в чугунах это может быть кристаллизация – переход из жидкого состояния в твердое или превращение, происходящее в твердой фазе. При этом ведущую роль в «точках бифуркаций» играют флуктуации, именно они определяют последующее направление развития изменений в процессах структурообразования.

Нетрудно определить «точки бифуркаций» для чугунов на орграфе (рис. 2), именно от направления развития процессов в этих точках зависит качественный и количественный состав структурных составляющих. Всего существует три основные точки: первая соответствует процессу кристаллизации из расплава L' – образование первичных фаз, вторая – выбор направления эвтектической кристаллизации из состояния L_0 или ($L' \rightarrow L_0$), а третья принадлежит превращению из аустенита ($\gamma \rightarrow \gamma'$) в твердом состоянии. Обобщая изложенное, приходим

² Под метастабильностью цементита в данном случае подразумевается карбидная составляющая сплава на основе железа, не соответствующая стехиометрической формуле Fe_3C .

³ «Точкой бифуркаций» в неравновесной термодинамике [6] называется такое состояние системы, при котором любое сколь угодно малое воздействие способно привести к глобальному изменению.

к следующему выводу: оценивать влияние различных факторов необходимо именно в этих трех точках, так как именно в этих точках система делает выбор направления для формирования тех или иных структурных составляющих.

Для пояснения понятия «точек бифуркаций» и их влияния на процессы первичного структурообразования чугунов обратимся к представлению процессов в виде энергетических схем (рис. 3), разработанных Г.И. Сильманом [7].

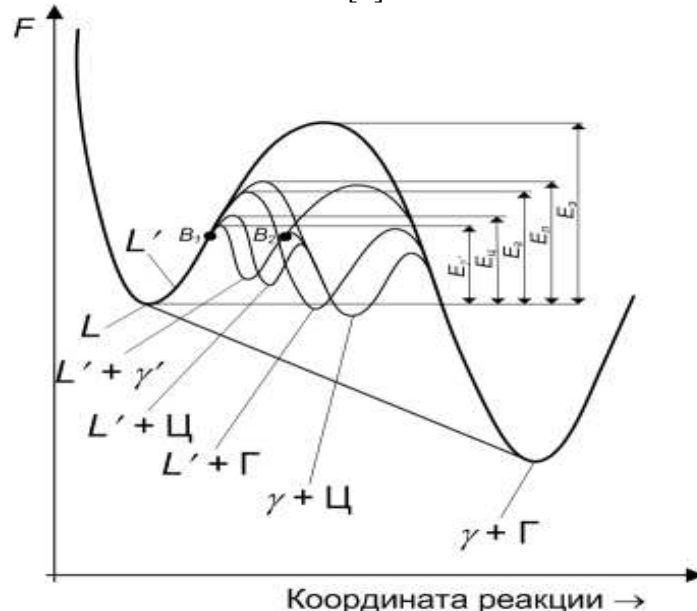


Рис. 3. Энергетическая схема развития процессов структурообразования в чугунах

В соответствии с общими положениями оценки энергетических особенностей фазовых переходов для перевода системы из одного состояния в другое необходимо преодолеть активационный барьер, который определяет уровень затрат энергии, расходуемых на зародышеобразование новой фазы. Наиболее устойчивый одноэтапный переход из жидкого состояния L' в состояние $(\gamma + \Gamma)$ реализуется при эвтектической кристаллизации, однако он требует сравнительно больших энергетических затрат, обусловленных скооперированным ростом двух фаз. Поэтому иногда энергетически выгоднее реализовывать процесс перехода к стабильной структуре через промежуточные состояния с выделением первичных фаз ($L' + \gamma'$), ($L' + \text{Ц}$) и ($L' + \Gamma$) или метастабильной эвтектики ($\gamma' + \text{Ц}$). Энергетические затраты системы для преодоления соответствующих активационных барьеров ($E_{\gamma'}$, $E_{\text{Ц}}$, E_{Γ} , $E_{\text{Л}}$) значительно меньше, чем в случае прямого перехода в стабильное состояние (E_3). На энергетической схеме точка B_1 является «точкой бифуркации», в которой система определяет направление последующего развития процессов кристаллизации из состояния L' . Чаще всего в реальных условиях, в независимости от химического состава чугуна, в локальных участках вследствие образования флуктуаций состава или применения процессов модифицирования формируются кластеры первичных фаз (γ , Ц или Γ), которые являются предтечей процессов эвтектической кристаллизации [8, 9].

Орграф превращений в твердом состоянии, происходящих при охлаждении чугунов в литейной форме или при термической обработке, представлен на рис. 4.

В интервале температур между эвтектическим и эвтектоидным превращением процесс структурообразования начинается с выделения вторичных фаз графита, цементита и/или специальных карбидов. Чаще всего вторичные фазы выделяются на уже имеющиеся включения, но иногда при ускоренном охлаждении могут образовывать колонии или локальные включения, представленные метастабильными фазами (Γ' , $\text{Ц}'$, $\text{СК}'$).

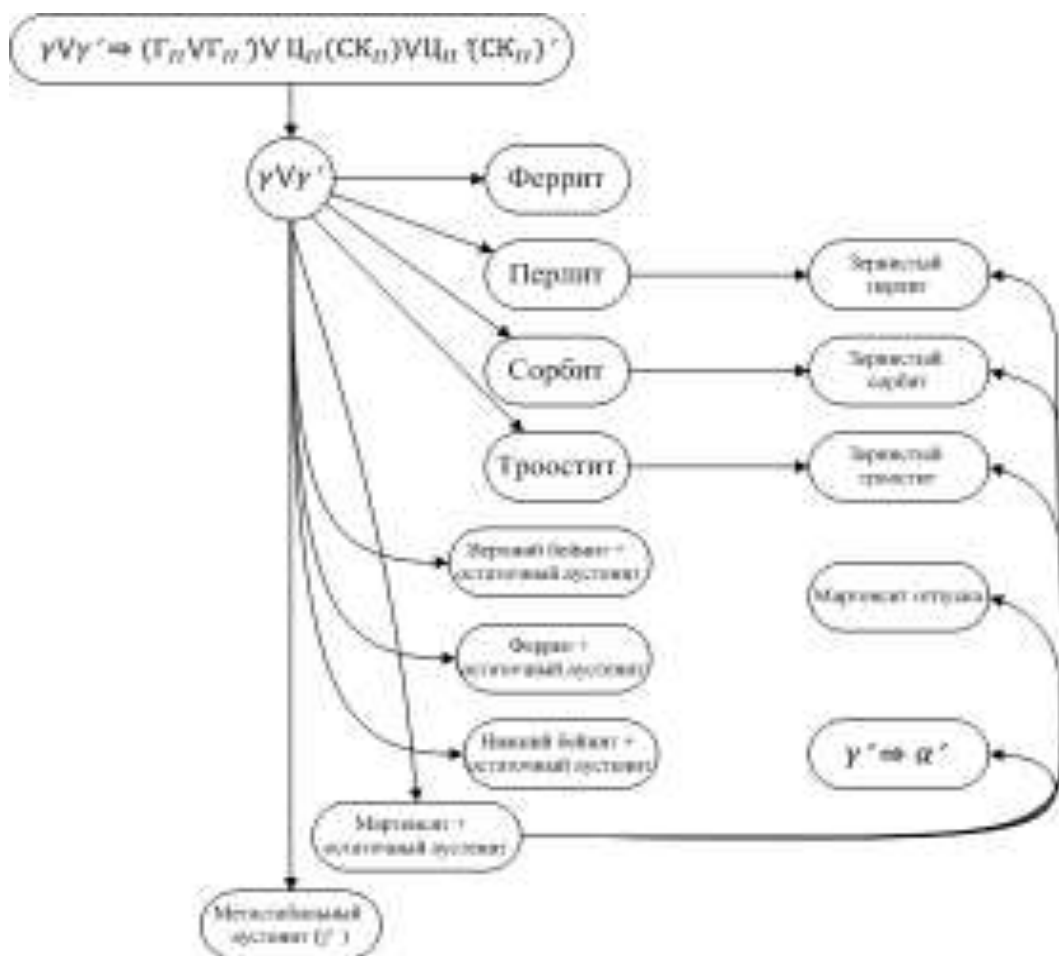


Рис. 4. Орграф развития процессов вторичного структурообразования в чугунах

Конечная металлическая матрица чугуна определяется фазовыми превращениями, происходящими в твердом состоянии, которые, в свою очередь, зависят от свойств и состояния аустенита. Основными процессами воздействия на данном этапе структурообразования являются легирование и изменяемые термокинетические условия охлаждения отливок или изделий при термической обработке. Легирующие элементы оказывают существенное воздействие на свойства аустенита, к которым, прежде всего, относится его устойчивость при полиморфном превращении. Аустенит в чугунах редко является конечной структурой, поэтому большую роль в процессах структурообразования играет механизм его распада.

На основании анализа различных механизмов распада аустенита приходим к выводу, что значительную роль, наряду с диффузией, играет строение аустенита в период, предшествующий $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращению. Исходя из теоретических данных о строении аустенита, оно может быть либо однородным (гомогенным (γ)) или неоднородным (гетерогенным (γ')). В реальных чугунах гомогенное строение аустенита никогда не наблюдается, в структуре всегда присутствуют химические неоднородности и кристаллические дефекты. Различные химические элементы по-разному воздействуют на углерод, растворенный в аустените. Часть из них, в частности, Si, повышает термодинамическую активность, и углерод стремится покинуть сегрегационные зоны, насыщенные этим элементом. Другие элементы, такие как хром, ванадий, марганец, снижают термодинамическую активность углерода. Ликвационные механизмы, которые являются причиной химической сегрегации, развиваются в ходе кристаллизации и определяют строение исходного аустенита.

Экспериментальная часть

Особенности бейнитного превращения, протекающего при регулируемом охлаждении чугуна из литого состояния, изучены в настоящее время недостаточно. Предложенный подход позволяет оценить влияние на превращение таких факторов, как структура «первичного» аустенита и его химическая неоднородность. Были проведены исследования возможности получения бейнитных структур в нелегированных чугунах при регулируемом охлаждении непосредственно из литого состояния.

Чугун выплавляли в индукционной электропечи промышленной частоты ЛПЗ-67 с кислой футеровкой. Шихта состояла из 50 % передельного чугуна ПЛ-1 и 50 % стали Ст2. Науглероживание расплава проводили графитизированным коксиком. После расплавления чугун перегревали до 1500 – 1520 °С, выдерживали 5 мин и затем, при 1460 – 1480 °С, сливали в 25 кг ковш, где обрабатывали ферросилицием ФС75. После модифицирования с поверхности расплава удаляли шлак и затем переливали в предварительно подогретые до 350 °С графитовые тигли. Время выдержки в графитовых тиглях перед заливкой расплава в сухие песчано-глинистые формы составило 1,5 мин. Температура заливки 1390 – 1400 °С. Для последующих микроструктурных исследований получали цилиндрические образцы диаметром 18 мм и высотой 200 мм.

Часть образцов выбивали из форм при температуре 920 – 950 °С и подвергали изотермической закалке в расплаве олова при 300 – 320 °С с выдержкой 60 мин. В закалочную ванну образцы погружали лишь частично – на глубину 50 мм при общей длине 200 мм. Последующее охлаждение проводили на воздухе. На закаленных образцах измеряли твердость в различных зонах.

Химический состав чугуна, % мас.: 2,8 – 3,1 C; 2,1 – 2,4 Si; 0,25 – 0,28 Mn; 0,055 – 0,06 P; 0,015 – 0,018 S; ~ 0,05 Cu, Fe – остальное.

Контроль температуры расплава проводили термопарой ПР 10/0, температуру выбивки образцов – термопарами ХА с выводом на потенциометры КСП-4.

Образцы, охлажденные в форме, имели ярко выраженную дендритную структуру с междендритным расположением мелкодисперсного эвтектического графита (рис. 5, а). Травление выявило перлитную сетку (рис. 5, б), которая образовалась в периферийных участках эвтектических колоний по причине микроликвации кремния, а также в осевых зонах дендритов первичного аустенита, что связано с прямой дендритной ликвацией кремния. Таким образом, в исследованных чугунах наблюдается двойная (или так называемая смешанная) ликвация кремния.

Микроструктуры чугуна в различных зонах образцов, подвергшихся ранней выбивке с последующей изотермической закалкой, представлены на рис. 5 в - е.

Поверхностная зона изотермически закаленной части имеет мелкоигольчатую структуру аусферрита (рис 5, в), что объясняется возникновением в начальный период кристаллизации мелких равноосных зерен аустенита, обогащенных в результате смешанной ликвации кремнием. Твердость этой части 352 НВ. Зона имеет протяженность 1 – 2 мм. Наиболее явно такая структура выявлена в торцевой части образца.

Часть образца, которая была погружена в закалочную ванну, имела структуру верхнего бейнита (рис. 5, г) и твердость 320 НВ. В структуре осевой закаленной зоны, по сравнению с поверхностной, отмечается увеличение количества остаточного аустенита, стабилизировавшегося при изотермической выдержке. Повышение количества остаточного аустенита связано с увеличением в центральных зонах образцов содержания углерода в результате зональной ликвации.

В микроструктуре закаленной части образцов наблюдается определенная закономерность расположения бейнита (рис. 5, в, г), что обусловлено кристаллографической ориентацией $(111)_{\gamma} \parallel (011)_{\alpha}$, $[11\bar{2}]_{\gamma} \parallel [011]_{\alpha}$, установленной Нишиямой для бейнитного превращения в сталях [10]. Наиболее явно выявленное ориентационное соотношение прослеживается в дендритах аустенита, где кристаллическая решетка близка к структуре монокристаллов.

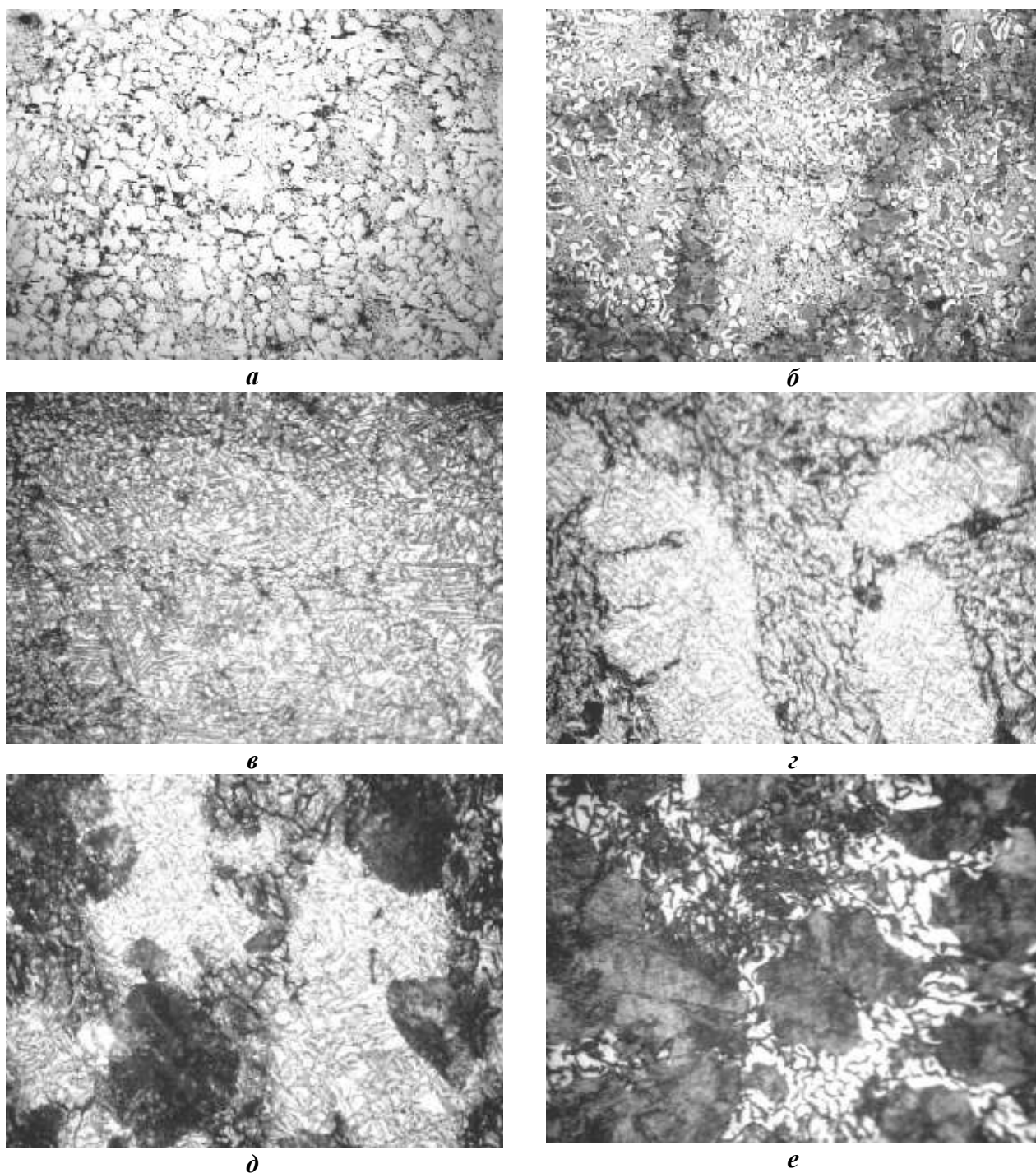


Рис. 5. Микроструктура чугуна:

a – б – в образцах, охлажденных в форме до комнатных температур: *a* - дендриты аустенита и междендритный графит (шлиф не травлен); *б* - перлитная сетка (травление 4%-ным спиртовым раствором азотной кислоты), $\times 80$; *в – е* – в образцах, подвергнутых изотермической закалке из литого состояния: *a* - поверхность образца; *б* - изотермически закаленная часть образца; *в, г* - переходная часть (уровень погружения образца в оловянную ванну); *д* - незакаленная часть образца (травление 4%-ным спиртовым раствором азотной кислоты), $\times 1000$

Так как образцы были погружены в закалочную ванну частично, на границе погружения возникла переходная структура из троостита и верхнего бейнита (рис. 5, *д*). Твердость граничной зоны около 300 НВ. По мере удаления от границы в сторону незакаленной части возрастает количество и размер сферолитов троостита (рис. 5, *е*). Трооститная структура по мере удаления от поверхности оловянной ванны сменяется сорбитной. Твердость в этой части образцов 280...250 НВ.

Результаты

На основании результатов данных исследований был разработан способ получения требуемых структур металлических матриц в графитизированных чугунах из литого состояния с использованием совмещенного процесса охлаждения и изотермической закалки при определенных температурах.

Известно, что ферритную или перлитную структуру металлической матрицы можно получить из литого состояния за счет варьирования основных химических компонентов чугуна, бейнитную (зернистую) структуру из литого состояния можно получить только при легировании специальными элементами (Ni, Mo, Cu). Поэтому задачей экспериментальной проверки способа являлось получение бейнитных структур в экономнолегированных чугунах непосредственно из литого состояния за счет регулирования скорости охлаждения с применением технологии «горячей» выбивки и последующей изотермической закалки.

На способ был получен патент [11]. Разработанный способ обеспечивает в изделиях простой конфигурации из графитизированных чугунов ранее заданные структуры. Внедрение этого процесса в производство позволит значительно сэкономить материальные средства за счет сокращения расходов на дополнительное легирование и термообработку и снизить себестоимость годных отливок.

Указанная цель достигается тем, что чугун из железоуглеродистой шихты выплавляют в электропечи, расплав при сливе в ковш модифицируют магнийсодержащими лигатурами для получения в отливках графитных включений шаровидной формы. Отливки получают в песчаные, металлические или керамические формы. Отливки извлекают из литейных форм при температуре выше эвтектоидного превращения – 900-1000 °С и быстро, в течение 5 - 15 с, перемещают в жидкую ванну с температурой, определяемой требуемым типом структуры. Рекомендуемые интервалы температур для получения в отливках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом различных структур металлической матрицы. Каждой структуре металлической матрицы соответствует рекомендуемая температура закалочной среды (табл. 2).

Таблица 2

Температуры изотермических выдержек, соответствующие заданным структурам металлической матрицы

Заданная структура металлической матрицы	Температура изотермической выдержки, °С
Ферритная	750-850
Перлитная	650-740
Сорбитная	550-640
Трооститная	350-440
Верхнебейнитная	450-540
Нижнебейнитная	290-340

Варьируя температуру закалочной среды, можно получать широкий диапазон структур металлических матриц в отливках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом. При этом получается однородная структура по сечению изделия.

При использовании данного подхода был разработан технологический процесс получения половинчатого легированного (3 % Ni, 1 % Mo) чугуна с аусферритной структурой непосредственно из литого состояния. На первом этапе (кристаллизации) формируется половинчатая структура, состоящая из карбидов и графитовых включений шаровидной формы. Второй этап заключается в изотермической закалке, которая обеспечивает получение в структуре чугуна аусферритной металлической матрицы. Регулируя на отдельных этапах соотношение структурных составляющих в отливке или в локальных частях изделий, можно гарантировать заданный уровень свойств чугуна.

На основании проведенных исследований был получен патент на способ получения изделий из половинчатого чугуна с шаровидным графитом и аустенитно-бейнитной структурой [12].

Выводы

1. Основанный на использовании теории графов анализ позволил выявить точки бифуркации, воздействуя на которые можно эффективно управлять процессами структурообразования и обеспечивать получения требуемых структур непосредственно из литого состояния.

2. Проведенные экспериментальные работы показали, что использование комбинированных процессов охлаждения отливки и их термической обработки позволяют получать требуемые структуры непосредственно из литого состояния.

3. Разработаны способы получения требуемых структур в графитизированных чугунах непосредственно из литого состояния. На способы получены патенты РФ.

Библиографический список

1. Машиностроение: энциклопедия: в 2 т. / Г.Г. Мухин [и др.]; под общ. ред. О.А. Банных, Н.Н. Александрова. – М.: Машиностроение. – Стали. Чугуны, 2001. – 784 с.
2. Чугун: справочник / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Metallurgy, 1991. – 576 с.
3. **Хадари, Ф.** Теория графов / Ф. Хадари. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 296 с.
4. Справочник по чугунному литью / под ред. Н.Г. Гиршовича. – Л.: Машиностроение. Ленинградское отд-ние, 1978. – 758 с.
5. Теоретические основы системного анализа / В.И. Новосельцев, Б.В. Тарасов, В.К. Голиков, Б.Е. Демин; под ред. В.И. Новосельцева. – М.: Майор, 2006. – 592 с.
6. **Скуднов, В.А.** Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушениях: учеб. пособие / В.А. Скуднов; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – 198 с.
7. **Сильман, Г.И.** Термодинамика и термокинетика структурообразования в чугунах и сталях / Г.И. Сильман. – М.: Машиностроение, 2007. – 302 с.
8. **Макаренко, К.В.** Моделирование процесса кристаллизации чугуна с шаровидным графитом // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 11. С.16–20.
9. **Сильман, Г.И.** О некоторых особенностях формирования эвтектических структур в чугунах / Г.И. Сильман, К.В. Макаренко // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 7. С. 26–30.
10. **Курдюмов, Г.В.** Превращения в железе и сталях / Г.В. Курдюмов, Л.М. Утевский, Р.И. Энтин. – М.: Наука, 1977. – 238 с.
11. **Пат. № 2196835 РФ, МКИ С21 D5/02, 1/20, В22 D27/04.** Способ получения различной структуры металлической матрицы в заготовках из высокопрочного чугуна с шаровидным графитом из литого состояния/. Макаренко К.В, Кульбовский И.К.; заявл. 13.07.2000; опубл. 20.01.2003 Бюл. № 2.
12. **Пат. № 2250268 РФ, МКИ С 21 С 1/10, С 22 С 37/04, С 21 D 5/00.** Способ получения отливок из половинчатого чугуна с аустенитно-бейнитной структурой / Макаренко К.В.; заявл. 24.07.2003; опубл. 20.04.2005 Бюл. № 11.

*Дата поступления
в редакцию: 01.03.2014*

K.V. Makarenko

RATIONAL STRUCTURING OF CAST IRONS

Bryansk, state technical university

Purpose: To develop methods rational structuring of cast iron for products with desired properties of cast condition and its application to meet the challenge of a given structure directly from the cast state.

Design/methodology/approach: The methods are based on the theory of graphs and identify bifurcation points in nonequilibrium systems. With this methodology transformation in cast iron treated as a change of events in a thermodynamic system. Purposefully acting in bifurcation points on cast iron can manage the processes of structure formation.

Findings: The methods of preparation given structures of cast irons in the cast state.

Research limitations/implications: Developed method can be used to management the structuring in graphitized cast irons.

Originality/value: On methods developed by patents.

Key words: structuring, cast iron, management, graphite, metalik matrix, controlled cooling.

УДК 669.112.227.1+ 669.112.227.342:669.15-194.55

И.Д. Романов, А.А. Шацов, М.Г. Закирова

СТРУКТУРА И СВОЙСТВА НИЗКОУГЛЕРОДИСТОЙ МАРТЕНСИТНОЙ СТАЛИ, ЗАКАЛЕННОЙ С КОВОЧНОГО НАГРЕВА

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

Исследовали влияние технологических параметров горячей деформации низкоуглеродистой мартенситной стали (НМС) 15X2Г2НМФБА на формирование структуры и свойства. Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в НМС позволяет проводить закалку без использования жидких охлаждающих сред (на воздухе). Закалка горячедеформированных НМС со скоростями меньшими, чем скорость охлаждения на воздухе ранее не изучена. В настоящей работе представлены результаты исследования влияния различных температур нагрева под ковку и скоростей охлаждения при закалке НМС с температур конца горячей деформации на структуру и свойства.

Ключевые слова: закалка с деформационного нагрева, мартенситное превращение, мартенсит, аустенит, мартенситная сталь

Введение

Режимы горячей обработки давлением сталей, совмещенные с упрочняющей термической обработкой, в основном определяются температурой аустенитизации, степенью, скоростью деформации и скоростью охлаждения после окончания деформации. Эти параметры влияют на формирование микро- и тонкой структуры и, как следствие, на комплекс механических свойств материала. В процессе горячей деформации в структуре сталей протекают процессы наклепа и рекристаллизации. Вклад каждого из этих процессов в формирование конечной структуры зависит от параметров предшествующей обработки. Закалка с температур конца горячей деформации сталей с ограниченной прокаливаемостью (типа 12Х2НМФ, 35Х2Н2М, 40ХН) осложняется, поскольку вследствие широкого температурно-деформационного интервала и низкой устойчивости аустенита образуется гетерогенная структура с большой степенью разнородности, что является причиной нестабильности механических свойств. Это делает нецелесообразным реализацию закалки с температур конца горячей обработки давлением.

В производстве термоупрочненных заготовок широко применяется высокотемпературная термомеханическая обработка (ВТМО). Термомеханическую обработку следует понимать как совокупность операций деформации, нагрева и охлаждения (в различной последовательности), в результате которых формирование окончательной структуры металлического сплава, а следовательно, и его свойств происходит в условиях повышенной плотности и соответствующего распределения несовершенств строения, созданных пластической деформацией [1].

Низкоуглеродистые мартенситные стали (НМС) обладают высокой устойчивостью переохлажденного аустенита как в области нормального, так и промежуточного превращения [2]. После закалки (в том числе на спокойном воздухе) НМС обладают структурой низкоуглеродистого пакетного мартенсита, характерным элементом структуры которого являются рейки, разориентировка которых не превышает трех градусов. У сталей со структурой пакетного мартенсита упрочнение от границ реек на 1-2 порядка выше, чем границ пакетов [3], имеющих большеугловые границы. Примерно 1/3 границ реек является проницаемой для дислокаций [4], что способствует релаксации напряжений в ходе деформации, их равномерному распределению и, следовательно, повышению вязкости и конструкционной прочности. Высокая устойчивость переохлажденного аустенита в НМС позволяет совмещение горячей пластической деформации с закалкой. Охлаждение НМС на воздухе непосредственно с температуры конца горячей деформации обеспечивает высокий комплекс механических свойств

($\sigma_{\text{в}} \geq 1300$ МПа; $KCV \geq 1,20$ МДж/м²) [5]. Скорость охлаждения с температуры конца горячей деформации представляет особый интерес для производства крупногабаритных изделий, в конструкции которых присутствуют сечения различной величины.

Цель работы – исследование влияния температуры нагрева под горячую деформацию и скорости охлаждения с температуры конца горячей деформации на структуру и характеристики механических свойств низкоуглеродистой мартенситной стали 15Х2Г2НМФБА (С - 0,154%, Si - 0,26%, Mn - 2,0%, Cr - 2,1%, Ni - 1,2%, Mo - 0,43, V - 0,09%, Nb - 0,07%, Cu - 0,19%, Al - 0,014%, Ca - 0,0006%, N - 0,0123%, O - 0,0012%, P - 0,009%, S - 0,007%, H - 1,3 ppm).

Методика эксперимента

Деформации подвергали сталь со структурой отпущенного мартенсита, закаленную на воздухе с прокатного нагрева (1200°C) и отпущенную при температуре 660°C в течение шести часов (рис. 1).

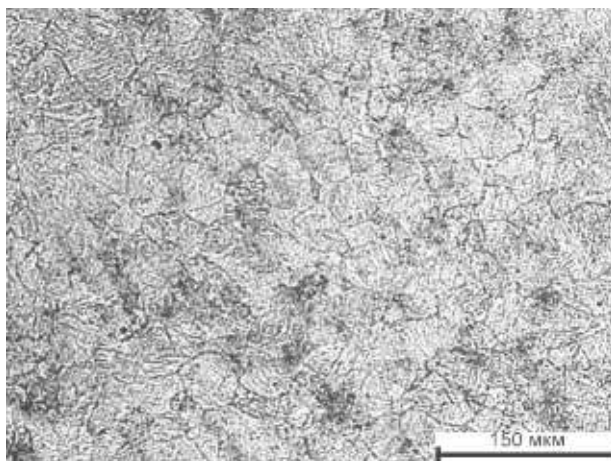


Рис. 1. Исходная структура исследуемой стали. x200
Средний размер зерна 45 мкм. (6 номер ГОСТ 5639-82)

Ковку заготовок проводили на радиально-ковочной машине SXP-16, производства австрийской фирмы GFM. Заготовки нагревали в индукционной установке до двух разных температур: 1150°C и 1000°C, после чего проводили горячую деформацию с последующей закалкой на воздухе.

Для изучения влияния скорости охлаждения на структуру и свойства НМС заготовки нагревали до 1150°C. Степень деформации составила 70% (исходный диаметр 55 мм, конечный диаметр 30 мм). Последеформационное охлаждение проводили в трех различных средах – вода, воздух, печь (рис. 2).

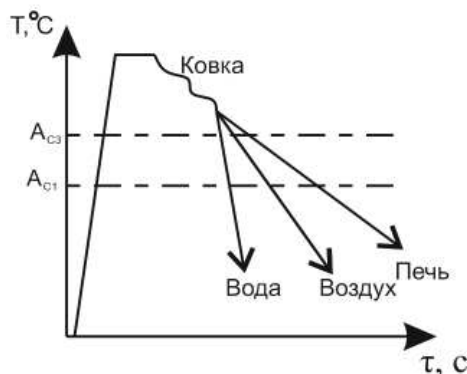


Рис. 2. Схема режимов обработки стали
Экспериментальная часть

Структура речного мартенсита, формирующаяся после закалки НМС 15Х2Г2НМФБА, представляет собой набор параллельных друг другу кристаллов, имеющих форму трехосного эллипсоида с соотношением ширины к толщине и к длине как 1:3:15 [6], $a:b:c = 1:7:30$ [7], $a:b:c = 1:9:33$ [8], рис. 3.

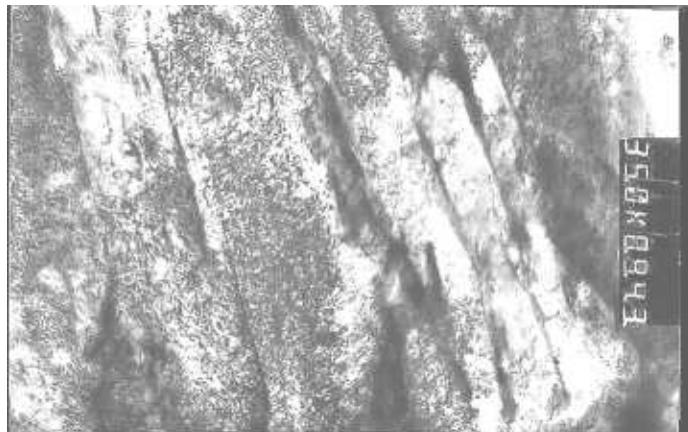


Рис.3. Тонкая структура НМС, x35000

Температурный интервал ковки заметно влияет на комплекс характеристик механических свойств, табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства в зависимости от температуры нагрева под ковку

Интервал ковки		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ⁺²⁰ МДж/м ²
T_H^0 , °С	T_K^0 , °С					
1150	850	1010	1357	18	65	1,16
1000	800	978	1297	17	66	1,30

Примечание. Исходный диаметр $D_{исх}=65$ мм, окончательный диаметр $D_{кон}=30$ мм, уков 4,7, степень деформации $\varepsilon = 79\%$, охлаждение на воздухе

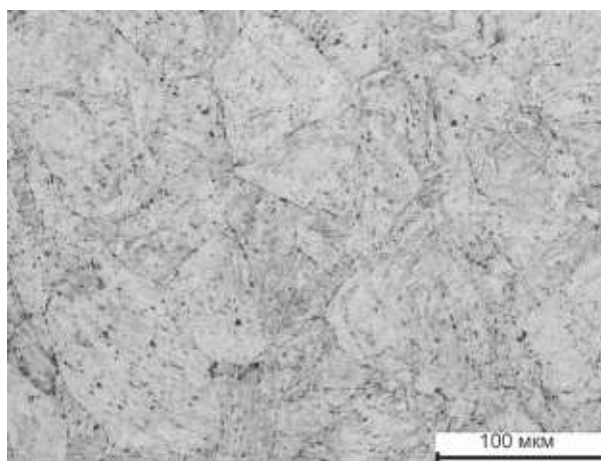


Рис. 4. Микроструктура образца после ковки в интервале температур 1150-850°C, x200

Характеристики прочности (предел текучести, предел прочности) незначительно выше после ковки с температуры 1150°C. Относительное удлинение немного выше у образцов кованных с температуры 1000°C, относительное сужение образцов кованных с разных темпера-

тур слабо отличаются. Значения ударной вязкости выше у образцов кованных с более низкой температуры, что связано с меньшим размером действительных зерен аустенита.

Средний размер действительного зерна аустенита, рис. 4, послековки со степенью деформации 79% в интервале температур 1150-850°C и охлаждения на воздухе составляет 38 мкм.

Средний размер действительного зерна аустенита послековки со степенью деформации 79% в интервале температур 1000-800°C и охлаждения на воздухе составляет 15 мкм.

Распределения по размерам зёрен аустенита НМС 15Х2Г2НМФБА для различных температур нагрева под ковку представлены на рис. 5.

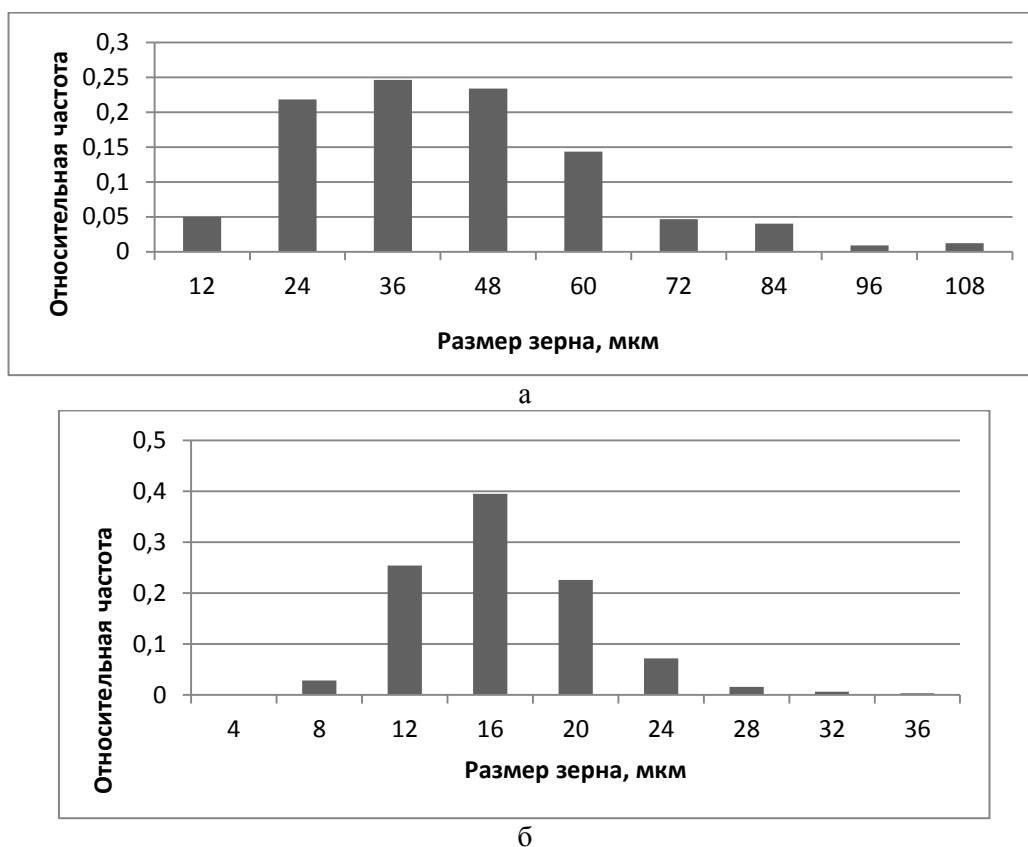


Рис. 5. Распределения по размерам зерен стали 15Х2Г2НМФБА:

а – температура нагрева под ковку 1150°C; б – температура нагрева под ковку 1000°C

Независимо от температуры нагрева (1150°C или 1000°C) распределение размеров зерен было одномодальным с правой асимметрией и подчинялось логнормальному закону. Степень разнотерности послековки с температуры 1150°C составляет $R = 3,75$ и уменьшается с понижением температуры нагрева под ковку до $R = 2,33$ (1000°C).

Послековки при температуре 1000°C формируется зерно более мелкое, чем послековки при температуре 1150°C, однако предпочтительной температурой нагрева под ковку является температура 1150°C, поскольку при более низких температурахковки сталь менее технологична. Согласно [9], предел прочности конструкционной стали с содержанием углерода 0,18% при температуре 1000°C составляет порядка 50 МПа, и при снижении температуры ниже 800°C (температура концаковки) предел прочности увеличивается более чем в 10 раз. Увеличение прочности обуславливает повышенный износ инструмента и увеличивает вероятность образования трещин во времяковки.

Скорость охлаждения послековки существенно повлияла на механические свойства заготовок, табл. 2.

Таблица 2

Влияние скорости охлаждения послековки на механические свойства

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °/с	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	ψ , %	KCV ⁺²⁰ , МДж/м ²
Вода/90	1131	1424	16	62	0,80
Воздух/1,5	1015	1338	17,2	65	0,83
Печь/0,015	950	1284	18	59	1,23

С уменьшением скорости охлаждения заготовок послековки наблюдается падение прочностных характеристик, так разница между пределом прочности после охлаждения в воде и пределом прочности после охлаждения с печью составляет всего 140 МПа, в то время как ударная вязкость, определенная на образцах с V-образным концентратором, увеличивается на 0,43 МДж/м² (в 1,5 раза). Причина роста ударной вязкости – уменьшение размера зерна аустенита, табл. 3, и диспергирование формирующихся в пределах зерен аустенита пакетов и реек мартенсита.

Таблица 3

Зависимость величины зерна от скорости охлаждения.

Среда охлаждения/скорость охлаждения, °/с	Средний диаметр зерна, мкм
Вода/90	39
Воздух/1,5	34
Печь/0,015	17

Микроструктура пакетного мартенсита заготовок, охлажденных послековки с различными скоростями, представлена на рис. 6–8.

Как видно из табл. 3 и рис. 6–8, с уменьшением скорости охлаждения происходит измельчение зеренной структуры материала. Так, после охлаждения с печью размер зерна составил 17 мкм. Измельчение зеренной структуры при медленном охлаждении, по-видимому, связано с протеканием процессов рекристаллизации в широких температурных интервалах, которые были подавлены в случае охлаждения заготовки после горячей деформации в воде и на воздухе.

Высокая прочность в сочетании с высокой ударной вязкостью в широком интервале скоростей охлаждения обусловлены особенностями структуры реечного мартенсита и отсутствием продуктов промежуточного превращения благодаря повышенной устойчивости переохлажденного аустенита НМС.

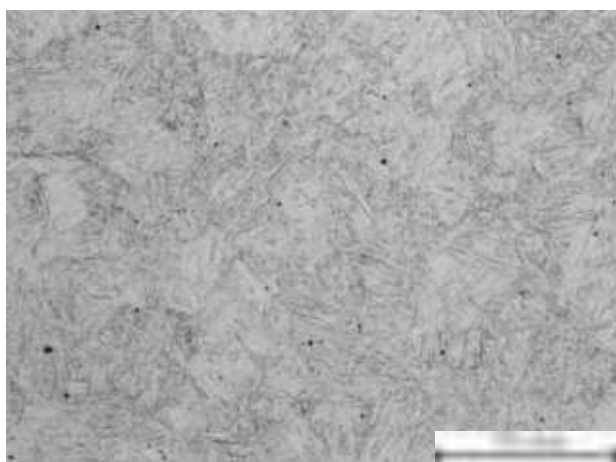


Рис. 6. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в воде, x200

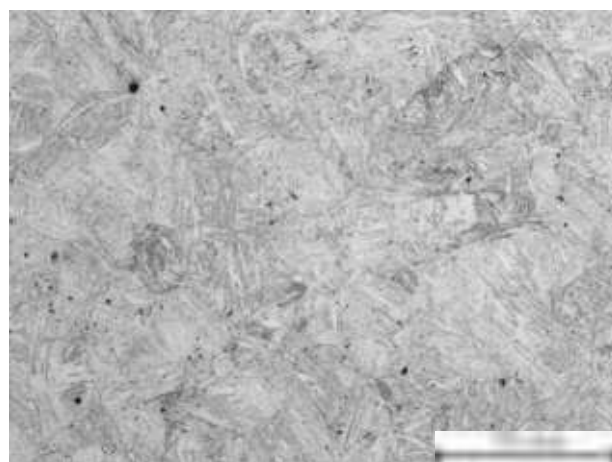


Рис. 7. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации на воздухе, x200

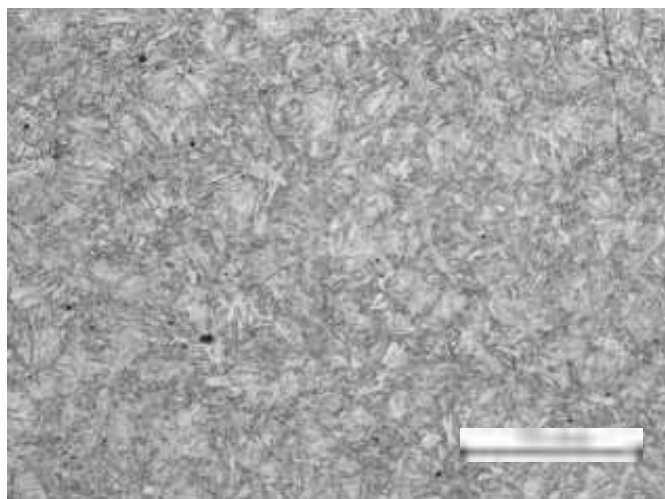


Рис. 8. Микроструктура стали 15X2Г2НМФБА после охлаждения с температуры конца горячей деформации в печи, $\times 200$

Выводы

Деформированные с $\varepsilon=70\%$ заготовки, закаленные с различными скоростями охлаждения на структуру пакетного мартенсита, имели прочность до 1420 МПа, а ударная вязкость до $KCV = 1,20$ МДж/м².

Распределение зерен по размерам после закалки с ковочного нагрева во всех исследованных режимах подчинялось логарифмически нормальному закону.

Охлажденная с ковочного нагрева с печью НМС 15X2Г2НМФБА имела наиболее дисперсные характерные элементы структуры и лучшее сочетание характеристик прочности, пластичности и ударной вязкости.

Библиографический список

1. **Бернштейн, М.Л.** Термомеханическая обработка стали / М.Л. Бернштейн, В.А. Займовский, Л.М. Капуткина. – М.: Metallurgy, 1983. – 480 с.
2. **Клейнер, Л.М.** Конструкционные высокопрочные низкоуглеродистые стали мартенситного класса / Л.М. Клейнер, А.А. Шацов. – Пермь: Перм. гос. тех. ун-т, 2008. – 303 с.
3. **Штремель, М.А.** Прочность сплавов. Часть II. Деформация / М.А. Штремель. – М.: МИСИС, 1997. – 527 с.
4. **Андреев, Ю.Г.** Границы и субграницы в пакетном мартенсите. I. Границы между кристаллами в пакете / Андреев, Е.И. Заркова, М.А. Штремель // Физика металлов и материаловедение. 1990. Т. 69. № 3. С 161–167.
5. **Романов, И.Д.** Структура и свойства низкоуглеродистых мартенситных наносталей, закаленных с деформационного нагрева / И.Д. Романов, Л.М. Клейнер // Материаловедение. 2013. №5. С. 18–21.
6. **Андреев, Ю.Г.** Упаковка кристаллов мартенсита в псевдомонотекстуре / Ю.Г. Андреев [и др.] // ДАН СССР. 1977. Т. 237. Вып. 3. С. 574–576.
7. **Изотов, В.И.** Морфология и кристаллометрия реального мартенсита // Физика металлов и материаловедение. 1972. Т. 34. № 1. С. 123–132.
8. **Wakasa, K.** The crystallography and morphology of lath martensite / K. Wakasa, C.M. Wayman // Proc. Int. Conf. Martensite Transformations, ICOMAT-79, Cambridge, Mass, 1979. V. 1. P.3 4–39.
9. **Третьяков, А.В.** Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением / А.В. Третьяков, В.И. Зюзин. – 2-е изд. – М.: Metallurgy, 1973. – 224 с.

Дата поступления
в редакцию 01.04.2014

I.D. Romanov, A.A. Shatsov, M.G. Zakirova

**STRUCTURE AND PROPERTIES OF LOW-CARBON MARTENSITIC STEEL
HARDENED FROM FORGING HEATING**

Perm national research polytechnic university

The influence of technological conditions of hot deformation of low-carbon martensitic steel (LMS) 15Cr2Mn2NiMoVNb on structure formation and properties was investigated. Quenching of LMS can be carried out in air due to high stability of undercooled austenite. Quenching of LMS by cooling with speeds lower than the speed of the air cooling has not been studied previously. This work shows the results of a research dedicated to the effect of different cooling rates during quenching LMS from the end of the hot deformation temperature on structure and properties.

Key words: quenching from deformation heating, martensitic transformation, martensite, austenite, martensitic steel.

УДК 669-412.54-162.001.5

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков, А.В. Титов

**ФОРМИРОВАНИЕ РАЗНООРИЕНТИРОВАННОЙ СТРУКТУРЫ
В СТАЛЬНОМ СЛИТКЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований, предложен механизм, связывающий формирование зоны разноориентированных кристаллов и осевой V-образной неоднородности с конвективным движением затвердевающего расплава.

Ключевые слова: стальной слиток, конвекция, зона разноориентированных кристаллов, осевая V-образная неоднородность.

На основании существующих макрофизических теорий кристаллизации, а также данных собственных исследований, нами предлагается механизм образования разноориентированной структуры в центральных объёмах стального слитка спокойной стали. Данный механизм учитывает наличие сил, возникающих вследствие усадочного и конвективного перемещений расплава в двухфазной зоне.

По мере формирования зон «замороженных» и столбчатых кристаллов, из-за увеличения теплового сопротивления затвердевающей корки, охлаждения внутренних объемов расплава и нагрева изложницы, температурный градиент перед фронтом затвердевания и соответственно скорость нисходящего конвективного потока в расплаве уменьшаются. Течение вдоль поверхности охлаждения переходит из турбулентного режима в ламинарный, что подтверждается результатами исследований с помощью радиоактивных изотопов – скорость нисходящих потоков через некоторое время от начала затвердевания слитка снижается почти до нулевых значений [1].

Перенос примесей от фронта кристаллизации в расплав происходит только за счет молекулярной диффузии и интенсивность его в жидкой фазе в значительной мере снижается. Это приводит к повышению концентрации примесей в ликвационном слое на поверхности растущих столбчатых кристаллов и снижению температуры ликвидуса в нем – по терминологии, введенной А.Оно, на фронте затвердевания проявляется концентрационная депрессия термического переохлаждения (КДТП) [2]. «Область жидкой фазы оказывается изолированной от твёрдой фазы слоем повышенной концентрации примесей ...» [3].

В этом слое переохлаждение ($\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}}$) не достигает величины, необходимой для зарождения новых кристаллов, но остаётся достаточным для роста столбчатых дендритов:

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} < \Delta T_{\text{з.кр}}, \quad (1)$$

где $\Delta T_{\text{р.к}}$ и $\Delta T_{\text{з.кр}}$ – величины переохлаждения, достаточные для роста и для гетерогенного зарождения кристаллов.

За зоной КДТП выполняется условие:

$$\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} > \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (2)$$

Термическое переохлаждение расплава достигает величин, необходимых для зарождения кристаллов на имеющихся активных примесях.

Одновременное выполнение условий (1) и (2) показывает, что на границе столбчатых кристаллов формируется переходная зона, где формы дендритов (столбчатых и разноориентированных) могут соседствовать.

Отвод теплоты кристаллизации от зарождающихся и растущих изолированных кристаллов к твердой фазе происходит теперь через пристенный слой расплава, повышая градиент температуры в нем и препятствуя расширению жидко-твердой зоны. Развитие последней начинается с более охлажденных придонных объемов, постепенно распространяясь вверх.

В поперечном сечении жидко-твёрдой фазы в пристенной области на изолированные кристаллы действуют силы, возникающие вследствие усадочных перемещений расплава $F_{\text{ус.к}}$ и динамического давления $F_{\text{к}}$ со стороны нисходящего вдоль вертикального фронта затвердевания потока.

Силы $F_{\text{ус.к}}$ направлены к поверхности охлаждения и определяются как [4]:

$$F_{\text{ус.к}} = - \int_0^{V_{\text{к}}} \text{grad } P_{\text{ус.к}} dV_{\text{к}},$$

где $\text{grad } P_{\text{ус.к}} = \gamma v_x dv_x/dx$ – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объёма при фазовом переходе; γ – плотность жидкости; v_x – скорость усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания; $V_{\text{к}}$ – объём кристалла

Перед фронтом твердо-жидкой фазы (за зоной КДТП) переохлаждение расплава и его плотность максимальны. Соответственно максимум скорости нисходящего ламинарного конвективного потока ($v_{\text{п}}$) располагается за ликвационным слоем на незначительном расстоянии от границы раздела двухфазной зоны, определяемом её шероховатостью и вязкостью расплава. Далее скорость движения жидкости падает до нуля на границе с восходящим потоком. Изолированные кристаллы, образовавшиеся в переохлажденной области, погружаются в жидкости в связи с повышенной плотностью ($v_{\text{к}} > v_{\text{п}}$), причем скорость погружения увеличивается по мере удаления от фронта кристаллизации, так как менее переохлажденная жидкость имеет пониженную вязкость. Профиль величин скорости движения кристаллов относительного перемещающегося расплава имеет максимумы на линиях нулевых скоростей конвекции и минимум по линии максимальной скорости потока (рис. 1).

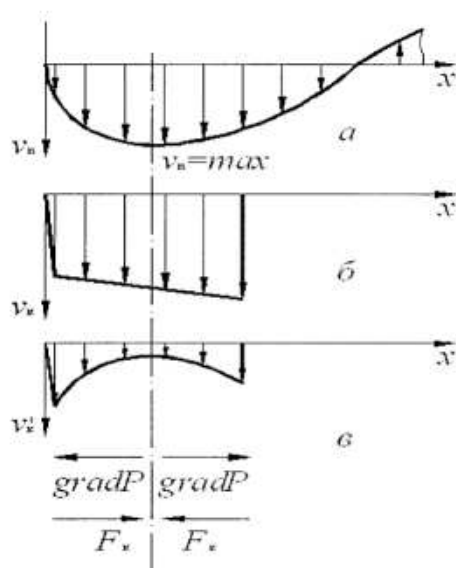


Рис. 1. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на изолированные кристаллы:

$v_{\text{п}}$ – скорость потока расплава;
 $v_{\text{к}}$ – скорость движения кристалла в потоке расплава;
 $v'_{\text{к}}$ – скорость движения кристалла относительно расплава ($v'_{\text{к}} = v_{\text{к}} - v_{\text{п}}$)

Максимальное давление имеет место в зоне минимальной скорости. По сечению двухфазного потока возникает градиент давления ($\text{grad } P_{\text{к}}$) и силы перемещающие кристаллы ($F_{\text{к}}$):

$$\text{grad } P_{\text{к}} = \gamma v'_{\text{к}} dv'_{\text{к}}/dx; \quad F_{\text{к}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{к}} dV,$$

где $P_{\text{к}}$ – давление на изолированный кристалл со стороны нисходящего потока расплава; $v'_{\text{к}}$ – скорость движения изолированных кристаллов относительного перемещающегося расплава, ($v'_{\text{к}} = v_{\text{к}} - v_{\text{п}}$).

Силы $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$ имеют противоположное направление (до линии максимальных ско-

ростей потока) и скорость переноса изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой области определяется их соотношением.

Исключением является узкая пристенная область двухфазного потока (скорость потока на границе раздела фаз равна нулю). Здесь силы, действующие на кристаллы $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$ направлены.

Наличие градиента скоростей в двухфазном потоке, а также различные размеры и скорости погружения изолированных кристаллов, приведут к их многочисленным столкновениям. Однако ликвационный слой на поверхности их осей и выделение теплоты кристаллизации в окружающую жидкую фазу препятствуют коагуляции.

Движение изолированных кристаллов и их пробег вдоль вертикального фронта затвердевания определяются векторной суммой скоростей вдоль оси слитка и нормально ей.

Фиксация изолированных кристаллов на дендритном каркасе твердой фазы происходит за счет разности давлений: со стороны неподвижного фронта двухфазной зоны имеет место разрежение в межосных пространствах, вызванное усадкой, а со стороны оси слитка – металлостатическое давление. Это исключает смещение изолированных кристаллов по поверхности фронта твердо-жидкой фазы, способствует при их встрече с неподвижным дендритным каркасом разрушению ликвационного слоя на поверхности осей в зоне контакта и диффузионным процессам при их срастании. Закрепившиеся на границе твердо-жидкой зоны кристаллы продолжают укрупняться (теплоотвод идет через твердую фазу), причем рост осей предпочтителен вдоль изотерм. Это сглаживает границу раздела подвижной и неподвижной областей двухфазной зоны.

Скорость продвижения фронта твердо-жидкой зоны, наряду с теплоотводом, определяется частотой присоединения изолированных кристаллов, их размером и интенсивностью роста после присоединения. Две последние величины в значительной мере зависят от содержания ликвирующих примесей в расплаве.

По мере затвердевания слитка снижается теплоотвод от его поверхности. Это приводит к уменьшению скорости продвижения границы твердо-жидкой зоны, усадочных перемещений расплава и величин соответствующих сил $F_{\text{ус.к}}$. В то же время интенсивность движения двухфазного (суспензионного) потока определяется в основном содержанием в нем кристаллов и изменяется незначительно [1]. Поскольку в расплаве имеет место градиент температуры по высоте слитка, то доля твердой фазы в нисходящем потоке возрастает сверху вниз. Соответственно скорости двухфазного потока и величины сил давления на изолированные кристаллы по его сечению ($F_{\text{к}}$) будут возрастать сверху вниз, снижаясь в придонной области перед поворотом.

Формирование зоны разноориентированной структуры можно условно разделить на три периода.

Начальный период (продолжается в интервале времени от появления жидко-твёрдой области до начала осаждения изолированных кристаллов). Этот период характеризуется интенсивным теплоотводом от слитка и соответственно значительными усадочными перемещениями расплава ($F_{\text{ус.к}} > F_{\text{к}}$).

Все кристаллы из жидко-твердой зоны переносятся к фронту затвердевания, а их «пробег» вдоль этого фронта и влияние на скорость нисходящего конвективного потока незначительны. Присоединяясь к фронту затвердевания, они блокируют рост столбчатых кристаллов сначала на отдельных участках, а затем и по всему фронту твёрдой фазы – формируется переходная область.

В придонных объёмах слитка интенсивное охлаждение расплава через поддон, а также малые скорости конвекции и соответственно конвективной диффузии с поверхности столбчатых кристаллов приводят к раннему проявлению КДТП и жидко-твердой области (рис. 2, а). Следствием этого является меньшие, чем на боковых гранях слитка, протяженность зоны столбчатых дендритов и переходной области.

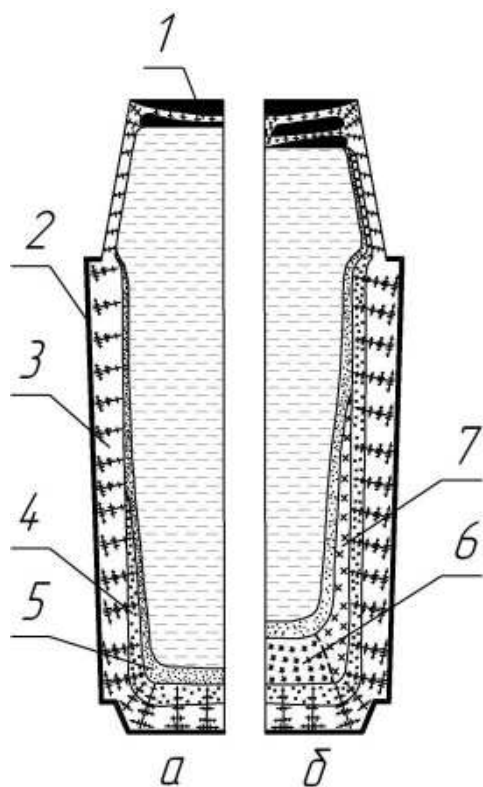


Рис. 2. Схема начального периода образования разноориентированной структуры:

а – начальный этап развития жидко-твёрдой области; *б* – формирование зоны смешанных кристаллов и обратной («заливочной») конусности границы раздела фаз; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разноориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания

Присоединение изолированных кристаллов, зарождающихся непосредственно перед донным (горизонтальным) фронтом кристаллизации, происходит под действием гравитации с минимальным пробегом, что ограничивает возможности их роста (рис. 2, *б*). Отвод теплоты кристаллизации происходит как в поддон, так и с восходящим, обратным двухфазному, потоком расплава, создавая благоприятные условия для зарождения изолированных кристаллов и одновременно для удаления выделяющихся из межосных пространств ликватов. Следствием этого процесса является обеднение придонных объемов углеродом, серой и фосфором. При этом понижение содержания ликвирующих элементов особенно значительно на некотором удалении от границы столбчатой зоны, где происходит снижение интенсивности теплоотвода и увеличение продолжительности роста изолированных кристаллов. Поскольку зарождение последних происходит на активных примесях, то мелкокристаллическое строение придонной структуры характеризуется повышенным содержанием первичных неметаллических включений на единицу объема.

На стыке вертикального и горизонтального фронтов кристаллизации имеет место наиболее сильный теплоотвод. В то же время сюда с конвективным потоком поступает расплав с повышенной температурой. Совокупность этих факторов создают условия для роста первых присоединившихся к фронту столбчатой структуры изолированных кристаллов и препятствуют зарождению новых. По внешнему периметру мелкокристаллической зоны формируется крупнокристаллическая, наличие которой отмечается в работе [5].

С течением времени жидко-твёрдая область распространяется в пристенном слое на всю высоту слитка.

В прибыльной надставке на мениске расплава теплоотвод излучением в окружающую среду приводит к образованию моста (рис. 2). В связи с постоянным опусканием уровня металла, жидко-твёрдая область под горизонтальным фронтом в головной части слитка в начальный период затвердевания не образуется. Разрежение, возникающее под мостом, приводит к его прогибу и, как правило, к прорыву. Температурный градиент перед вертикальным фронтом твердо-жидкой зоны, скорости продвижения последнего и конвекции, протяженность зоны термического переохлаждения расплава, объем зарождающихся изолированных кристаллов и усадочные перемещения расплава в прибыли минимальны. Это со-

здаёт благоприятные условия для медленного роста изолированных кристаллов после их присоединения к боковым стенкам.

В области теплового влияния прибыли поступающий сверху расплав с повышенной температурой обеспечивает максимальный по высоте тела слитка градиент температуры перед фронтом твердо-жидкой фазы. Ширина зоны термически переохлажденного расплава здесь мала. Незначительный объем зарождающихся изолированных кристаллов, несмотря на высокую скорость их переноса, приводит к низкой интенсивности продвижения границы твердо-жидкой области. Малая частота присоединения кристаллов не препятствует их росту на фронте раздела двухфазной зоны, вследствие чего формируется крупнокристаллическая разноориентированная структура.

На участке от зоны теплового влияния прибыли до придонных объемов усадочные перемещения расплава переносят все зарождающиеся кристаллы к фронту твердо-жидкой зоны с минимальным пробегом вдоль него. В результате формируется мелкокристаллическая (глобулярная) структура. На всей длине этого участка протяженность зон «замороженных» и столбчатых кристаллов по высоте слитка и тепловое сопротивление их слоя различаются незначительно, а скорость нисходящего потока увеличивается до максимума на некотором удалении от донного фронта, снижаясь перед поворотом.

В связи с тем, что распространение жидко-твёрдой зоны происходит снизу вверх, толщина слоя присоединенных к вертикальной границе твердой фазы изолированных кристаллов увеличивается в том же направлении. Развивается обратная конусность вертикального фронта затвердевания (рис. 2, б).

Таким образом, в рассмотренный период затвердевания продвижение горизонтального фронта твердой фазы происходит последовательно, не смотря на зарождение кристаллов в объеме расплава, и, весьма вероятно, близко к параболическому закону (по данным Б.Б.Гуляева, формула $\xi = k\sqrt{\tau}$ даёт удовлетворительное совпадение с фактическими данными в пределах первых $\frac{3}{4}$ радиуса слитка массой до 8т).

Период осаждения изолированных кристаллов (рис. 3). В этот период и в дальнейшем теплоотвод от слитка к изложнице определяется в основном тепловым сопротивлением затвердевшего слоя сплава.

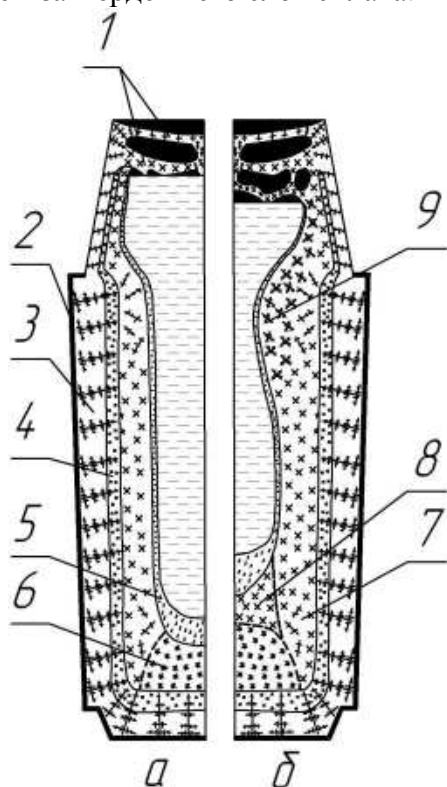


Рис. 3. Схема формирования структуры слитка в период осаждения изолированных кристаллов:
а – формирование разноориентированной структуры по всему фронту затвердевания; *б* – замыкание мелкокристаллической структурной зоны в донной части слитка осаждающимися кристаллами и опережающее продвижение фронта твёрдой фазы в верхней части изложницы; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разноориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания; 8 – зона осаждения кристаллов, зародившихся перед вертикальным фронтом затвердевания; 9 – опережающее продвижение твёрдой фазы в подприбыльной области слитка

Интенсивность усадочных перемещений расплава и соответственно скорость продвижения границы твердо-жидкой области уменьшаются. Состав расплава в этот период, по сравнению с исходным, обогащен ликвирующими элементами. Соотношение сил $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$ изменяется. Давление на изолированные кристаллы со стороны нисходящего потока расплава становится соизмеримо с давлением за счет его усадочных перемещений и тормозит их перенос к фронту твердой фазы.

При увеличении временного интервала нахождения в переохлажденном расплаве кристаллы укрупняются, выделяя теплоту кристаллизации. Их рост в объеме жидкой фазы энергетически предпочтителен зарождению новых. Эти факторы препятствуют развитию широкой жидко-твердой области, а также приводят к огрублению структуры. Одновременно, в связи с увеличением плотности суспензии по сравнению с расплавом в осевой части слитка, скорость течения образующегося двухфазного потока возрастает.

Преимущественный рост осей изолированных кристаллов в направлении теплоотода нарушает симметрию последних, приводит к смещению их центра тяжести и поворотам при погружении в расплаве. В результате, после присоединения к фронту твердой фазы, их главные оси, несмотря на наличие температурного градиента в радиальном направлении формирующегося слитка, не имеют четкой направленности («разноориентированы»).

В подприбыльной зоне в начале этого периода интенсивность зарождения изолированных кристаллов и частота их присоединения к границе твердо-жидкой области малы. В зоне теплового влияния прибыли рост кристаллов происходит в основном после присоединения их к дендритному каркасу.

Ниже зоны теплового влияния прибыли, в расширяющейся области переохлажденного расплава, идет активное зарождение изолированных кристаллов. По мере удаления от верха слитка скорость двухфазного потока возрастает, траектория перемещения кристаллов к границе твердо-жидкой зоны становится всё более пологой, продолжительность пребывания и роста кристаллов в двухфазном потоке возрастает.

На участке торможения двухфазного потока, скорость продвижения вертикальной границы твердо-жидкой зоны за счет присоединения оседающих кристаллов больше, чем в вышележащей области. При этом вдоль вертикального фронта происходит образование «вала» по внешнему контуру горизонтального фронта твердо-жидкой фазы. Внутри образовавшегося «кратера осаждения»[6] продолжается процесс зарождения и присоединения к фронту твердо-жидкой фазы изолированных кристаллов. Постепенно образующийся выступ отклоняет двухфазный поток к оси слитка. Зона осаждения изолированных кристаллов также смещается в этом направлении, перекрывая продвигающийся горизонтальный фронт твердо-жидкой фазы.

Поскольку тепловое сопротивление затвердевшего слоя в направлении поддона в этот период становится значительным, а рост дендритов в жидко-твёрдой области сопровождается выделением теплоты кристаллизации, то интенсивность зарождения твёрдой фазы перед горизонтальным фронтом затвердевания уменьшается.

Этот объем обеднен ликвирующими примесями и обогащен первичными неметаллическими включениями. В то же время осаждающиеся изолированные кристаллы, вследствие достаточно длительного пребывания в объеме расплава также обедняются ликвирующими примесями, что особенно характерно для крупных слитков. Поэтому зона отрицательной ликвации может по объёму значительно превышать «конус» мелких кристаллов. В крупных слитках «внутренняя зона» отрицательной ликвации может существенно отличаться по химическому составу от «внешней». Это четко выявлено при исследовании слитков 51 т и 52 т [7].

Рост частиц твердой фазы, погружающихся в потоке расплава, сопровождается выделением теплоты кристаллизации и уменьшением переохлаждения расплава перед вертикальным фронтом затвердевания. В результате тормозится зарождение новых и рост присоединившихся к затвердевшей корке кристаллов, а на участке наибольших скоростей нисхо-

дящего потока продвижение фронта твердо-жидкой зоны замедляется. Толщина затвердевшего от стенки изложницы слоя по высоте слитка (ниже зоны теплового влияния прибыли) сначала выравнивается (рис. 3, *a*), а затем граница раздела фаз верхним краем постепенно наклоняется к оси слитка и в продольном сечении при малой обратной конусности изложницы (~2–6%) принимает Λ -образную, близкую к усеченному конусу форму (рис. 3, *б*).

Наличие прямой конусности фронта затвердевания четко зафиксировано путем выливания жидкой фазы слитков в работе [8] (рис. 4) и при исследовании с помощью радиоактивных изотопов затвердевания сортового слитка массой 8 т (рис. 5), залитого в уширенную к низу изложницу с теплоизоляционными вкладышами (прямая конусность 2,3%) [9].



Рис. 4. Серный отпечаток с осевого темплетта остова слитка массой 7 т рельсовой стали, полученного методом выливания жидкой серцевины через 90 мин после заливки

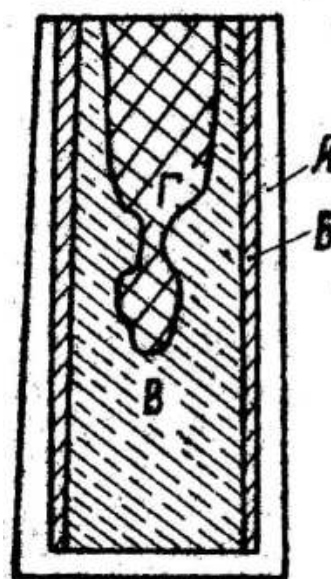


Рис. 5. Схема расположения областей в 8-тонном слитке спокойной стали с различной концентрацией изотопа:
 А – без изотопа; Б – 1-я добавка; В – 2-я добавка;
 Г – 3-я добавка

Период формирования осевой структуры и подприбыльного моста (рис. 6). Этот период характеризуется минимальными перегревом жидкой фазы, теплоотводом от слитка к изложнице и шириной зоны переохладения. Скорость продвижения границы твердо-жидкой области и соответственно интенсивность усадочных перемещений расплава низки. Сохраняются условия для медленного роста зафиксированных на фронте твердо-жидкой области кристаллов. Сплав еще больше обогащается примесями. Сечение и глубина жидкоподвижной области уменьшаются, её границы со стороны вертикального фронта примерно соответствуют положению ближайших к оси слитка шнуров внеосевой неоднородности, выявляемых на серных отпечатках с осевых темплетов. Скорость двухфазного потока снижается в результате уменьшения градиента температуры в расплаве и увеличения его вязкости. Величины сил $F_{ус.к}$ и F_k соизмеримы, и их соотношение изменяется по высоте затвердевающей области.

Затвердевание головной части слитка идет при низкой скорости продвижения фронта твердо-жидкой зоны, имеющего теперь в продольном сечении форму, близкую к параболической или конической. При этом обеспечивается хорошее питание области моста. Вследствие общей усадки сплава уровень расплава в прибыли снижается, тепловой центр слитка смещается в подприбыльную часть.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли при малых скоростях двухфазного потока продолжается опережающее продвижение фронта твердо-жидкой области. Искривление потока при переходе от зоны влияния прибыли к нижележащему участку усиливает этот процесс за счет осаждения изолированных кристаллов. Двухфазный и обратный потоки разделяются на две замкнутые циркуляции – одна в прибыли и зоне её теплового влияния, другая в узком канале осевой зоны тела слитка. В застойной зоне между ними ($F_k \rightarrow 0$) происходит быстрое смыкание вертикального фронта – формируется «первичный» мост (рис. 6, а). Толщина его увеличивается за счет осаждения кристаллов из объема головной части слитка.

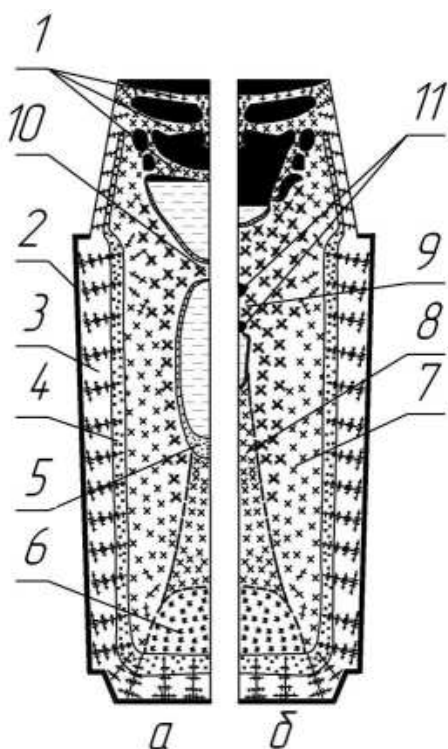


Рис. 6. Схема формирования осевой структуры и подприбыльного моста:

а - формирование подприбыльного моста; *б* - формирование V-образной неоднородности; 1 – мост; 2 – зона «замороженных» кристаллов; 3 – зона столбчатых кристаллов; 4 – переходная зона смешанных кристаллов; 5 – жидко-твёрдая область; 6 – зона мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом затвердевания (конус кристаллов); 7 – зона разноориентированных кристаллов, фиксируемых на вертикальном фронте затвердевания; 8 – зона осаждения кристаллов, зародившихся перед вертикальным фронтом затвердевания; 9 – опережающее продвижение твёрдой фазы в подприбыльной области слитка; 10 – подприбыльный мост; 11 – усадочные V-образные дефекты

Под мостом образуется объем с замкнутой циркуляцией расплава. В нижней части этого объема ускоренному продвижению фронта затвердевания, наряду с усадочными перемещениями, способствует осаждение кристаллов. На мениске расплава и вблизи его (скорости жидкости в вертикальном направлении равны нулю и минимальны) создаются наиболее благоприятные условия для присоединения изолированных кристаллов к фронту твердой фазы. Начинается формирование «вторичного» выступа. При этом одновременное опускание уровня расплава и продвижение твердо-жидкой области образуют конусообразную поверхность затвердевания - начинает формироваться усадочная раковина. «Вторичный мост» смыкается. Мениск расплава под ним опускается и процесс образования выступа и усадочной раковины повторяется (рис. 6, б). Разрежение в усадочных пустотах вызывает приток в них обогащенного ликвидами расплава из прилежащих объемов твердо-жидкой области. Раковины частично заполняются, а вокруг них образуется рассредоточенная пористость. Эти процессы фиксируются в макроструктуре слитка как V-образный «рисунок». Образование «вторичных мостов» может неоднократно повторяться до полного затвердевания замкнутого объема. Однако если мениск металла в незатвердевшей области опускается быстрее, чем происходит смыкание вертикальных фронтов, под «первичным мостом» образуется протяженная усадочная раковина.

Толщина «вторичных мостов» значительно меньше, чем у «первичных», поскольку в их образовании практически не участвуют оседающие кристаллы.

Предложенный механизм позволяет удовлетворительно объяснить особенности строения зоны разноориентированных кристаллов в слитке за счет различной по высоте жидко-твёрдой области интенсивности переноса изолированных кристаллов к фронту затвердевания.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Metallurgy, 1976. – 552 с.
2. **Оно, А.** Затвердевание металлов / А. Оно. – М.: Metallurgy, 1980. – 152 с.
3. **Саратовкин, Д.Д.** Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 95 с.
4. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
5. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка / А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
6. **Попов, А.А.** Фазовые превращения в металлических сплавах / А.А. Попов. – М.: ГНГИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 311 с.
7. Получение крупных слитков повышенной однородности / С.Я. Скобло [и др.] // Разливка стали и формирование слитка: труды I конференции по слитку. – М.: Metallurgy, 1966. С. 112–129.
8. **Горелкина, А.Е.** Определение периода кристаллизации рельсовых слитков массой 7-8 т / А.Е. Горелкина // Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков: труды II конференции по слитку. – М.: Metallurgy, 1967. С. 82–93.
9. **Скребцов, А.М.** Изучение закономерностей кристаллизации уширенного книзу слитка спокойной стали методом радиоиндикаторов / А.М. Скребцов, Н.П. Васильковская // Теплофизика стального слитка: сб. трудов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. С. 122–124.

*Дата поступления
в редакцию 01.04.2014*

V. Senopalnikov, V. Sivkov, A. Titov

**THE FORMATION OF DIFFERENTLY ORIENTED PATTERNS
IN THE STEEL INGOT**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose: To propose a mechanism linking the formation of a zone differently oriented crystals and axial V-shaped heterogeneity with the convective motion of a hardening melt.

Design/methodology/approach: On the basis of existing macro physical theories of crystallization, and your own research, we offer a mechanism of formation of differently oriented patterns in Central volumes of steel ingot quiet steel.

Findings: The proposed mechanism allows to explain satisfactorily is available zone differently oriented crystals in the ingot by means of various height-liquid-solid field intensity of migration isolated crystals to the front of solidification.

Research imitation/implications: The formation of a zone differently oriented structure can be divided into three periods.

Originality/value: This mechanism takes into account the availability of forces arising due to shrinkage and convective movements of the melt in the mushy zone.

Key words: steel ingot, convection zone differently oriented crystals, axial V - shaped heterogeneity.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.382:621.315

В.Ю. Водзинский

ВЛИЯНИЕ УГЛЕРОДОСОДЕРЖАЩИХ ПРИМЕСЕЙ НА ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛЁНОК ДИОКСИДА КРЕМНИЯ, ПОЛУЧЕННЫХ PECVD МЕТОДОМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены особенности PECVD технологии получения диэлектрических плёнок SiO₂ при температурах 150-500°C из смесей тетраметоксисилана (ТМОС) и O₂, а также SiH₄ и CO₂. Используя результаты ИК, масс- и оже-спектроскопии получены количественные данные о наличии в плёнках углеродосодержащих примесей в зависимости от температуры, мощности ВЧ разряда и соотношении газов-реагентов.

Установлены различия во влиянии примесей продуктов неполного распада ТМОС и атомарного углерода на диэлектрические характеристики плёнок. Даны рекомендации технологического характера для получения качественных диэлектрических плёнок.

Ключевые слова: диэлектрические плёнки, тетраметоксисилан, моносилан, углеродсодержащие примеси, PECVD, диэлектрические характеристики.

Введение

Плёнки диоксида кремния (SiO₂) занимают сегодня основное место в номенклатуре диэлектрических материалов, применяемых в микро- и наноэлектронике. В первую очередь это БИС на кремнии, МДП транзисторы, межуровневая изоляция, технологические маски на промежуточных стадиях изготовления полупроводниковых приборов и др. В последние годы, в связи с развитием новых направлений микро- и нанотехнологий, плёнки SiO₂ находят применение в устройствах МЭМС [1], как диэлектрическая матрица для нанокластеров кремния для оптоэлектроники [2], в виде пористого SiO₂ с малым значением диэлектрической проницаемости в СВЧ приборах, в многослойных «сэндвич» структурах [3], в солнечных панелях [4] и т.д.

Основными методами получения плёнок SiO₂, помимо традиционного окисления кремния в сухом и влажном кислороде, на сегодня являются термическое испарение электронной пушкой или лазерным излучением, различные магнетронные системы распыления и, наконец, CVD методы, использующие разложение моносилана (SiH₄) или летучих кремнийорганических соединений в окислительной атмосфере под действием температуры или с использованием дополнительной активации (УФ, ВЧ, СВЧ) [5-10]. Последний метод позволяет осаждать плёнки SiO₂ при температурах 100-400°C, что исключительно важно при создании приборов на основе бинарных полупроводниковых материалов, имеющих низкую температуру декомпозиции, при создании приборов с легкоплавкими и летучими компонентами, резкими p-n переходами и целом ряде других случаев. Процесс образования плёнки из элементарных соединений (ЭОС) достаточно сложен, протекает многостадийно и сопровождается выделением продуктов распада, способных внедряться в растущую плёнку, загрязняя её углеродосодержащими примесями. Большинство данных по углеродосодержа-

щим примесям носит либо качественный, либо относительный характер без определения их концентраций и степени их влияния на свойства плёнок [11-14].

Цель работы состояла в получении количественных данных о присутствии в плёнках углеродосодержащих примесей, их связи с условиями осаждения плёнок SiO_2 методом PECVD, а также в сравнении степени и характера влияния примесей атомарного углерода и примесей продуктов неполного распада ЭОС на электрофизические характеристики плёнок.

Методика эксперимента и ростовые характеристики плёнок

Исходными продуктами в первом случае являлась газовая смесь моносилана (SiH_4) и углекислого газа (CO_2), во втором – парогазовая смесь тетраметоксисилана $\text{Si}(\text{OCH}_3)_4$ (ТМОС) с кислородом.

Состав плёнок SiO_2 изучался методами ИК-, масс-, оже-спектроскопии, элементарным химическим анализом, структура и морфология поверхности методами электронной микроскопии и АСМ, электронографическим методом, электрические характеристики методами Q-метрии и ВАХ.

В обоих случаях осаждение плёнок осуществлялось плазмохимическим PECVD методом при мощности высокочастотного (13 мГц) ёмкостного разряда 80-400 Вт. ВЧ электрод располагался снаружи горизонтального кварцевого реактора диаметром 100 мм [15, 16]. Температура подложек менялась в диапазоне 150-600°C, суммарное давление в реакторе – от 66 до 266 Па. Газообразные продукты и пары ТМОС подавались в реактор через систему игольчатых кранов и ротаметров. Высокое давление насыщающих паров ТМОС при комнатной температуре позволило не использовать дополнительный его подогрев. Процесс осаждения плёнок происходил при непрерывной вакуумной откачке. Парциальные давления реагентов лежали в пределах для указанных методов: 1) ТМОС (26,6 – 200); O_2 (0 – 133), Па; 2) SiH_4 (6,6–66); CO_2 (26,6–200), Па. Последнее соответствовало изменению отношения $k = p_{\text{SiH}_4}/p_{\text{CO}_2}$ в интервале 1:1 до 1:10.

Для большинства исследований использовались плёнки толщиной от 0,1 до 0,3 мкм на кремниевых подложках “n” и “p” типа с удельным сопротивлением 4,5 – 10 Ом · см, а также GaAs, кварц, ситалл, поликор и кристаллический NaCl.

Зависимости скорости осаждения плёнок SiO_2 от температуры (рис. 1, а) различны для разных методов получения.

Сравнительно сильная зависимость $\vartheta_{\text{ос}}(T^\circ)$ для плёнок, полученных из SiH_4 , указывает на то, что, хотя процесс осаждения и идёт в ВЧ-разряде, существенный вклад вносит и чисто пиролитический процесс. Разложение же ТМОС происходит преимущественно за счет энергии ВЧ-разряда. Такое предположение согласуется с данными о начале взаимодействия моносилана с углекислым газом при температурах 300-400°C [17], разложение же ТМОС – происходит при температурах выше 500-600°C [18].

Хорошо известно, что температурный фактор существенным образом влияет на пористость плёнок, о чём косвенно можно судить по снижению скорости их химического травления с ростом температуры (рис. 1, б). Снижение же скорости химического травления для плёнок, по-

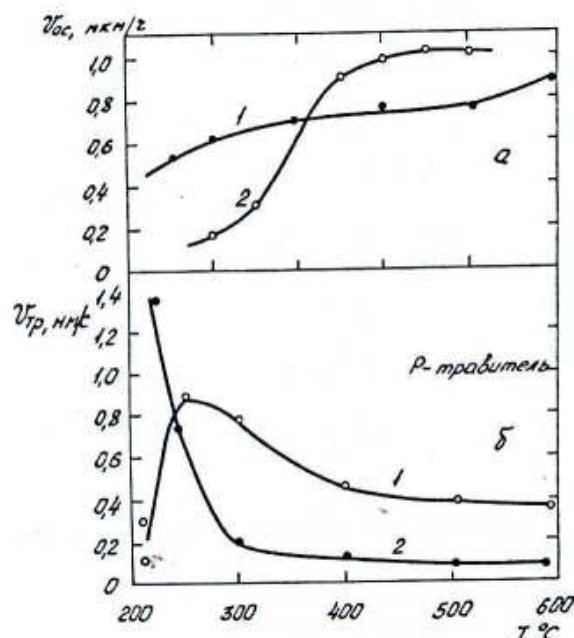


Рис. 1. Скорость осаждения (а) и скорость химического травления (б) плёнок SiO_2 , осаждённых при различной температуре из смеси:

1 - ТМОС- O_2 ; 2 - SiH_4 - CO_2

лученных из ТМОС при низких температурах ($< 250^{\circ}\text{C}$), объясняется нами присутствием в них примесей полимерных кремнийорганических продуктов, устойчивых к действию кислот. Подобных примесей нет в случае использования SiH_4 и CO_2 и снижение плотности плёнок при низких температурах приводит к резкому (с 0,2 до 1,6-2,0 нм/с) возрастанию скорости химического травления в стандартном Р-травителе.

Увеличение парциального давления кремнийсодержащего соединения в парогазовой фазе (т.е. увеличение коэффициента k) приводило к возрастанию скорости осаждения плёнок SiO_2 для обоих методов их получения, что является достаточно известным фактом. Однако при выборе оптимальных режимов получения стехиометрических плёнок SiO_2 необходимо учитывать, что при больших значениях k ($p_{\text{ТМОС}}/p_{\text{O}_2} \geq 2$; $p_{\text{SiH}_4}/p_{\text{CO}_2} \geq 0,6$), как показали исследования состава плёнок, в плёнках появляются примеси продуктов неполного распада ТМОС (1 метод) или избыточный кремний (2 метод). И в том, и в другом случае это приводило к снижению скорости химического травления плёнок (рис. 2).

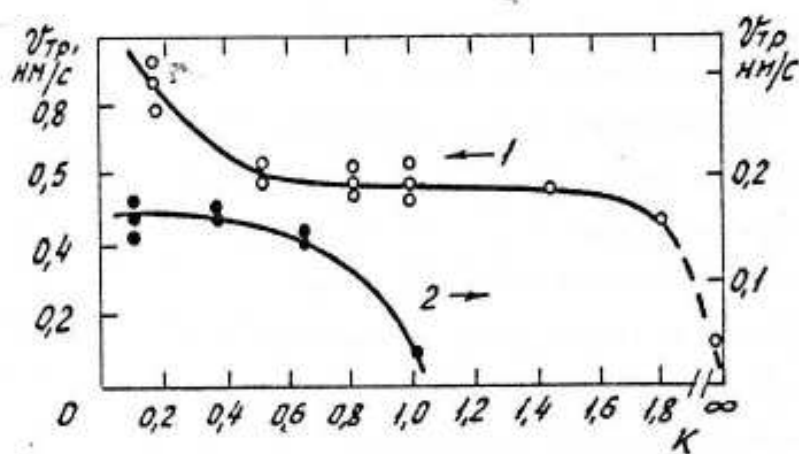


Рис. 2. Зависимость скорости травления плёнок SiO_2 от соотношения парциальных давлений k :
1 – $p_{\text{ТМОС}}/p_{\text{O}_2}$; 2 – $p_{\text{SiH}_4}/p_{\text{CO}_2}$ ($T = 300^{\circ}\text{C}$, $\Sigma p = 133 \text{ Па}$)

Состав и углеродосодержащие примеси диэлектрических плёнок

Как видно из приведённой схемы (рис. 3), для элементарных соединений (ЭОС) возможные механизмы загрязнения углеродсодержащими примесями можно разделить на загрязнение примесями продуктов неполного распада ЭОС (1 и 4 механизмы) и загрязнение атомарным углеродом (2 и 3 механизмы). Как показано далее, указанные примеси по-разному и в различной степени влияют на электрофизические характеристики осаждённых плёнок.

Для плёнок SiO_2 , полученных плазмопиролитическим методом из ТМОС и O_2 , вид спектров ИК поглощения мало зависел от условий осаждения плёнок в достаточно широком интервале температур осаждения ($150\text{--}600^{\circ}\text{C}$) и мощности ВЧ разряда ($100\text{--}400 \text{ Вт}$). Наличие полос поглощения с максимумами на частотах 1050 , 800 и 440 см^{-1} характерно для плавленого кварца. Смещение основного максимума поглощения колебаний связи Si-O в сторону более длинных волн ($\Delta\nu \approx 40 \text{ см}^{-1}$) закономерно для плёнок, осаждённых низкотемпературными методами и объясняется несколько меньшей плотностью, а, следовательно, и большими средними межатомными расстояниями, чем в плавленом кварце. В данных плёнках не было зафиксировано присутствие OH -групп и продуктов неполного разложения ТМОС.

Однако плёнки SiO_2 , полученные в условиях, далёких от оптимальных, т.е. при низких температурах подложки (50°C) и низкой мощности ВЧ разряда (80 Вт), содержали примеси OH -групп и продуктов разложения ТМОС. Помимо максимума поглощения двуоксида кремния, в ИК спектрах наблюдалась широкая полоса поглощения в области $3750\text{--}3000 \text{ см}^{-1}$,

относящаяся к валентным колебаниям ОН-группы и небольшой максимум $\delta_{OH} = 1630 \text{ см}^{-1}$ деформационных колебаний молекул воды.

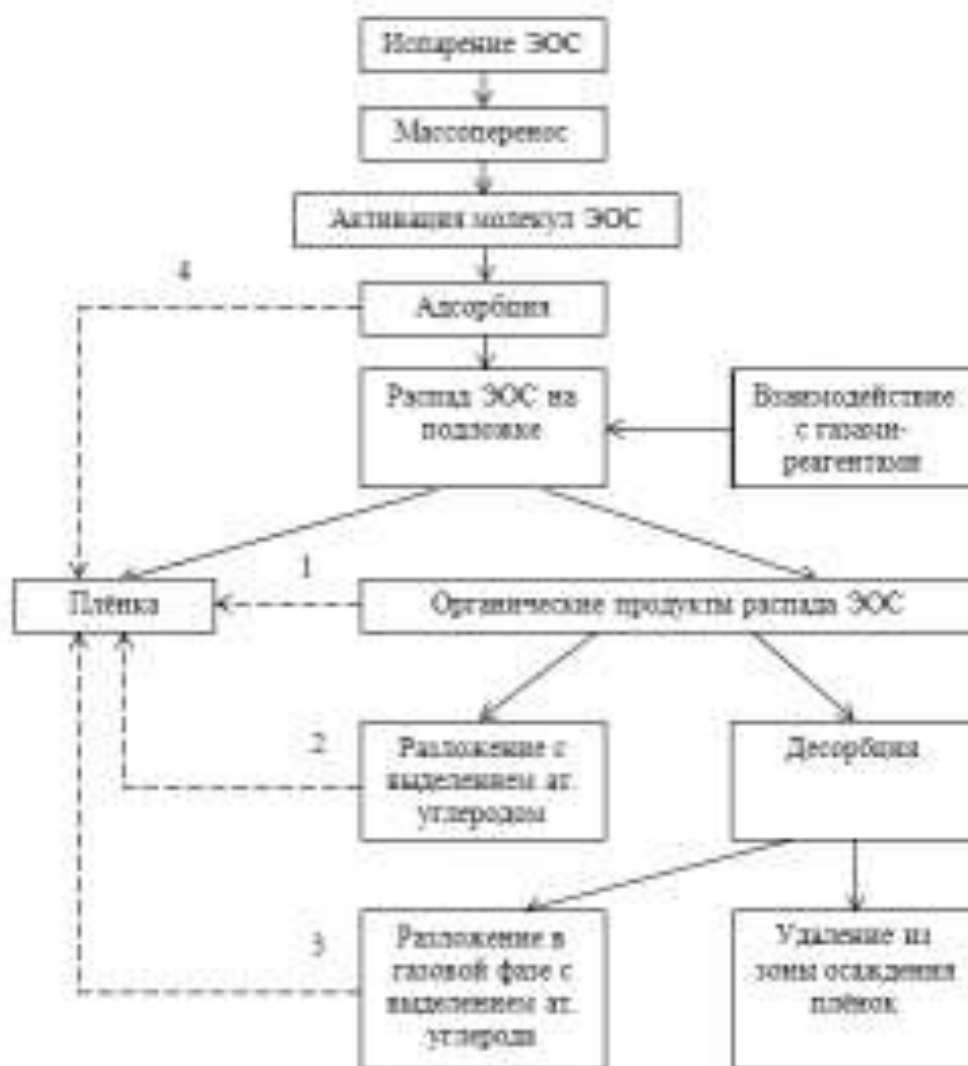


Рис. 3. Схема образования плёнки при гетерогенном разложении ЭОС и процессов, приводящих к загрязнению её углеродосодержащими примесями:

1 – захват органических продуктов распада ЭОС; 2 – захват атомов углерода на поверхности плёнки; 3 – захват атомов углерода из газовой фазы; 4 – захват неразложившихся молекул ЭОС

Примеси продуктов разложения ТМОС проявлялись в виде двух слабых полос поглощения $\nu_1 = 2840$ и $\nu_2 = 2940 \text{ см}^{-1}$, соответствующих валентным колебаниям СН-групп и полосы с максимумом 930 см^{-1} , относящейся к колебаниям радикалов вида Si-O-CH_3 [13]. Методом элементного химического анализа в данных плёнках было найдено С 3,84% масс и Н 1,86% масс. Для углерода это соответствовало 8,5% ат. Одновременное присутствие углерода и водорода, а также наличие СН-групп, определённых из ИК спектров, подтверждает возможность образования полимероподобных включений, например, вида: $(-\text{Si}-\text{O}-\text{CH}_2-\text{O}-\text{Si}-\text{O}-)_n$. Количество атомов углерода, найденное в плёнках масс-спектроскопически (импульсное испарение плёнки лазером), составляло 7-8% ат.

Из хорошего совпадения этого результата с данными СН-анализа (8,5% ат.) можно сделать вывод, что практически весь углерод в плёнках SiO_2 , полученных из ТМОС, находится в связанном состоянии, очевидно, в виде полимерных включений или продуктов неполного распада ТМОС.

Хотя в плёнках SiO_2 , полученных из ТМОС в оптимальных условиях методом ИК

спектроскопии, не удалось установить наличие продуктов разложения ТМОС, однако результаты масс-спектрометрического исследования газообразных продуктов, выделяющихся из плёнки после её кратковременного нагрева до 800°C в вакууме излучением CO₂ – лазера, показали, что и в этом случае в плёнках SiO₂ присутствовали углеродсодержащие примеси. В выделившихся газах были обнаружены H₂, CH₄, CO₂, H₂O, а также следы высших углеводов (табл. 1).

Таблица 1

Количество выделившихся из плёнки SiO₂ газообразных продуктов в зависимости от условий её получения (в граммах)

№ п/п	W, Вт	T _{ос} , °C	H ₂ , 10 ⁻⁹	CH ₄ , 10 ⁻⁹	H ₂ O, 10 ⁻⁹	CO ₂ , 10 ⁻⁹
1	100	350	50	3,3	10,2	34
2	350	350	15	3,3	8,1	26
3	400	350	17	2,6	6,4	58
4	350	200	70	19,8	9,0	55
5	350	400	40	4,6	7,9	29
6	350	600	4	0,7	3,6	53
7	Si-подложка		-	1,0	5,1	69

При анализе полученных результатов нужно учитывать, что наиболее достоверные данные относятся к H₂ и CH₄, так как вода и двуокись углерода могли быть адсорбированы поверхностью плёнки после её изготовления, о чём свидетельствовал контрольный опыт, сделанный на чистой кремниевой подложке. Все эксперименты проводились в строго идентичных условиях, на плёнках SiO₂ одинаковой толщины (0,3 мкм) и одинаковой площади (1 см²). Анализ результатов показал, что относительное количество захваченных плёнкой H₂ и CH₄ сравнительно мало зависит от мощности ВЧ разряда, в то время как снижение температуры подложки приводит к существенному увеличению газовой выделению из плёнки. Последнее хорошо объясняется увеличением адсорбции продуктов разложения ТМОС при более низких температурах подложки.

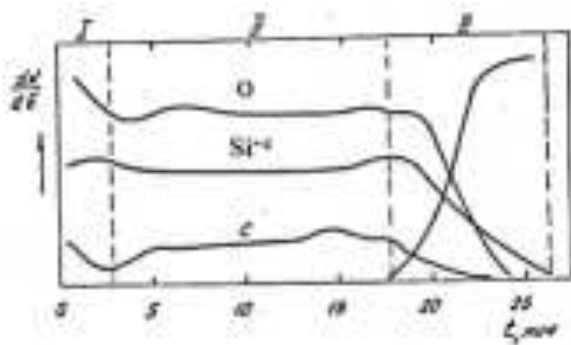


Рис. 4. Относительная интенсивность линий элементов в оже-спектрах плёнки диоксида кремния, полученной из ТМОС, от времени ионного травления

Результаты послойного элементного оже-анализа плёнок SiO₂, полученных из ТМОС в оптимальных условиях (T = 350°C; W = 350 Вт) на Si подложке, показали среднюю концентрацию атомов углерода в плёнке 5,3% ат. (рис. 4). Кремний и кислород находились практически в стехиометрическом отношении.

Для плёнки SiO₂, осаждённые из газовой смеси, содержащей моносилан SiH₄ и углекислый газ CO₂, методом ИК спектроскопии не было зафиксировано примесей, относящихся к C-H или Si-C связям. Аморфный же углерод, как известно, прозрачен в ИК области [19].

Наблюдались полосы поглощения с максимумами 1050,820 см⁻¹, соответствующие валентным колебаниям Si-O, типичные для низкотемпературных плёнок SiO₂.

Кроме того, наблюдался небольшой максимум с $\nu = 880$ см⁻¹, отнесённый нами к полупрозрачной окиси кремния Si₂O₃, так как известно, что плёнки, полученные из моносилана, имеют, как правило, избыток атомов кремния по сравнению со стехиометрией.

Методом оже-спектроскопии было установлено отношение кремния к кислороду в плёнках 0,73 вместо стехиометрического отношения 0,5, а также определено среднее содержание атомов углерода, равное 4,5% ат. (рис. 5).

Методом масс-спектропии было установлено, что количество атомов углерода, находящихся в плёнке SiO_2 , возрастает при увеличении общего, а, следовательно, и парциального давления CO_2 в составе газовой фазы (рис. 6) от 1 до 7% ат. Полученные значения хорошо согласуются с количеством атомов углерода (4,5% ат.), найденным оже-спектроскопией.

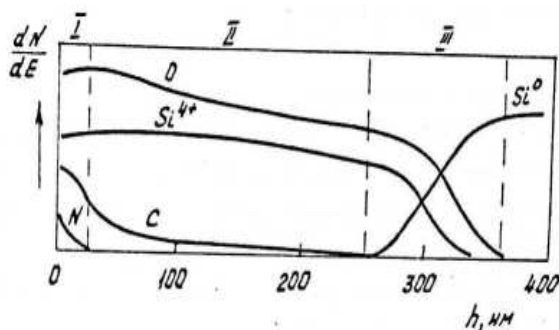


Рис. 5. Зависимости интенсивности линий элементов в оже-спектрах плёнки двуокиси кремния, полученной из смеси $\text{SiH}_4 - \text{CO}_2$, от глубины залегания анализируемого слоя

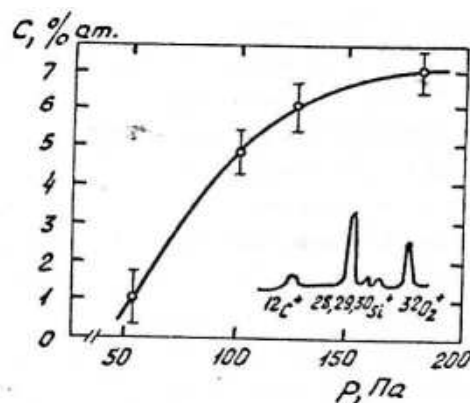


Рис. 6. Концентрация атомов углерода в плёнках SiO_2 в зависимости от давления $\text{SiH}_4 - \text{CO}_2$ и типичной масс-спектр плёнок ($T = 350^\circ\text{C}$, $p_{\text{SiH}_4}/p_{\text{CO}_2} = 0,33$)

Исходная структура и её изменение при термическом отжиге плёнок

Плёнки SiO_2 , полученные при $200\text{--}400^\circ\text{C}$ как из ТМОС, так и из SiH_4 и CO_2 , были аморфны. На электронограммах присутствовали два диффузно-размытых кольца. Отжиг плёнок в инертной среде аргона приводил к переходу в поликристаллическую структуру, соответствующую смеси фаз α, β – кристобалита. По изменению полуширины дифракционных линий на электронограммах, согласно [20], был определен средний размер частиц кристаллической фазы, изменяющейся при отжиге от 0,5 до 100 нм (рис. 7) и температура начала кристаллизации плёнок, которая для плёнок SiO_2 составила примерно $900\text{--}950^\circ\text{C}$, что подтверждалось результатами электронно-микроскопических и АСМ исследований.

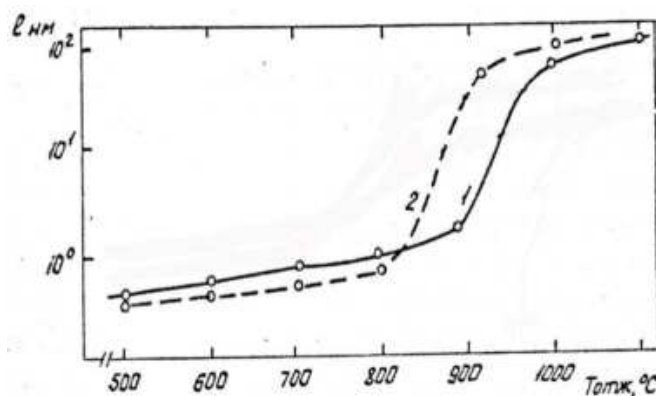


Рис. 7. Средние размеры кристаллических областей в зависимости от термического отжига плёнок SiO_2 : 1 – (ТМОС- O_2); 2 – (SiH_4 - CO_2)

Влияние технологических факторов на электрические свойства плёнок

Основными факторами, определяющими условия разложения исходных реагентов и формирование плёнки на подложке, а, в итоге, и электрические свойства плёнок, являются: температура осаждения, состав парогазовой смеси и мощность ВЧ-разряда. На наш взгляд, влияние перечисленных факторов на электрические свойства плёнок во многом обусловлено присутствием в плёнках углеродосодержащих примесей. В этом случае, количество и вид углеродосодержащих примесей, попавших в диэлектрическую плёнку при её осаждении, должны в определённой степени предопределять и её электрические свойства. Увеличение температуры осаждения плёнок снижало количество захваченных плёнкой углеродосодер-

жащих примесей и улучшало основные электрические характеристики плёнок как диэлектриков. Прямая связь электрических свойств с количеством углеродосодержащих примесей хорошо прослеживалась на плёнках SiO₂, полученных их ТМОС (табл. 2).

Таблица 2
Электрические характеристики плёнок SiO₂, полученных при различной температуре

Плёнка	T _{ос} , °C	C ^{**} , % ат.	tgδ, (1 МГц)	ε, (1 МГц)	E _{пр} · 10 ⁻⁶ , В · см ⁻¹	σ, Ом ⁻¹ · см ⁻¹
SiO ₂ (ТМОС-O ₂)	200	7	0,030	3,8	2-4	6 · 10 ⁻¹⁵
	250	6	0,015	4,0	4-5	8 · 10 ⁻¹⁶
	300	4	0,008	4,2	5-6	4 · 10 ⁻¹⁶
	400	3	0,003	4,1	5-6	3 · 10 ⁻¹⁶
	500	4	0,005	4,1	6-7	2 · 10 ⁻¹⁶

** - Данные масс- и оже-спектроскопии.

При увеличении температуры осаждения плёнок с 200 до 500°C одновременно со снижением количества примесей в плёнках происходило возрастание их электрической прочности, снижение электропроводности и тангенса угла диэлектрических потерь. Необходимо отметить существенное снижение tgδ, что объясняется уменьшением числа релаксирующих центров в виде примесных включений.

Сравнительно высокая электрическая прочность (2-4) · 10⁶ В/см и низкая удельная 6 · 10⁻¹⁵ Ом⁻¹ · см⁻¹ плёнок SiO₂, полученных даже при 200°C, свидетельствуют в пользу того, что углеродосодержащие примеси в плёнках находятся не в «графитоподобном» или в атомарном состоянии, а скорее в виде включений диэлектрической фазы.

Проведение процесса осаждения плёнок SiO₂ разложением ТМОС в отсутствие кислорода, при прочих равных условиях (T_{ос} = 350°C, W = 200 Вт), также приводило к возрастанию концентрации продуктов распада ТМОС в плёнках (до 8-9% ат. по углероду) и увеличению tgδ до 0,1.

Для плёнок SiO₂, полученных из моносилана и углекислого газа, в которых углеродосодержащие примеси находились только в виде атомов углерода, также хорошо прослеживалась зависимость электрических свойств от процентного содержания углерода (табл. 3) и суммарного давления в системе. Наиболее существенное влияние в данном случае примесь атомов углерода оказывала на величину удельной проводимости плёнок, увеличивая её с 1 · 10⁻¹⁵ до 5 · 10⁻¹² Ом⁻¹ · см⁻¹ при возрастании количества углерода с 2 до 7% ат. Такое поведение проводимости плёнок связано с тем, что углерод или небольшие углеродные кластеры являются «электрически активной» примесью и существенно влияют на величину и, возможно, механизм проводимости. Увеличение числа релаксирующих центров в виде примеси углерода приводило также к возрастанию угла диэлектрических потерь.

Таблица 3
Электрические свойства плёнок SiO₂, полученных при различном давлении газовой смеси (p_{SiH₄}/p_{CO₂} = 0,33, T_{ос} = 300°C)

p, Па	C ^{**} , % ат.	σ, Ом ⁻¹ · см ⁻¹	tgδ, (1 МГц)	ε, (1 МГц)
80	2	1 · 10 ⁻¹⁵	0,007	4,5
120	6	1 · 10 ⁻¹³	0,010	4,0
160	7	5 · 10 ⁻¹²	0,050	4,0

** - Данные масс-спектроскопии.

Величина мощности ВЧ-разряда при PECVD способе осаждения плёнок является основным фактором, определяющим энергетику протекания различных химических реакций, необходимых для образования плёнки. В табл. 4 приведены электрические свойства плёнок

SiO₂, полученных из ТМОС-O₂ и из SiH₄ – CO₂. В первом случае возрастание ВЧ-мощности снижало угол диэлектрических потерь и проводимость плёнок, а во втором случае – увеличивало.

Таблица 4

Электрические характеристики плёнок SiO₂, полученных при различной мощности ВЧ-разряда ($T_{oc} = 300^{\circ}\text{C}$)

W, Вт	ТМОС - O ₂			SiH ₄ + CO ₂		
	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	ϵ , (1 МГц)	tg δ , (1 МГц)	σ , Ом ⁻¹ ·см ⁻¹	ϵ , (1 МГц)	tg δ , (1 МГц)
100	$2 \cdot 10^{-15}$	4.8	0.080	$2 \cdot 10^{-15}$	5.0	0.003
200	$6 \cdot 10^{-16}$	4.2	0.015	$3 \cdot 10^{-15}$	4.0	0.070
300	$2 \cdot 10^{-16}$	4.2	0.005	$5 \cdot 10^{-15}$	3.8	0.020

Полученные результаты хорошо объяснимы с точки зрения содержания в плёнках примесей. В обоих случаях возрастание мощности разряда должно способствовать более полному разложению исходных соединений. Однако если в первом случае происходит более полное отщепление углеводородного радикала и снижение концентрации захваченных плёнкой примесей, то во втором случае помимо разложения SiH₄ происходит разложение CO₂ с выделением углерода, в результате чего tg δ и σ – возрастают. Повышенные значения ϵ для плёнок SiO₂, полученных при низкой мощности ВЧ-разряда объясняются в первом случае наличием углеродосодержащих примесей, а во втором случае – присутствием в плёнке избыточных атомов кремния.

Таким образом, влияние различных технологических факторов на электрические свойства низкотемпературных плёнок, полученных PECVD методом, во многом обусловлено присутствием в них углеродосодержащих примесей. Особое внимание следует уделять форме, в которой эти примеси присутствуют в плёнках, так как продукты неполного распада ЭОС оказывают значительно меньшее влияние на электрофизические характеристики, чем примесь атомарного углерода. По нашим результатам, плёнки с высокими диэлектрическими характеристиками могут содержать до 5-6% ат. (по углероду) для первого вида и до 1-2% ат. углерода – для второго.

Библиографический список

1. **Guan, D.** Stress control of plasma enhanced chemical vapor deposited silicon oxide film from tetraethoxysilane / D. Guan [et al.] // J. Micromech. Microeng., 24.2014. № 027001. P. 6.
2. **Чугров, И.А.** Полупроводниковые наноструктуры: электронные, оптические свойства, методы формирования / И.А. Чугров [и др.] // Нанозифика и нанозлектроника: труды XVI Международного симпозиума. – Н. Новгород, 12-16 марта, 2012. Т. 2.
3. **Кузнецов, Ф.А.** Материалы и базовые технологии электронных устройств следующих поколений: диэлектрические слои / Ф.А. Кузнецов [и др.] // Материалы электронной техники. 2007. №4. С. 54–62.
4. **Maeller, T.** Crystalline silicon surface passivation by high-frequency plasma-enhanced CVD nanocomposite silicon suboxides for solar cell applications / T. Maeller, S. Schwertheim and W.R. Fahrner // J. Appl. Phys., 107. 2010. № 014504.
5. **Ежовский, Ю.К.** Получение наноструктурных плёнок оксида и нитрида кремния с использованием нанотехнологий // Неорганические материалы. 2013. Т. 49. № 9. – 971 с.
6. **Any, S.S.** Electrical characterization of low-pressure CVD silicon dioxide metal-oxide-silicon structures / S.S. Any, Y.J. Shi, W.D. Brown // J. Appl. Phys. 1993. №73(5). P. 2397–2401.
7. **Maruyama, T.** Silicon dioxide thin films prepared by CVD from tetrakis silane and ozone / T. Maruyama, T. Shirai // J. Appl. Phys. Lett. 1993. № 63 (5). P. 611-613.
8. **Васильев, В.В.** Плазмомеханическое осаждение плёнок диоксида и нитрида кремния для пассивации поверхности КРТ // Прикладная физика. 2007. № 5. С. 63–66.

9. **Васильев, В.Ю.** Применение методов химического осаждения тонких слоёв из газовой фазы для микросхем с техническими нормами 0,35-0,18 мкм // Электронная техника. Сер. 2. Полупроводниковые приборы. 2010. № 1. – 224 с.
10. Пат. РФ № 2419176. Способ изготовления диэлектрической плёнки для полупроводниковых структур электронной техники / Галахин А.В., Галахин П.А., Лапин В.Г., Петров К.И.; заявл. 15.03.2010.
11. Осаждение плёнок и покрытий разложением металлорганических соединений/ под ред. Г.А. Разуваева. – М.: Наука, 1981. – 322 с.
12. **Корзо, В.Ф.** Плёнки из элементарорганических соединений в радиоэлектронике / В.Ф. Корзо, В.А. Курочкин, В.П. Дёмин. – М.: Энергия, 1973. – 192 с.
13. **Kihel, M.** Dielectric Properties of SiO_x Like Films Deposited From TMS/O₂ Mixture in Low Pressure Microwave Plasma / M. Kihel, S. Sahli, A.Zenasni, P. Raynand, Y. Segui // J. Vacuum, doi: 10.1016/j.vacuum, 2014.02.022.
14. **Jiun-Lin, Yeh.** Structural and optical properties of amorphous silicon oxynitride / Jiun-Lin Yeh, Si-Chen Lee // J. Appl. Phys. 1996. № 79 (2). P. 656–663.
15. **Шитова, Э.В.** Механизм синтеза плёнок нитрида кремния / Э.В. Шитова, В.Ю. Водзинский, Т.А. Крузе // Изв.АН СССР, сер. Неорганические материалы. 1975. Т. 11. № 5. С. 806–809.
16. А.с. СССР, № 913848. Способ получения плёнок оксинитрида кремния / Шитова Э.В., Водзинский В.Ю., Генкина Н.А., Суслов Л.А.; заявл. 10.11.80.
17. **Strater, K.** Controlled oxidation of silane / RCA Rev. 1968.V. 29. № 4. P. 618–629.
18. **Белякова, О.И.** Образование плёнок SiO₂ из тетраалкоксисиланов в потоке кислорода / О.И. Белякова [и др.] // Изв. АН СССР, сер. Неорганические материалы. 1976. Т. 12. №4. С. 631–633.
19. **Holland, L.** The growth of carbon films with random atomic structure from ion impact damage in hydrocarbon plasma / L. Holland, S.M. Ojha. Thin Sol. Films. 1979. V. 58. P. 107–116.
20. **Пинскер, З.Г.** Дифракция электронов / З.Г. Пинскер. – М.: АН СССР, 1949. – 325 с.

*Дата поступления
в редакцию 07.05.2014*

V. Vodzinskiy

EFFECT OF CARBON-CONTAINING IMPURITIES ON THE ELECTRICAL PROPERTIES OF SILICON DIOXIDE FILMS OBTAINED BY PECVD

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The features of the technology of PECVD SiO₂ dielectric films at temperatures of 150-500 ° C from mixtures of tetramethoxysilane (TMOS) and O₂, as well as SiH₄ and CO₂. Were considered using the results of IR , mass spectroscopy and Auger spectroscopy it was obtained quantitative data on the presence of the carbon-containing impurities in films depending on the temperature, the RF power level and the ratio of reactant gases.

The differences in the effect of impurities of the incomplete decay products of TMOS and atomic carbon on the dielectric properties of the films .The technology recommendations were proposed for deposition of the high quality dielectric films.

Key words: dielectric films, tetramethoxysilane, monosilane, carbon-containing impurities, PECVD, dielectric characteristics.

УДК 669.228

А. В. Исаев¹, Т.А. Жирнова¹, М.Г. Михаленко², В.В. Исаев², В.В. Бакаев²**ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНЫХ АЛМАЗОВ
НА КАТОДНОЕ ОСАЖДЕНИЕ СЕРЕБРА**ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седякова», Н. Новгород¹
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Рассмотрены кинетические особенности гальванического серебрения из малотоксичного дициано-аргентатно-роданистого электролита, влияние добавки ультрадисперсных алмазов на кинетические особенности катодного осаждения серебра. Установлено, что на катодной поверхности происходит образование пассивирующей коллоидной фазы, состоящей из AgCN и AgCNS , экранирующей поверхность катода. Введение в электролит серебрения ультрадисперсных алмазов, которые адсорбируются на катодной поверхности, приводит к разрыхлению коллоидной фазы и облегчает катодное восстановление ионов серебра. Ультрадисперсные алмазы, включаясь в серебряное покрытие, повышают его микротвёрдость и износостойкость.

Ключевые слова: серебрение, катодное осаждение, кинетические особенности, ультрадисперсные алмазы.

Широкое применение в производстве изделий электронной техники и приборостроения получили функциональные серебряные покрытия. Серебро обладает высокой теплопроводностью и электропроводимостью, хорошо полируется и паяется.

Современное развитие электроники и приборостроения приводит к переориентации технологии серебрения на получение серебряных покрытий из электролитов, не содержащих высокотоксичных цианистых солей и из композиционных электролитов с добавками высокотвёрдых дисперсных ингредиентов [1].

Гальваническое серебрение электрических контактов получило широкое применение в производстве электрических соединителей. Основным недостатком серебряных покрытий является низкая твердость и износостойкость. Электрические соединительные контакты быстро истираются, серебро переносится с одного места на другое, «скатывается», что является крайне нежелательным явлением [2, 3]. Устранить этот недостаток можно введением в серебряное покрытие высокотвёрдых композитных материалов, которыми являются ультрадисперсные алмазы (УДА). Использование их в последние годы открыло новое перспективное направление в создании композитных материалов, обладающих высокой твердостью и повышенной устойчивостью к различным агрессивным средам [4, 5].

В данной работе изучены кинетические особенности гальванического серебрения из малотоксичного дициано-аргентатно-роданистого электролита, влияние добавки ультрадисперсных алмазов (УДА) на кинетические особенности катодного осаждения серебра.

Для исследования влияния УДА на кинетику катодного осаждения серебра использовали дициано-аргентатно-роданистый электролит следующего состава (г/л): KAg(CN)_2 – 40–50; KCNS – 200–250; K_2CO_3 – 20–40. Осаждение проводили при температуре 18–20 °С. Медный образец марки МО перед серебрением подвергался следующей обработке поверхности:

- обезжириванию оксидом магния;
- холодной промывке;
- травлению в концентрированной азотной кислоте;
- холодной промывке.

Перед исследованиями на медный электрод гальванически наносился слой серебра толщиной 3–4 мкм, и исследования проводились на серебряном электроде. Для проведения электрохимических измерений использовался потенциостат «Элинс Р-30S», а для импедансных – применяли импедансметр Z-500P. В качестве электрода сравнения использовали серебряную пластинку.

При опускании медного электрода в электролит серебрения на нём происходит контактное осаждение серебра. Для устранения данного процесса необходимо опускать медные образцы в электролит серебрения под катодной нагрузкой, или применять обработку, предлагаемую в [2].

Катодные хроновольтамперометрические кривые восстановления ионов серебра из указанного электролита серебрения при различных скоростях развертки потенциала представлены на рис. 1.

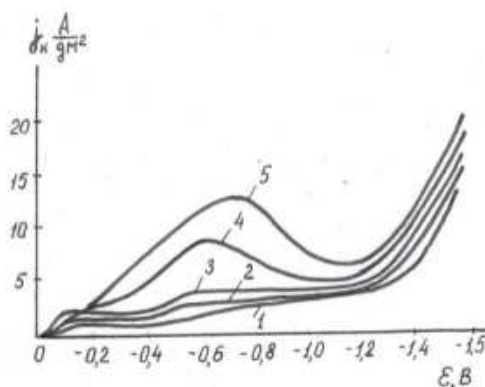


Рис. 1. Хроновольтамперометрические кривые катодного осаждения серебра из электролита основного состава при $t = 20^{\circ}\text{C}$. Скорость развертки потенциала (мВ/с): 1 – 4; 2 – 20; 3 – 40; 4 – 60; 5 – 80

На катодных кривых восстановления ионов серебра при малых скоростях развертки потенциала наблюдаются два предельных тока (рис. 1, кривые 1, 2, 3) один в области потенциалов $-0,2\text{ В} - -0,4\text{ В}$, второй при $-0,6\text{ В} - -1,0\text{ В}$. Появление двух предельных токов может свидетельствовать о том, что восстановление ионов серебра происходит из двух различных частиц.

На хронопотенциограмме, полученной из электролита серебрения, также наблюдаются две площадки. Первая потенциальная площадка наблюдается при потенциале $-0,038 \div -0,040\text{ В}$, вторая – при потенциале $-0,048 \div -0,050\text{ В}$. Каждая из потенциальных площадок характеризуется своим переходным временем $\tau_{п1}$ и $\tau_{п2}$ (рис. 2). Это подтверждает предположение, что разряд ионов серебра происходит из двух различных частиц.

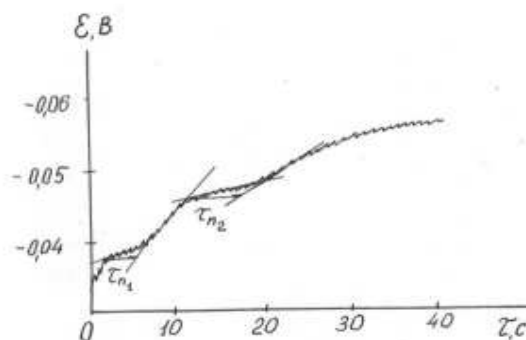


Рис. 2. Хронопотенциометрическая зависимость восстановления ионов серебра при плотности тока $0,25\text{ А/дм}^2$

С увеличением скорости развертки потенциала пики токов на хроновольтамперометрических кривых (рис. 1) возрастают, при этом потенциал тока пика смещается в отрицательную сторону. Появление максимумов токов (токов пика) на кривых при больших скоростях развертки потенциала обусловлено влиянием двух противоположно действующих фак-

торов. С одной стороны, с ростом катодного потенциала возрастает скорость электрохимического восстановления ионов серебра, а с другой стороны, при большой скорости восстановления возникают диффузионные затруднения, обусловленные подводом разряжающихся ионов к поверхности катода, что приводит к снижению катодного тока. Смещение потенциала тока пика в отрицательную сторону происходит в том случае, когда процесс восстановления является необратимым [6]. Значительный рост тока при потенциалах отрицательнее $-1,2$ В обусловлен не только осаждением серебра, но и выделением водорода.

На катодных хроноамперометрических зависимостях, полученных при различных потенциалах восстановления ионов серебра, наблюдаются пульсации катодного тока (рис. 3). Такие пульсации тока наблюдаются в том случае, когда происходит пассивация катодной поверхности. Пульсации тока могут быть обусловлены двумя противоположно действующими факторами. Первый из них – образование пассивирующих продуктов на катодной поверхности, экранирующей электрод, что приводит к снижению тока. Второй – образующиеся продукты частично восстанавливаются и растворяются, что активизирует катодную поверхность и способствует росту катодного тока. Снижение катодного тока со временем электролиза обусловлено диффузионными затруднениями, связанными с замедленным подводом разряжающихся ионов к катодной поверхности через пассивирующую фазу продуктов электролиза.

При поляризации отрицательнее $-1,2$ В, в области выделения водорода пульсации катодного тока исчезают. Для доказательства наличия диффузионных затруднений использовали вращающийся дисковый электрод. Хроновольтамперометрические кривые при скорости развертки потенциала 2 мВ/с и различными скоростями вращения дискового электрода представлены на рис. 4. С ростом скорости вращения дискового электрода токи восстановления ионов серебра значительно возрастают, что подтверждает наличие у процесса восстановления серебра диффузионных затруднений.

Катодное осаждение серебра исследовалось импедансным методом. Характеристические зависимости активной R_{ϕ} и реактивной $1/\omega C_{\phi}$ составляющих фарадеевского импеданса, обработанные по методике [7], от $1/\sqrt{\omega}$, где ω – круговая частота переменного тока, представлены на рис. 5. Ход этих зависимостей показывает, что у катодного восстановления ионов серебра в изучаемом электролите имеются диффузионные затруднения, характеризующиеся тангенсом угла наклона пунктирной прямой ($\text{tg}\Theta$) и затруднения химической реакции [8]. Таким образом, было показано, что при катодном восстановлении ионов серебра наблюдается два вида перенапряжений – *диффузионное* и *химическое*.

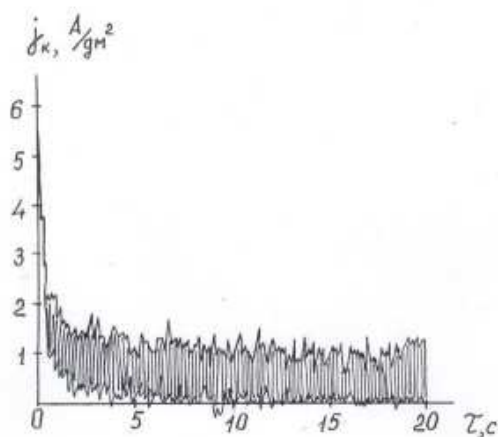


Рис. 3. Хроноамперометрическая зависимость восстановления ионов серебра при потенциале $-0,4$ В

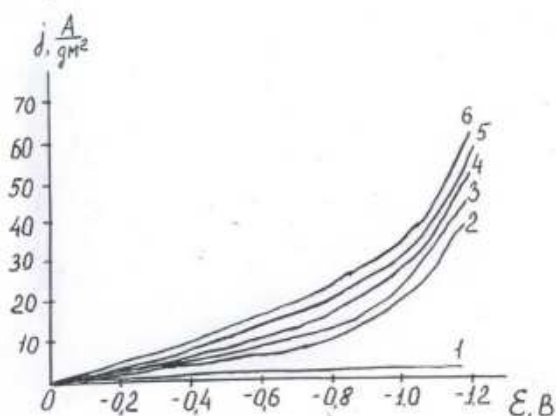


Рис. 4. Хроновольтамперометрические кривые катодного восстановления ионов серебра при скорости развертки потенциала 2 мВ/с при различных скоростях вращения дискового электрода (об/мин): 1 – нет вращения; 2 – 500; 3 – 600; 4 – 700; 5 – 800; 6 – 1000; $t = 20^\circ\text{C}$

Проведенные исследования позволили предложить следующий механизм катодного восстановления ионов серебра. В электролите серебрения ионы серебра находятся в виде комплексных ионов $[\text{Ag}(\text{CN})_2]^-$ и $[\text{Ag}(\text{CNS})_2]^-$. Появление роданидных комплексных ионов серебра в электролите серебрения возможно за счёт растворения серебряных анодов и взаимодействия ионов серебра с роданид – ионами. Так как эти ионы имеют отрицательный заряд, то под действием электрического поля мигрируют от отрицательно заряженной катодной поверхности. Поэтому подвод их к катоду затруднён. Доставка к поверхности катода может осуществляться лишь за счёт диффузии и конвекции. Поэтому перемешивание электролита значительно увеличивает катодный ток восстановления ионов серебра. У катодной поверхности происходит частичная диссоциация ионов по реакциям:

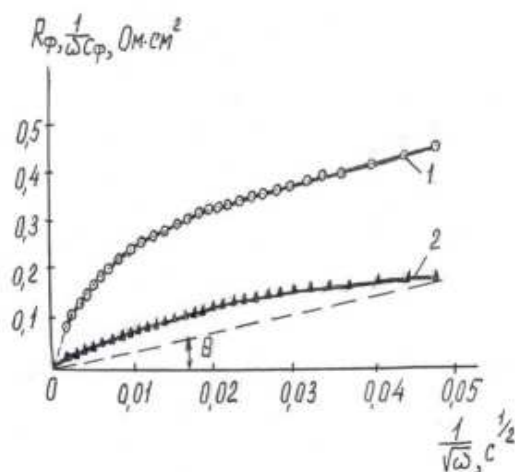
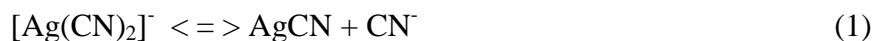


Рис. 5. Зависимости активной R_ϕ (кривая 1) и реактивной $1/\omega C_\phi$ (кривая 2) составляющих фарадеевского импеданса серебряного электрода от $1/\sqrt{\omega}$ при потенциале -0,8 В

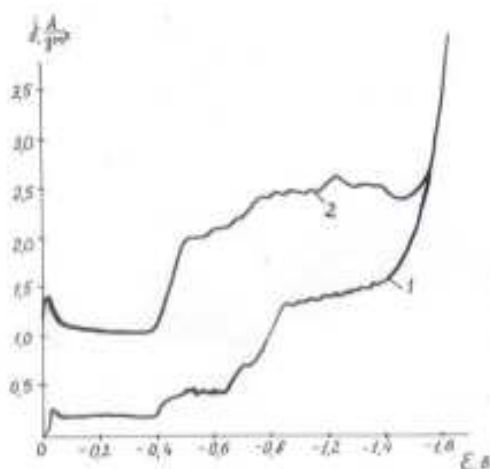
Образующиеся при диссоциации цианид и роданид ионы, имеющие отрицательный заряд, мигрирует из двойного электрического слоя, а малорастворимые бесцветные соли

AgCN и AgCNS, перекрывая катодную поверхность, пассивируют её, препятствуя восстановлению ионов серебра. На катодной поверхности имеются участки, закрытые малорастворимым бесцветным цианидом и роданидом серебра, и имеются небольшие открытые участки (поры), на которых происходит восстановление цианидных и роданидных комплексных ионов по реакциям:



Стандартные потенциалы этих окислительно-восстановительных систем равны -0,29 В и +0,313 В соответственно [9]. Этим объясняется появление на хронопотенциограммах двух потенциальных площадок (рис. 2), а на хроновольтамперометрических зависимостях двух предельных токов (рис. 1). Приблизительно долю открытых участков катодной поверхности можно определить из хроноамперометрической кривой (рис. 3). Предполагая, что в момент включения тока вся поверхность катода активна и пассивирующая фаза не успела образоваться на катодной поверхности, катодный ток будет принимать максимальное значение. Спад тока во времени электролиза обусловлен образованием на катодной поверхности пассивирующей фазы. При установившемся катодном минимальном токе, предполагая, что токи восстановления пассивирующей фазы значительно меньше токов восстановления комплексных ионов, доля открытых участков (пор) будет определяться как отношение минимального тока к максимальному и составлять 2-3 %. Растворение пассивирующей фазы с образованием комплексных ионов серебра затруднено. Это и обуславливает появление перенапряжения химической реакции, доказанное импедансным методом исследования (рис. 5).

При изучении влияния ультрадисперсных алмазов на катодное осаждение серебряных покрытий необходимо отметить особенности этих частиц. Согласно [10], частицы УДА в отличие от обычных микродисперсных порошков – наполнителей являются не наполнителем, а структурообразующим материалом со специфическими свойствами. УДА обладает рядом уникальных свойств, отличающих их от известных наполнителей [11,12]. Они имеют сложную структуру [13-16] ядро около 40 ангстрем из классического кубического алмаза и углеродную оболочку вокруг ядра из переходных рентгеноаморфных структур углерода толщиной 4-10 ангстрем. Эта оболочка, состоящая из sp^2 – гибридованных атомов углерода, неоднородна по степени упорядоченности структурных фрагментов. Поверхностный слой, включающий, кроме алмазов углерода гетероатомы, насыщен широким спектром разнообразных, преимущественно кислородсодержащих функциональных групп.



**Рис. 6. Катодные хроновольтамперометрические кривые восстановления ионов серебра при $V_{\text{разв.}} = 2 \text{ мВ/с}$, $t = 20 \text{ }^\circ\text{C}$:
1 – без добавки; 2 – с добавкой УДА 2 г/л**

При этом неалмазные компоненты УДА являются не примесями, а органическими составляющими продукта, в значительной степени определяющими комплекс его специфических свойств. Это свидетельствует, что в УДА роль поверхностных межфазных взаимодействий значительна.

При добавлении в электролит серебрения ультрадисперсных алмазов (2 г/л) качественный характер хроновольтамперометрических кривых восстановления ионов серебра не изменился, однако катодные токи значительно возросли (рис.6). Если в электролите без УДА при поляризации -0,6 В плотность катодного тока имела величину 0,4 А/дм², то в электролите с УДА она составляла 2,1 А/дм². При добавлении в электролит серебрения УДА изменилось сопротивление электролита, определённое импедансным методом исследования (рис. 7).

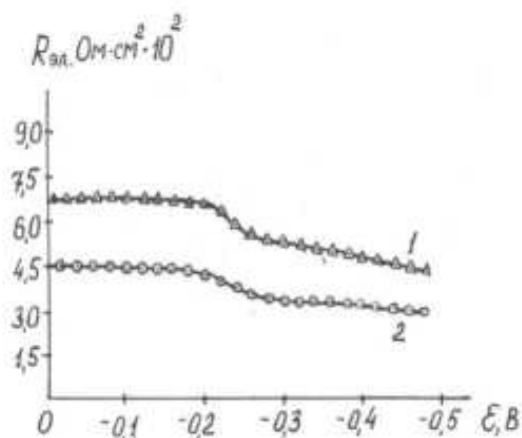


Рис. 7. Влияние УДА на сопротивление электролита серебрения:

1 – без добавки; 2 – с добавкой УДА -2г/л; $t = 20^{\circ}C$

Значительно изменилась емкость C_m на границе катод – электролит (рис. 8).

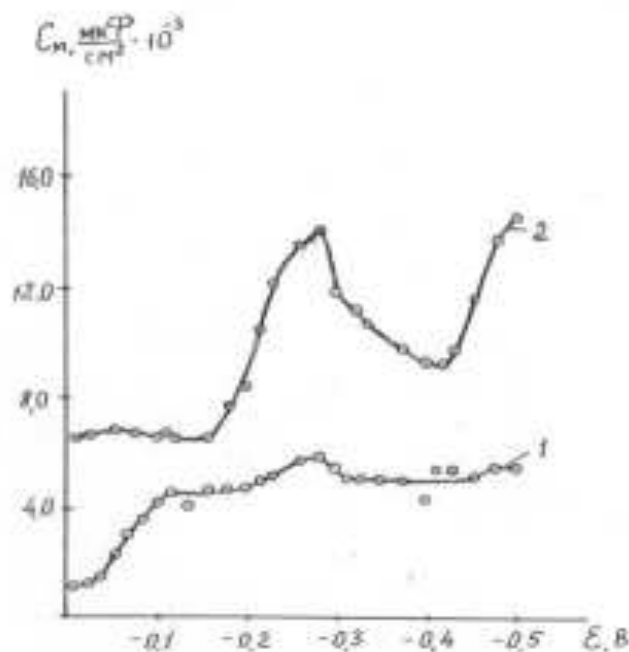


Рис. 8. Зависимость ёмкости C_m на границе серебряный электрод – электролит серебрения от потенциала катода при частоте переменного тока $f = 5690$ Гц ; $t = 20^{\circ}C$

Если при потенциале $-0,4$ В в электролите без добавки ёмкость C_M имела величину 5000 мкФ/см², то при добавлении в электролит серебрения 2 г/л УДА ёмкость составила 9500 мкФ/см². Введение добавки значительно увеличило ёмкостную составляющую границы серебряный катод – электролит. Большие значения ёмкостной C_M на границе электрод – раствор, не характерной для индифферентных электролитов, можно объяснить тем, что на катодной поверхности малорастворимые продукты, пассивирующие катод, представляют собой коллоидные частицы – мицеллы, каждая из которых имеет свой собственный двойной электрический слой. Суммарная ёмкость всех частиц, находящихся на катодной поверхности, будет пропорциональна суммарной поверхности этих мицелл, находящейся на электроде, а она велика. Введение в электролит УДА приводит к тому, что адсорбируясь на катодной поверхности, они разрыхляют коллоидную фазу, увеличивая тем самым поверхность, и следствием этого является увеличение ёмкости на границе серебряный катод – электролит.

Разрыхлением пассивирующей фазы можно объяснить снижение сопротивления электролита с введением добавки УДА (рис. 7). Сопротивление электролита включает и сопротивление пассивирующей фазы на катодной поверхности. Разрыхление этой фазы улучшает её проводимость, что приводит к снижению сопротивления электролита в целом.

Введение в раствор серебрения УДА сказалось на активной составляющей фарадеевского импеданса (рис. 9).

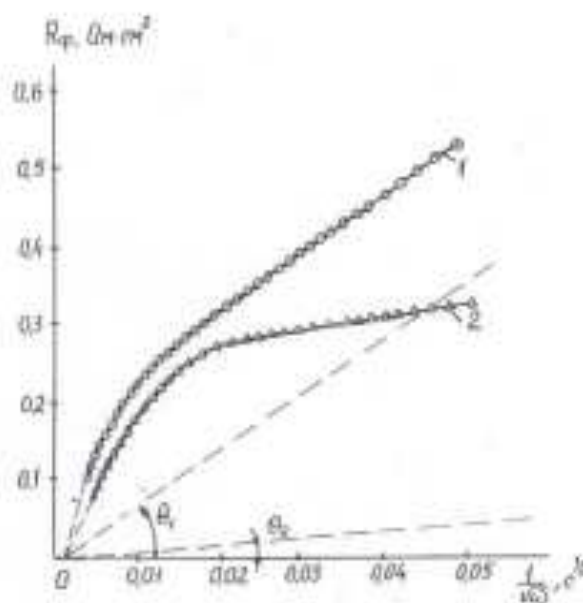


Рис. 9. Зависимость активной составляющей R_ϕ фарадеевского импеданса серебряного электрода от $1/\sqrt{\omega}$ при потенциале $-0,8$ В; $t = 20$ °С:

1 –раствор серебрения без добавки; 2 – раствор серебрения с добавкой УДА -2г/л

Активное сопротивление R_ϕ уменьшилось за счет снижения диффузионной составляющей импеданса. Сопротивление, характеризующее затруднения химической реакции, практически не изменилось. УДА, разрыхляя пассивирующую коллоидную фазу, делают её более проницаемой для разряжающихся ионов серебра. Диффузионные затруднения, характеризующиеся тангенсом угла наклона ($\text{tg}\Theta$) пунктирной прямой (рис. 9) у процесса восстановления ионов серебра, снижаются. В электролите без добавки УДА диффузионные затруднения характеризовались тангенсом угла наклона пунктирной прямой $\text{tg}\Theta_1$, при введении УДА тангенс угла наклона прямой уменьшился до $\text{tg}\Theta_2$. Тангенс угла наклона прямой связан с кинетическими параметрами диффузионного процесса формулой [8]:

$$\operatorname{tg}\theta = \frac{RT}{(zF)^2\sqrt{DC}} \quad (5)$$

где R – универсальная газовая постоянная (Дж/моль град К); T – температура, К; z – число электронов, участвующих в катодном процессе восстановления ионов серебра; F – число Фарадея (кул); D – коэффициент диффузии ионов серебра ($\text{см}^2/\text{с}$); C – концентрация ионов серебра в растворе ($\text{моль}/\text{см}^3$).

Определив тангенс угла наклона для диффузионного процесса, можно найти коэффициент диффузии восстанавливающихся на катоде ионов серебра. В растворе серебрения без добавки коэффициент диффузии ионов серебра имел значение $2,38 \cdot 10^{-8} \text{ см}^2/\text{с}$. В растворе с добавкой УДА коэффициент диффузии значительно возрос и составил величину $1,51 \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$.

Серебряные покрытия, полученные из электролита с ультрадисперсными алмазами, обладают повышенной микротвердостью (рис. 10).

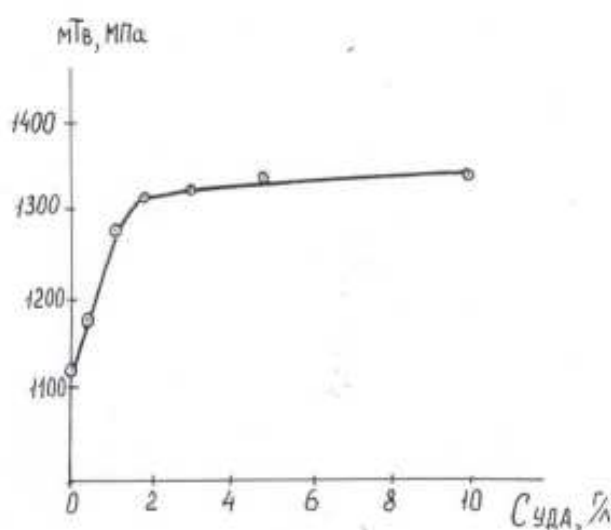


Рис. 10. Влияние концентрации УДА в электролите серебрения на микротвёрдость серебряного осадка

Серебряное покрытие, полученное из дициано-аргентатно-роданистого электролита без добавки ультрадисперсных алмазов, имело микротвердость 1110 МПа. С введением в электролит добавки УДА до 2 г/л микротвердость серебряного покрытия возрастала до 1310 МПа. Дальнейшее увеличение концентрации добавки практически не оказало влияние на микротвердость серебряных покрытий. Поэтому оптимальной концентрацией УДА в электролите серебрения можно считать 2 г/л.

Исследования по износостойкости серебряного покрытия и покрытия с УДА проводились на установке, обеспечивающей возвратно-поступательное движение образца. Трущаяся пара представляла собой латунный диск диаметром 10 мм, с нанесенным на него гальваническим серебряным покрытием, который перемещался по неподвижной плоскопараллельной стальной пластине, размером 20×70 мм, покрытой твердым хромом. Число возвратно-поступательных движений в час составляло 1500. В качестве нагрузки на диск использовалась съемная гиря весом 150 г. Одновременно на установке истирались по 2 диска. Износостойкость покрытия определялась весовым методом по убыли массы диска за время истирания, которое составляло 20 ч. Каждый час истираемые диски с покрытием и пластины протирались спиртом, удаляя с поверхности продукты истирания. Расчет износостойкости проводили на величину половины привеса диска, поскольку истирается одна плоскость. Результаты исследований по износостойкости серебряного покрытия представлены в таблице.

Таблица

Влияние УДА на износостойкость серебряных покрытий

Концентрация УДА, г/л	0		1,0		2,0		5,0	
	1	2	3	4	5	6	7	8
Привес (г) (серебряное покрытие)	0,0174	0,0176	0,0177	0,0178	0,0206	0,0207	0,032	0,033
0,5 привеса	0,0087	0,0088	0,0089	0,0089	0,0103	0,0103	0,016	0,016
Потери массы серебряного покрытия при истирании в течение 20 ч, (г)	0,0007	0,0008	0,0003	0,0003	0,0002	0,0003	0,0004	0,0004
Потери массы при истирании серебряного покрытия, (%)	8,0	9,0	3,3	3,3	1,9	2,9	2,5	2,5
Среднее значение потери массы серебряного покрытия при истирании, (%)	8,5		3,3		2,4		2,5	

Исследования на износостойкость показали, что самая высокая убыль массы при истирании образцов наблюдается на образцах с серебряным покрытием, полученным в электролите без УДА. Потери массы составили 8,5 %, покрытие с УДА 1 г/л – потери массы 3,3%, с УДА 2 г/л – потери массы 2,4 %, с УДА 10 г/л – 2,5 %. Можно сделать вывод, что, введение в электролит ультрадисперсных алмазов повышает износостойкость серебряного покрытия примерно в 2,5 раза. Оптимальная концентрация УДА в электролите – $1 \div 2$ г/л.

Электропроводящие свойства серебряного покрытия практически не изменялись. Удельное объёмное электрическое сопротивление находилось в пределах $2,0 - 2,3 \cdot 10^{-6}$ Ом см при температуре 15-35 °С, рассеивающая способность электролита также не изменялась и составляла 68 %. Ухудшение паяемости серебряного покрытия не наблюдалось.

Библиографический список

1. Емельянов, В.А. Выбор покрытий для корпусов интегральных схем / В.А. Емельянов, А.П. Достанко, В.Л. Ланин, А.А. Хвиль // Электронная техника. Сер. 7.Технология, организация производства и оборудование. 1987. Вып. 1 (140).
2. Буркат Г.К. Серебрение, золочение, палладирование и родирование / Г.К. Буркат. – Л.: Машиностроение, 1984. – 86 с.
3. Вячеславов, П.М. Гальванотехника благородных и редких металлов / П.М. Вячеславов, С. Я. Глирихес, Г.К. Буркат. – Л. Машиностроение, 1970. – 248 с.
4. Хвиль, А.А. Формирование износостойких композиционных электрохимических покрытий на основе серебра с УДА / А. А. Хвиль, Л. К. Кушнер, И. И. Мушовец // Материалы, технологии, инструменты. 1998. Т 3. № 2.
5. http://www.saveplanet.su/tehno_388.html
6. Галюс, З. Теоретические основы электрохимического анализа / З. Галюс. – М.: Мир, 1974. – 550 с.
7. Дамаскин, Б.Б. Принципы современных методов изучения электрохимических реакций / Б.Б. Дамаскин. М.: МГУ, 1965. – 213 с.
8. Феттер, К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М.: Химия, 1967. – 855 с.

9. **Лурье, Ю.Ю.** Справочник по аналитической химии / Ю.Ю. Лурье. – М.: Химия, 1967. –390 с.
10. **Буркат, Г. К.** Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике / Г. К. Буркат, В. Ю. Долматов // Физика твердого тела. 2004. Т. 46. Вып. 4. С. 685–692.
11. **Сайфуллин, Р. С.** Неорганические композиционные материалы / Р. С. Сайфуллин. – М.: Химия, 1983.
12. **Андропов, Л.И.** Композиционные электрохимические покрытия и материалы / Л. И. Андропов, Ю. Н. Лебединская. – Киев: Техника, 1986.
13. **Беленков, Е. А.** Наноалмазы и родственные углеродные наноматериалы. Компьютерное материаловедение / Е. А. Беленков, В. В. Ивановская, А. Л. Ивановский. – Екатеринбург: УрО РАН, 2008.
14. **Долматов, В. Ю.** Получение и свойства электрохимических композиционных покрытий благородными и цветными металлами с ультрадисперсными алмазами детонационного синтеза / В. Ю. Долматов [и др.] // Сверхтвердые материалы. 2002. № 2. С. 52–57.
15. **Долматов, В. Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза как основа нового класса композиционных металл-алмазных гальванических покрытий / В.Ю. Долматов, Г. К. Буркат // Сверхтвердые материалы. 2000. № 1. С. 84–95.
16. Galvanica.su –гальваника, строительство и обработка поверхности – Windows Internet Explorer Ультрадисперсные алмазы в гальванотехнике. Специальное конструкторско-технологическое бюро. Технолог Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета).

*Дата поступления
в редакцию: 15.04.2014*

A.V. Isaev, T.A. Zhirnova¹, M.G. Mikhaleiko, V.V. Isaev, V.V. Bakaev²

THE INFLUENCE OF ULTRADISPERSED DIAMONDS ON CATHODIC DEPOSITION OF SILVER

Scientific research institute of measuring systems n. a. Y.E. Sedakova, N.Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev²

Considered kinetic features electroplate silvering of low electrolyte, the influence of additives of ultradispersed diamonds on kinetic features of cathodic deposition of silver. It is established that on the cathode surface the formation of passivating colloidal phase consisting of AgCN and AgCNS, shielding cathode. Introduction to the electrolyte copper ultradispersed diamonds leads to loosening colloidal phase and facilitates cathode reduction of silver ions. Ultradispersed diamonds, including the silver coating, increase the hardness and wear resistance.

Key words: silvering, cathodic deposition, kinetic features, superdispersed diamonds.

УДК 620.197

В.И. Наумов, В.И. Чумаков, А.А. Дородницына, А.Д. Самсонова

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА БАРЬЕРНОГО И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО МЕХАНИЗМОВ ПРИ АНТИКОРРОЗИОННОЙ ЗАЩИТЕ СТАЛЕЙНижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «Химсинтез», г. Дзержинск

Проведены исследования по выявлению закономерностей коррозионных свойств цинковых и цинк-алюминиевых ламельных покрытий, осажденных на сталь в камере солевого тумана в 5%-ном растворе NaCl. Показано, что цинковые покрытия, содержащие алюминий, являются более коррозионно-стойкими, чем чисто цинковые. Проведены исследования по влиянию природы и концентрации наполнителей цинка, алюминия и никеля на основе неорганического и фторопластового связующего на формирование защитных свойств ламельных покрытий на стали. Показано, что в зависимости от природы металла-наполнителя меняется соотношение барьерных и протекторных свойств. Разработана методика и определены вклады электрохимического и барьерного механизмов защиты от коррозии на различного вида ламельных и ламельно-порошковых покрытиях.

Ключевые слова: ламельные покрытия, цинк, цинк-алюминий, коррозия.

Ущерб от коррозии выражается в потере металла или выходе из строя конструкций, которые часто ведут к остановке производств, людским потерям и возникновению транспортных проблем.

Методы борьбы с коррозией разнообразны. Наиболее часто в качестве защитных антикоррозийных покрытий используются цинковые, нанесенные различными способами на поверхность стали, покрытия. Широкое распространение цинка, как протектора, связано с тем, что это доступный и недорогой металл, имеющий отрицательный стандартный потенциал ($E^{\circ} = -0,76$ В), что обеспечивает катодную защиту покрываемых им сталей, а трудно растворимые продукты коррозии цинка дополнительно тормозят процесс коррозии сталей за счет барьерного механизма.

Соотношение вкладов этих механизмов в разных условиях могут меняться, и разработчикам покрытий приходится путем проб и ошибок подгонять составы покрытий, чтобы обеспечить максимальную защитную способность пленок.

Это связано с тем, что методика определения количественной оценки вкладов барьерного и электрохимического механизмов в осуществлении антикоррозионной защиты сталей в настоящее время отсутствует. Тем не менее, значения этих величин важны при разработке эффективных защитных покрытий и прогнозирования их свойств. По этой причине постановка данной работы является актуальной и практически полезной.

В качестве объектов исследования были выбраны антикоррозионные ламельные (чешуйчатые) покрытия на основе цинка, которые в последние десятилетия в ряде производств занимают доминирующие позиции из-за комплекса положительных свойств: высокие защитные характеристики, простота технологии нанесения и отсутствие наводораживания основы, возможность обработки сложно профилированных деталей [1,2].

Основу ламельных покрытий составляет трехмерная матрица-сетка связующего вещества, пространство внутри которой заполняется металлическим наполнителем. В качестве наполнителя используются чешуйки цинка, алюминия и других металлов и их смесей с различным содержанием цинка.

Методика эксперимента

В качестве основы для нанесения покрытий использовали стальные пластины размером 50 x 70 мм. Перед нанесением покрытий подложки травили в соляной кислоте (1:1), обезжиривали в щелочном растворе, промывали в воде и сушили до полного удаления влаги.

Цинксодержащую суспензию готовили в 1,5 л смесителе в условиях перемешивания со скоростью 300 - 1500 об/с, зависящей от состава суспензий и природы связующего.

В смеситель вводили расчетное количество связующего тетрабутоксититана и (или) раствор фторопласта - Ф32Л и растворителя этилацетата, после чего смесь перемешивали до однородного состояния. В случае применения фторполимерного связующего, предварительно готовили 20%-ный раствор фторопласта Ф32Л в этилацетате. В ряде случаев для обеспечения необходимой вязкости суспензии, для предотвращения быстрого расслоения композиции и выпадения в осадок металла, а также для лучшего распределения ламелей или порошков в суспензии добавляли разбавители и различные добавки: реологические, например, МРА-60Х, водопоглощающие (Syloid – ZN-1 или SiO₂), диспергирующие (Dispebyk 182).

Количество растворителя вводили до уровня вязкости раствора, отвечающей истечению суспензии из капилляра вискозиметра, равной 28 - 31 с для суспензий на основе титан органического и 43-45 с на основе фторполимерного связующего.

Контроль вязкости суспензии проводили с помощью вискозиметра DIN № 3 с диаметром сопла 3 мм по ГОСТ 9070-75 [3] по времени истечения раствора.

При высокой вязкости проводили корректировку суспензии путем добавления разбавителей (циклогексанон, ксилол или метоксипропилацетат). Если вязкость соответствовала требуемым значениям, суспензию использовали для нанесения покрытий.

При приготовлении суспензий не допускалось попадание в нее влаги, так как это приводило к преждевременному гидролизу неорганических связующих и желированию раствора. Для уверенности, что связующее не зажелирует перед нанесением на основу в композицию в количествах 0,5 - 2,0 % от массы металла-наполнителя вводили водопоглощающую добавку, предотвращающую преждевременный гидролиз связующих:



После гомогенизации суспензии в условиях перемешивания последовательно вводили навески цинковых или цинковых и алюминиевых, ламелей, а в некоторых особо оговоренных случаях - смеси ламелей и порошков Zn, Al и Ni. Однородность композиции оценивали визуально на наличие комков и сгустков.

Цинксодержащие ламельные покрытия наносили на поверхность стальных деталей путем окунания в высокодисперсную суспензию, состоящую из растворителя органического происхождения, связующего материала, цинковых, алюминиевых ламелей или порошков. Толщины покрытий обычно составляли 18 - 20 мкм.

Далее образцы направлялись на термообработку, которую осуществляли в три этапа: а) 15 мин выдержка при 50 °С; б) разогрев в течение 15 мин от 50 до 230 °С; в) выдержка при 230 °С в течение 15 мин. Подобная термообработка необходима для испарения растворителя, гидролиза титанорганических и их полимеризации. В результате полимеризации на поверхности образуется сетка титаноксидных стекол, наполненная металлом (рис. 1). Помимо неорганического связующего использовали и фторопласт марки Ф32Л (сополимер трифторхлорэтилена и фтористого винилдиена), способного растворяться в этилацетате.

Более подробно используемая методика нанесения покрытий и исходные компоненты суспензий для нанесения покрытий описаны [4 - 6].

При термоотверждении связующих, содержащих титан- или кремнийорганические соединения, в самом общем виде могут наблюдаться следующие процессы: а) испарение растворителя; б) реакции гидролиза (за счет влаги, содержащейся в атмосфере и растворителе); в) поликонденсации с образованием трехмерной сетки оксидов посредством связей -Ti-O-Ti- [7,8].

Для определения времени защитной способности и оценки вкладов механизмов защитного действия покрытий, были проведены коррозионные исследования в камере солевого тумана в 5%-ном растворе NaCl при T = 20 ± 2 °С по ГОСТ 9.308-85 [9] двумя способами: а) делали крестообразный разрез покрытия до металла основы и выдерживали в камере до появления следов коррозии основы (так называемой красной коррозии); б) аналогично коррозионным измерениям подвергались образцы и с не нарушенным покрытием [4-6].

Толщину покрытий контролировали с помощью толщиномера «Константа К5» по ГОСТ Р 51694-2000 [10].

Для изучения структуры покрытия использовали сканирующий растровый электронный микроскоп - TESCAN VEGA II.

Результаты и обсуждение

Предварительно было выяснено, что изменение размеров lamelл в пределах 10–25 мкм (промышленно выпускаемые lamеллы) с удельной поверхностью 1,0–1,3 м²/г практически не оказывают влияния на защитную способность покрытий и главную роль в обеспечении защитных свойств покрытий играет плоская форма чешуек, определяющая слоистую укладку lamелл, расположенных параллельно поверхности подложки (рис. 1).

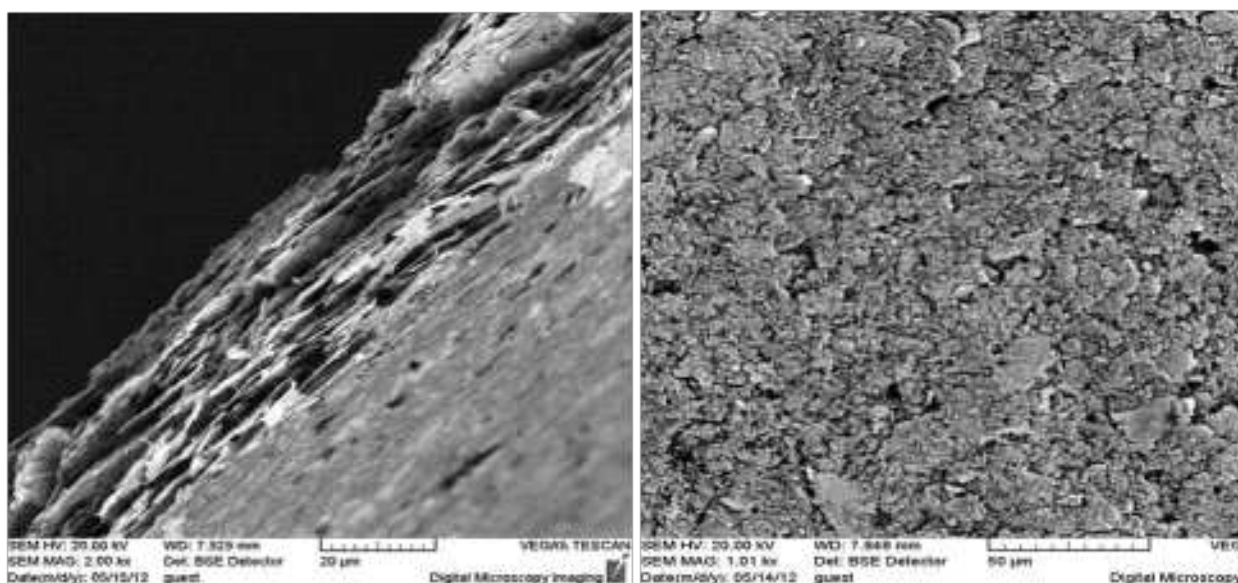


Рис. 1. Микрофотографии поверхности и шлифа цинкламельного покрытия, осажденного с помощью титанатного связующего на сталь

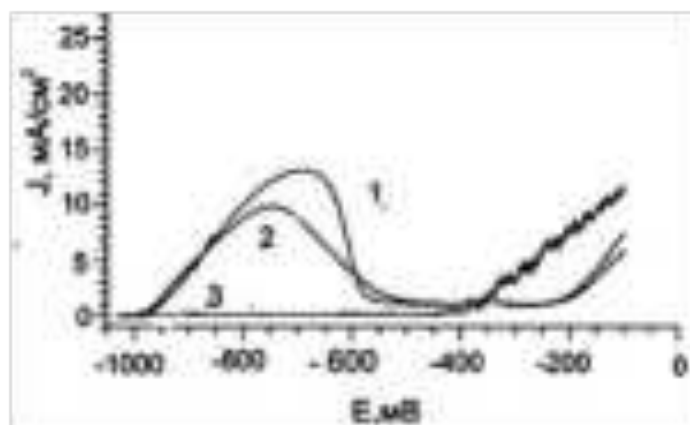


Рис. 2. Реакции, приводящие к образованию связей -Fe-O-Ti-O-Zn-

Упрощенная схема строения цинкламельного покрытия представлена на рис. 2. На этом рисунке не показаны сквозные и закрытые поры, которые обычно присутствуют в покрытиях и способствуют проникновению электролита и окислителя (кислорода или H⁺) к металлу – основе. Только в этом случае может реализоваться гальванопара Fe/электролит/Zn, где цинк является протектором по отношению к стали.

Если поры и дефекты в покрытии отсутствуют (гипотетический вариант), то реализу-

ется исключительно барьерный механизм защиты от коррозии, так как доступ электролита к основе невозможен, а поставка кислорода или ионов электролита через беспористую пленку крайне мала из-за низких коэффициентов диффузии в твердой фазе.

На рис. 3 представлены зависимости времени появления коррозии основы на Zn и ZnAl на ненарушенных (кр.1) и крестообразно надрезанных (кр.2) цинксодержащих ламельных покрытиях. Видно, что добавление 3 % алюминия к цинку приводит к резкому росту защитной способности покрытий в 8-9 раз, что сопровождалось заметным снижением визуально наблюдаемых продуктов коррозии цинка (белая коррозия).

Из рис. 3 следует, что ненарушенные покрытия, содержащие только цинковые ламели $[Al] = 0\%$ защищают основу в течение 500 ч и на поверхности покрытия фиксируются следы белой коррозии цинка. Цинковые покрытия, содержащие $\geq 3\%$ алюминия с не нарушенной поверхностью, выдержали 4000 ч в камере солевого тумана и при этом продукты коррозии цинка наблюдались лишь в следовых количествах.

Пунктир на рис. 3 соответствует защитной способности для $[Al] > 3\%$ и по своей сути не является пределом, так как через полгода коррозионные испытания нами были остановлены из-за превышения требований промышленности по защитным свойствам подобных покрытий более чем в шесть раз.

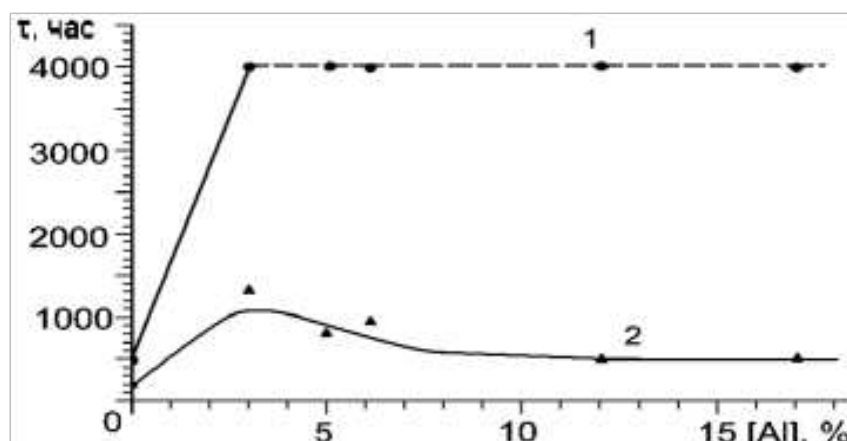


Рис. 3. Зависимость времени до появления красной коррозии основы на Zn и ZnAl ненарушенных (кривая 1) и нарушенных (кривая 2) покрытиях от содержания Al (масс. %)

Детали с надрезанными ламельными покрытиями ведут себя несколько иначе. Время появления коррозии основы с чисто цинковым покрытием наступает через 100 ч. Добавление в покрытие алюминия коррозия в интервале концентраций $[Al] = 3 - 17\%$ приводит к увеличению времени наступления коррозии основы до 500-1000 ч.

Установлено, что зафиксированные столь большие эффекты в защитной способности Zn-Al покрытий при малых концентрациях ($Al = 3\%$) связаны с несколькими причинами: 1) удельная поверхность цинковых ламелей равна $\sim 1 \text{ м}^2/\text{г}$, а алюминиевых – $\sim 8 \text{ м}^2/\text{г}$. Большие размеры алюминиевых ламелей перекрывают некоторую часть промежутков между цинковыми ламелями, что снижает пористость покрытий; 2) образующиеся продукты коррозии алюминия приводят к закупориванию пор в покрытии, что затрудняет транспорт окислителей (кислорода и ионов H^+) и электролита к поверхности стальной подложки.

Результаты проведенных коррозионных испытаний покрытий с различными типами металлического наполнителя и связующего в виде титаноксидных связующих (ТОС) приведены в табл. 1.

Из данных табл. 1 следует: 1) что цинкламельные ненарушенные покрытия обладают в 9 раз меньшей защитной способностью, чем ламельные покрытия на основе смеси чешуек цинка и алюминия; 2) покрытия на основе смеси цинковых и алюминиевых ламелей обладают большей защитной способностью, чем ламели, изготовленные из металлургического

сплава того же элементного состава. Это связано с тем, что в процессе коррозии цинка поверхностный слой сплава 93Zn7Al обогащается алюминием и его продуктами коррозии и, начиная с какого-то момента, цинк полностью блокируется ими, в результате чего он перестает работать в качестве протектора. Это подтверждается тем, что на анодных потенциодинамических I, E-кривых тока растворения цинка практически отсутствуют (рис. 4); 3) введение цинкового порошка до определенного предела приводит к росту защитной способности из-за заполнения межламельных пустот цинковым порошком. Наилучшие результаты наблюдаются для составов цинковые ламели : порошок = 50:50. 4) дальнейшее увеличение доли цинкового порошка в ламельном покрытии вплоть до полной замены цинковых ламелей на порошок приводит к увеличению количества пор в покрытии и резкому снижению защитной способности покрытий; 5) ламельные покрытия, изготовленные из смеси цинковых ламелей и алюминиевой пудры, имеют более низкую защитную способность покрытий по сравнению с покрытиями, состоящими из смеси ламелей цинка и алюминия, так как большое количество продуктов коррозии алюминиевого порошка блокирует поверхность цинковых ламелей и уменьшает количество электрохимически активного цинка в покрытии.

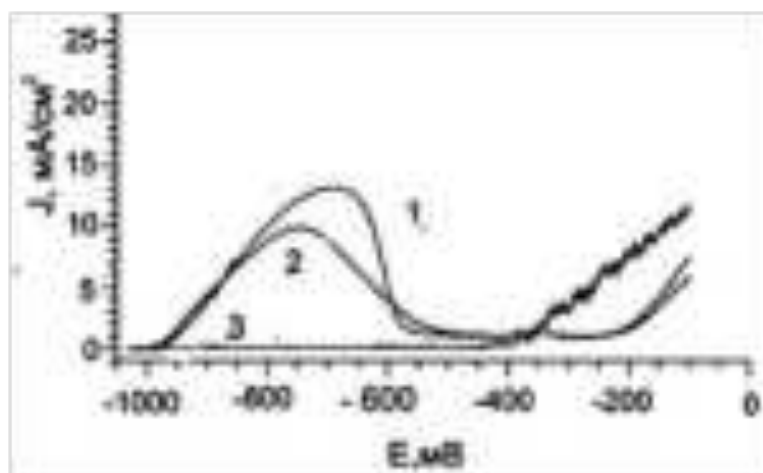


Рис. 4. Анодные потенциодинамические кривые Zn и Zn-Al покрытий в 5 % NaCl:

1 – цинк-ламельное покрытие (90 % Zn в покрытии); 2 – смесь Zn и Al ламелей (82 % Zn и 10 % Al); 3 – ламели из металлургического сплава 93Zn7Al

В работе [11] с помощью сканирующего электронного микроскопа, снабженного анализатором элементного состава, показано, что в присутствии ионов хлора в слабокислых и нейтральных растворах на поверхности алюминия, наряду с Al_2O_3 и $Al(OH)_3$, образуются комплексы $[Al(H_2O)_y]_{адс}$, которые блокируют поверхность подложки и цинкового протектора.

Исследования по коррозионной стойкости смешанных ламельно-порошковых Zn-Ni покрытий (Zn – ламель, Ni – порошок; Ni ламели промышленностью не выпускаются) показали, что защитная способность Zn-Ni покрытий в соляном тумане немного ниже цинковых, и значительно ниже Zn-Al ламельных покрытий. Это связано с тем, что никель имеет более положительный стандартный потенциал ($E^0 = -0,25$ В) и по отношению к железу ($E^0 = -0,44$ В) не проявляет протекторных свойств, а образующие оксиды или гидроксиды никеля менее плотные и химически устойчивые, чем оксид алюминия.

До наших работ никто и никогда не проводил количественную оценку вкладов электрохимического и барьерного механизмов в коррозионном процессе и все оценки проводили только на качественном уровне (на уровне больше или меньше).

При разработке методики количественной оценки вкладов электрохимического и барьерного механизмов в коррозионном процессе мы исходили из следующих предпосылок. Искусственно нарушенное (надрезанное) покрытие на не легированных углеродистых сталях и чугунах может защищать подложку только за счет протектора, так как продукты коррозии

железа не являются плотно покрывающими. На ненарушенных покрытиях действуют оба механизма защиты - протекторный и барьерный.

Таблица 1

Коррозионная стойкость покрытий с различными металлическими наполнителями

Тип металлического наполнителя	Коррозионная стойкость на ненарушенных покрытиях, ч	Коррозионная стойкость на покрытиях с разрезом, ч	Вклад протекторного механизма защиты	Вклад барьерного механизма защиты
Ламели на основе металлургического сплава ZnAl7 %	1032	264	26	74
Цинковые ламели 100%	456	360	79	21
Цинковая пыль 100 %	144	96	67	33
Смесь цинковой пыли и цинковых ламелей 50:50	792	720	91	9
Смесь Zn и Al ламелей (Al 3 %)	4000	1200	30	70
Цинковые ламели и алюминиевая пудра (7 %)	240	196	30	70
Цинковые ламели и никелевый порошок (15%)	408	244	60	40

Для оценки вклада протекторного механизма коррозионной защиты следует найти соотношение времени до момента появления красной коррозии на надрезанных покрытиях (протекторная защита) ко времени появления коррозии на ненарушенных образцах (протекторная и барьерная защиты):

$$\gamma_{\text{пр.}} = \tau_{\text{нар}}/\tau_{\text{ненар.}} \quad (2)$$

Для оценки барьерного механизма соответственно следует использовать соотношение:

$$\gamma_{\text{бар.}} = 1 - \gamma_{\text{пр.}} \quad (3)$$

Такая оценка нами была проведена для покрытий разной природы (табл. 1).

Из табл. 1 следует, что на ламельных и порошковых цинковых покрытиях доминирующим является протекторный механизм защиты, так как $\gamma_{\text{пр.}} = 67 - 91 \%$, а на Zn-Al покрытиях преобладающим является барьерный механизм ($\gamma_{\text{пр.}} = 27 - 30 \%$; $\gamma_{\text{бар.}} = 70 - 73 \%$), что согласуется с качественными выводами, полученными ранее на основе электрохимических измерений [4,5]. Значения времен защитного действия нарушенных и ненарушенных Zn - Ni покрытий позволили определить вклады протекторного (56 %) и барьерного (44 %) механизмов защиты для этого вида покрытий. Оказалось, что вклады барьерного механизма для Zn - Ni ниже соответствующих величин для Zn-Al покрытий (30 и 70 % соответственно), что подтверждает меньшую блокирующую эффективность продуктов коррозии никеля, по сравнению с продуктами коррозии алюминия.

Оценка вкладов цинковых и цинк-алюминиевых ламельных покрытий на основе фторопластового связующего (фторполимер Ф32Л), который, как известно [12], характеризуется очень высокой пористостью и низкими значениями адгезии к продуктам коррозии цинка и

алюминия, показала, что в обоих случаях доминирующим оказывается протекторный механизм защиты ($\gamma_{\text{пр}} \sim 83-88\%$) (см. табл. 2). Это связано с тем, что из-за низкой адгезии фторполимера, большая часть продуктов коррозии цинка и алюминия смывается конденсатом солевого тумана в коррозионной камере с поверхности покрытия и вымывается из его пор.

Этот тезис подтверждается следующим. Электрохимические измерения, проведенные с помощью анодных потенциодинамических кривых, показали, что во фторполимерном связующем первоначально заблокированный продуктами коррозии алюминия цинк со временем вовлекается в процесс катодной защиты стали, так как продукты коррозии смываются конденсатом соевого тумана. Об этом же свидетельствуют и данные по вкладам: в отсутствие Al вклад протекторной защиты цинковых покрытий на основе фторполимера равен 88 % (строка 1, табл.2), а в его присутствии – 83 % из-за того, что содержание Zn в чисто цинковом покрытии составляет 85 масс %, а в Zn-Al покрытиях его количество равно 80 %.

Расчет показывает, что отношения вкладов протекторной защиты цинковых и цинк-алюминиевых с не нарушенной поверхностью покрытий $\gamma_{\text{пр}}^{\text{Zn}}/\gamma_{\text{пр}}^{\text{Zn-Al}} = 1,06$ точно соответствует отношению масс заложенного в этих покрытиях цинка $m_{\text{Zn}}/m_{\text{Zn-Al}} = 1,06$.

Совместное использование в качестве связующих фторполимера Ф32Л и титаноксидных стекол в покрытии приводит к росту количества продуктов коррозии алюминия, блокирующих поверхность протектора - цинка, так как снижается доля фторполимерного связующего в покрытии, характеризующегося низкой адгезией к продуктам коррозии алюминия.

В то же время, замена цинковых ламелей на цинковый порошок до определенного предела (50 %), в условиях постоянства количества цинка в пленке приводит к росту времени защитного действия нарушенных и ненарушенных покрытий. При этом вклады протекторного механизма не меняются (сравни строки 4 и 5 табл. 2), так как количество протектора-цинка в этом случае остается постоянным.

Таблица 2

Защитные свойства Zn и Zn-Al покрытий на фторполимерной основе

Состав покрытий, в масс. %	Время появления коррозии на образцах с разрезом, ч	Время появления коррозии на образцах без разреза, ч	Вклад протекторной защиты, в %	Вклад барьерного механизма защиты, в %
Цинк-ламель - 83 Ф32Л - 17	172	196	88	12
Цинк-ламель - 80,0 Алюминий - 5 Ф32Л - 15	1000	1200	83	17
Цинк-ламель - 62,5 Алюминий- 6,25 Ф32Л - 6,25 ТОС -25,0	840	1296	65	35
Цинк-ламель - 37,5 Цинк-порошок- 25,0 Алюминий - 6,25 Ф32Л - 6,25 ТОС -25,0	892	1382	65	35

Таким образом, разработанная методика количественного определения вкладов протекторного и барьерного механизмов дает разумные результаты, согласующиеся с электрохимическими измерениями и проведенными расчетами, и может быть использована при разработке новых видов протекторных защитных покрытий на не легированных сталях и чугунах, на которых продукты коррозии железа не образуют плотно покрывающие барьерные пленки на подложке.

Библиографический список

1. **Окулов, В.В.** Цинкование. Техника и технология / В.В. Окулов; под ред. В.Н. Кудрявцева. – М.: Глобус, 2008. – 252 с.
2. **Зильберштейн, И.Л.** Неэлектролитическое ламельное цинковое покрытие / И.Л. Зильберштейн, Л.М. Новоселова // Гальванотехника и обработка поверхности, 2006. Т. 14. № 4. С. 9–11.
3. ГОСТ 9070-75. Вискозиметры для определения условной вязкости лакокрасочных материалов. Технические условия. – М.: Изд-во госстандартов, 1975.
4. **Чумаков, В.И.** Антикоррозионные свойства цинковых и цинк-алюминиевых ламельных покрытий на стали / В.И. Чумаков [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 2012. Т. 20. № 1. С. 17–22.
5. **Чумаков, В.И.** Зависимость свойств ламельных цинковых покрытий на стали от природы и концентрации связующих / В.И. Чумаков [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 2013. Т. 21. №1. С. 31–37.
6. **Чумаков, В.И.** Осаждение антикоррозионных цинк-ламельных покрытий на фторполимерной основе / В.И. Чумаков [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 2013. Т. 21. №3. С. 34–39.
7. **Фролов, В.В.** Химия / В.В. Фролов. – М.: Высш. шк., 1979. – 559 с.
8. Металлополимерные материалы и изделия / под ред. В. А. Белого. – М., 1979. – 310 с.
9. ГОСТ 9.308-85. Покрытия металлические и неметаллические неорганические, методы ускоренных испытаний. – М.: Изд-во госстандартов, 1985.
10. ГОСТ Р 51694-2000. Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. – М.: Изд-во госстандартов, 2000.
11. **Борисенкова, Т.А.** Анодное поведение алюминия в нейтральных электролитах различного анионного состава / Т.А. Борисенкова, С.А. Калезина // Конденсированные среды и межфазные границы. 2009. Т. 11, 32. С. 106–109.
12. **Кирюхин, Д.П.** Радиационно-химический синтез теломеров тетрафторэтилена и их использование для создания тонких защитных фторполимерных покрытий / Д.П. Кирюхин [и др.] // Рос.хим. ж. (Ж. Рос. хим. об-ва им. Д.И. Менделеева). 2008. Т. LI. № 3. С. 66–72.

*Дата поступления
в редакцию: 15.04.2014*

V.I. Naumov, V.I. Chumakov, A.A. Dorodnizina, A. D. Samsonova

QUANTITATIVE ASSESSMENT OF BARRIER AND ELECTROCHEMICAL MECHANISMS FOR ANTICORROSIVE PROTECTION OF STEEL

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
SLL «Himsintez», Dzerzhinsk

Studies have been conducted to reveal regularities of corrosive properties of zinc and zinc - aluminum flake coating deposited on steel. It is shown that zincaluminium flake coating are more corrosion resistant than pure zinc coating. Investigated the impact of the nature and concentration of zinc, aluminum and nickel flake in coatings based on inorganic and fluoropolymer binder on protective properties on steel. It is shown that depending on the nature of the metal changing the balance between the barrier and protective properties. The evaluation method was developed and defined participation electrochemical and barrier protection against corrosion on the various types of flake-powder coatings.

Key words: flake, coating, zinc, zinc-aluminium flake, corrosion

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 336

С.Б. Вдовина, И.С. Труфанова

МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ ИНТЕГРИРОВАННЫМИ ЦЕПЯМИ ПОСТАВОК

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена модель организации интегрированной цепи поставок. Предлагается задача внедрения модели.

Ключевые слова: интеграция, организация, управление, цепь поставок, моделирование, бизнес-процесс.

Введение

В настоящее время цепи поставок приобретают глобальный характер, все участники связаны воедино с помощью информационных систем, координирующих каждый этап совместной деятельности, работу логистической инфраструктуры и управление поставками промышленной продукции на мировой рынок. Современный глобальный, как правило, зрелый рынок данного промышленного продукта характеризуется высоким уровнем конкуренции. Возникла потребность в полностью координированном и интегрированном подходе к управлению цепями поставок. Это обусловлено, в первую очередь, действием принципа массовой индивидуализации заказов потребителей и стремлением к глобальной оптимизации общих логистических затрат.

Традиционная (функциональная) логистика, решающая задачи размещения производства, складов, потребителей и моделирующая цепи поставок с целью оптимизации затрат и сроков выполнения заказа, сегодня – неактуальна. Требуется новый принципиальный подход, основанный на логистическом механизме интегрированного управления саморегулируемыми предприятиями, образующими интегрированные цепи поставок (ИЦП). Он обеспечивает переход от вертикальной интеграции к сетевой интегрированной логистической среде, основанной на информационном взаимодействии всех ее участников.

Механизмом интеграции является методология логистики, позволяющая с позиции единого целого проектировать, анализировать и интегрировать на разных уровнях (глобальном, макро-, мезо- и микро-) производственно-коммерческие и финансовые структуры. Сущность указанной методологии заключается в проектировании оптимальной сетевой структуры ИЦП.

Предмет исследования – организация и управление межрегиональными и межотраслевыми цепями поставок промышленной продукции. Субъект исследования – промышленное предприятие как центральная, фокусная компания в интегрированной цепи поставок – инициатор внедрения концепции интеграции цепей поставок (SCM). Объект исследования – ИЦП конкретной продукции. Цель исследования (методологии) – создание конкурентоспособных гибких интегрированных цепей поставок.

Глобальная цель управления ИЦП – повышение эффективности, гибкости, возможности быстрого реагирования на потребительские запросы и устойчивости ИЦП, путем согласованных действий ее участников с целью реализации деятельности в глобальном масштабе,

на мировом рынке своей продукции. Стратегическая цель управления – добиться максимальной конкурентоспособности и рентабельности ИЦП.

Методологической основой построения ИЦП выступают системный, кибернетический и логистический подходы, а также эвристический подход, т.е. применение экспертных оценок, основанный на бенчмаркинге и профессионализме лиц, принимающих решения.

1. Условия и требования проектирования интегрированных цепей поставок

Интегрированный подход к проектированию оптимальных цепей поставок предполагает реализацию следующих условий:

- цепь поставок должна разрабатываться с позиции общей интеграции логистической деятельности, позволяющей работать без сбоев;
- все виды деятельности, не добавляющие ценности, должны устраняться;
- решения должны приниматься там, где они выполняются и теми, кто будет их выполнять;
- использовать современные информационные технологии, позволяющие реализовать совершенно новые решения, повышающие эффективность логистических операций;
- внедрять новые идеи с учетом показателей деятельности конкурентов и требований потребителей.

При проектировании интегрированных цепей поставок должны соблюдаться следующие требования:

1. Цепь поставок должна охватывать весь жизненный цикл продукта: «проектирование - эксплуатация - утилизация продукта».

2. Цели, поставленные командой управления цепями поставок при создании и планировании цепей поставок, должны быть измеримы и гармонизированы с бизнес-политикой и стратегией деятельности. Предприятие обязано иметь утвержденный порядок и процедуры, позволяющие измерять результаты функционирования цепей поставок. При этом необходимо учитывать постоянный рост требований потребителей к цепям поставок и своевременно вносить соответствующие изменения в практику управления ими.

3. Изменения, вносимые в бизнес-процессы, не должны нарушать целостности цепей поставок и ухудшать результативность их функционирования. В состав группы, проектирующей цепи поставок, должны входить полномочный представитель руководства предприятия, а также специалисты производственных и логистических служб, имеющих отношение к управлению потоковыми бизнес-процессами.

4. Результаты анализа и проектирования цепей поставок должны быть представлены в форме, позволяющей проводить дальнейшую проверку реализации требований, заявленных в проекте. При этом необходимо обеспечить условия для анализа предлагаемых компромиссных решений, касающихся цепей поставок и их вариантов, обеспечивающих сокращение общих затрат. При проектировании ИЦП учитываются мотивы потребителей, стратегии распределения продукции, характеристики продукции, уровень обслуживания потребителей, степень коммуникации с потребителем.

5. Процессы продвижения материальных потоков должны быть объектом логистического анализа, направленного на ликвидацию излишних звеньев и увеличение интенсивности этих потоков. Анализ функционирующих цепей поставок достигается путем их аудита (контрольных проверок), по результатам которых вносятся коррективы и рекомендации, нацеленные на повышение эффективности бизнес-процессов, получение синергетического эффекта и удовлетворение запросов потребителей товаров и услуг.

6. Предприятия-партнеры должны поддерживать осведомленность, компетентность и повышение квалификации своего персонала, выполняющего определенные бизнес-функции в цепях поставок. Предприятия также должны своевременно принимать меры по поддержке в рабочем состоянии и развитии логистической инфраструктуры: средства транспортировки, связи, грузопереработки, складское хозяйство, таможенные терминалы, торговые сети, аппаратное оборудование и информационные технологии.

7. Партнеры должны вести документацию по ИЦП, в состав которой следует включать: письменные заявления о политике и целях организации цепей поставок; описания процессов и процедур, входящих в эти цепи, порядок планирования и осуществления этих процедур; записи, фиксирующие ход процедур; требования по идентификации записей, их хранению, защите, восстановлению, изъятию, корректировке. Степень документированности цепей поставок предприятий различны и зависят от вида и объемов их деятельности, сложности взаимодействующих бизнес-процессов.

Стратегические преимущества вступления предприятия в ИЦП выражаются не только в возможности снижения общих затрат в цепи, но и в возможности специализации на ключевых процессах и передаче второстепенных видов деятельности другим партнерам в составе ИЦП. В то же время все члены ИЦП получают возможность повышения гибкости за счет устранения неэффективных видов деятельности, получения доступа к новым технологиям, знаниям, информационным системам.

2. Интегрированный подход к организации и управлению цепями поставок

Сущность интегрированного управления в условиях стратегического взаимодействия заключается в согласовании всеми участниками цепи поставок промышленной продукции ресурсов и показателей деятельности, жизненного цикла изделия, процессов разработки нового товара и технологии его изготовления, а также процессов продаж, производства, закупок и сервисного обслуживания потребителей.

Организация и управление ИЦП на основе интегрированного подхода базируется на реализации следующих принципов:

- интеграция функций – объединение и логическое согласование прежде разделенных функций;
- интеграция моделей – согласование и применение единых методов и моделей планирования и управления;
- интеграция данных в единой информационной базе данных;
- интеграция различных информационных систем и технологий в одну систему;
- интеграция структур цепей поставок - объединение и согласование ключевых бизнес-процессов с участниками ИЦП;
- интеграция стратегий – выработка единой согласованной логистической стратегии;
- интеграция организационных культур выделенных участников ИЦП.

Применение принципов интегрированного управления является одним из важнейших условий для повышения эффективности деятельности интегрированных цепей поставок и повышения их конкурентоспособности.

В интегрированной логистической системе все стратегические и тактические решения по поводу размещения инфраструктурной сети, складирования, упаковки, грузопереработки, транспортировки, управления запасами тесно взаимосвязаны и именно эта взаимосвязь составляет основу интеграции. Способность управлять интеграционным процессом столь же важна, как и способность создания инновационного товара.

Организация и управление бизнесом на основе стратегии интеграции выполняется поэтапно.

1. Интеграция всех партнеров цепи поставок для решения общих задач на основе организации межфирменных кооперационных отношений.

2. Моделирование и реинжиниринг ключевых бизнес-процессов.

3. Построение системы интегрированного планирования и управления.

4. Создание концепции информационных технологий для данной системы.

Основная задача второго этапа – построение структурной и функциональной модели деятельности ИЦП («как будет»), которая включает следующие процедуры:

- определение сетевой структуры (конфигурации) ИЦП;
- выделение ключевых процессов, требующих интеграции по всей цепи поставок;

- определение компонентов управления ИЦП для выявления степени интеграции и управления связей между процессами.

ИЦП – это линейно упорядоченное множество ее участников, образующих сеть. Под термином «структура» обозначают деловые отношения, обеспечивающие выполнение отдельных работ, которые в целом образуют законченный процесс в сети. Основными аспектами сетевой структуры фокусной компании являются: участники цепи поставок; структурные координаты сети; различные типы связи между процессами внутри компании.

Разные типы продукции требуют различной конфигурации цепей поставки, которые проектируются с учетом цены и характеристики продукции, ее доступности, рентабельности, типа потребительского спроса, уровня конкуренции и числа основных и вспомогательных участников ИЦП. К основным участникам относят все независимые компании или стратегические единицы, фактически выполняющие операционную и/или управленческую деятельность в ходе обслуживания конкретного потребителя или рынка. К вспомогательным (поддерживающим) участникам относятся компании, чье присутствие в цепи поставок ограничивается только предоставлением ресурсов, знаний, возможностей или активов основным участникам (лизинговая и страховая компании, банки, рекламное и кадровое агентства, консалтинговая и транспортная компании, логистические центры).

На каждом уровне цепи поставок могут присутствовать как основные, так и вспомогательные участники. При этом вспомогательные функции (организация сопутствующих потоков) могут выполнять как вспомогательные (специализированные) участники (аутсорсинг вспомогательных функций), так и основные участники (инсорсинг вспомогательных функций).

Термин «структура» помимо описания состава элементов системы предполагает описание соотношения их количественных характеристик. При описании структуры цепи поставок выделяют следующие структурные размерности цепи:

- число уровней цепи поставок – горизонтальная структура –, определяющая длинные или короткие цепи поставок;
- количество участников (поставщиков / потребителей) на каждом уровне (вертикальная структура) – узкие или широкие цепи поставок.

В качестве третьей размерности цепи выделяют «горизонтальное положение центральной компании в границах всей цепи поставок». Компания может находиться в начале цепи, т.е. близко к началу первичного источника поставок, или в конце цепи, т.е. близко к конечному потребителю, а также где-то в середине – между конечными точками всей цепи.

Конфигурация сети предопределяется системой управления запасами, которая, в свою очередь, вытекает из заданных стандартов сервиса потребителя. В нем указываются количественные параметры, например, показатель «идеального заказа» должен быть не ниже 98%. При проектировании и анализе цепей поставок выделяют следующие типы связей между процессами:

- управляемые – центральная компания интегрирует связи процессов с поставщиками и потребителями первого уровня и управляет ими;
- отслеживаемые связи процессов с потребителями и поставщиками второго, третьего и т.д. уровня;
- неуправляемые связи, от интеграции которых компания отказывается, делегируя полномочия по управлению другим компаниям;
- внешние связи с объектами, не входящими в цепь поставок.

Цепь поставок интегрирует в себе базовые бизнес-процессы и операции, связанные с удовлетворением запросов потребителей продукции и логистических услуг. Эти требования касаются сроков и полноты выполнения заказов, удобств их размещения, доступности запасов, частоты поставок, их надежности, качества используемой документации, порядка предъявления претензий, технической и технологической поддержки бизнес-процессов.

Успешное управление цепями поставок требует изменений и перехода от управления отдельными функциями к интегрированным видам деятельности, входящими в ключевые

бизнес-процессы, происходящие в цепях поставок. Процесс представляет собой совокупность видов деятельности, ориентированных на конечных потребителей (выполнение заказа) и предназначенных для оптимального управления материальными, сервисными, информационными и финансовыми потоками. В зависимости от специфики производства и рыночной ситуации в ИЦП целесообразно включать один ключевой процесс (выполнение заказа) или несколько процессов. Поэтому компания-лидер, инициатор интеграции должна тщательно проанализировать, какие ключевые процессы следует интегрировать и какими совместно управлять.

3. Интеграция ключевых бизнес-процессов

Управление цепями поставок – это интеграция следующих ключевых бизнес-процессов:

1) управление взаимоотношениями с потребителями – установление долгосрочных договоров сотрудничества, определение требований к коммуникациям и информационным системам, стандарту обслуживания и качеству товаров и услуг, наличие сертификатов соответствия и безопасности;

2) управление спросом и запасами – выявление спроса на ранней стадии (из точек продаж), синхронизация спроса с планами и темпами производства, управление запасами в глобальном масштабе из центра управления цепями поставок;

3) управление выполнением заказов и обслуживанием потребителей – предоставление информации о продукции и ценах по запросам потребителей, размещение заказов, послепродажный сервис;

4) разработка и внедрение новой продукции – синхронизация процессов проектирования, снабжения и производства с учетом интеграции в поток в лучших для данной комбинации продукта и рынка цепей поставок;

5) управление закупками – установление партнерских отношений с поставщиками, использование механизма оперативной коммуникации на базе электронного обмена данными (*EDI*) и Интернет для быстрого реагирования на запросы потребителей, разработка совместных стратегических, тактических планов производства и стандартов качества и обеспечение непрерывного улучшения продукции;

6) управление производственным потоком – применение стратегии «вытягивания» - производства продукции на основе заказов потребителей и поставок в режиме *JIT* («точно в срок»), разработка гибких производственных систем, оперативно реагирующих на изменение рыночных условий;

7) управление транспортировкой и складированием – определение ключевых перевозчиков и логистических центров для хранения материалов и готовой продукции

8) управление возвратными потоками – восстановление продукции по требованию потребителей из-за выявленных в процессе эксплуатации недостатков, утилизация отходов.

Некоторые процессы, не добавляющие ценности для потребителя, целесообразно передать в режиме аутсорсинга, например, 3, 4, 7, 8.

Моделирование бизнес-процессов можно представить в виде итерационной последовательности следующих шагов:

а) идентификация ключевых бизнес-процессов;

б) выделение и описание ключевых процессов, требующих интеграции по всей цепи поставок с помощью специальных средств их моделирования (*SCOR, ARIS, IDEF*);

в) определение компонентов управления для выявления степени интеграции и управления связей между процессами – создание системы контроллинга ИЦП;

г) определение "узких" мест и критических ресурсов бизнес-процессов;

д) проведение реинжиниринга – целенаправленного улучшения бизнес-процессов;

е) оценка устойчивости бизнес-процессов относительно определенных классов возмущений;

ж) разработка механизмов анализа и координации бизнес-процессов в случае отклонений от планового состояния.

Результатами проведения данного этапа являются разработанные процедуры администрирования:

- порядка взаимодействия, включая интегрированные соглашения о сроках выполнения работ на всех участках ИЦП;
- логистического сервиса;
- информационного обмена данными;
- выполнения заказов и обработка счетов.

Основные элементы интегрированного управления цепями поставок (компоненты управления) определяют, как интегрируется и управляется каждая связь процесса. К общим элементам управления ИЦП относятся:

- методы планирования и контроля показателей функционирования ИЦП;
- организационная структура – команды персонала предприятий-участников ИЦП должны вести совместную деятельность по всей цепи поставок;
- инфраструктура материального потока (должна быть единой);
- инфраструктура коммуникационного и информационного потоков (единая);
- методы управления – включают формулирование общей философии деятельности, разработку общей стратегии и задач управления ИЦП;
- структура распределения полномочий, система распределения рисков и вознаграждений.

Заключение

Для успешной интеграции управления ИЦП необходимо выполнение ряда требований:

- поддержка со стороны руководства управляющей компании, их активное участие;
- готовность персонала к переменам и понимание того, что непрерывные изменения непрерывны, неизбежны и выгодны;
- общее согласие по поводу процессного подхода;
- выделение общих ресурсов иницирующей компании и наделение менеджеров команды интеграции полномочиями, необходимыми для достижения поставленных целей.

Крупная компания выступает в роли инициатора внешней интеграции ЦП на основе долгосрочных соглашений партнерства. *4PL*-провайдер (системный интегратор цепей поставок) может стать разработчиком данного проекта по заказу этой компании, а также осуществлять управление работой ИЦП, поскольку устанавливается идущий «сверху вниз» контроль над совместной деятельностью ИЦП по потоку.

Представленная методология интегрированной логистики является весьма актуальной для экономики России. При этом нужно учитывать основные требования к каждому из потенциальных участников ИЦП: реализация процесса внутренней интеграции цепей поставок на предприятии и отказ от функциональной структуры управления логистикой. Эти мероприятия гарантируют эффективность организации и управления интегрированными цепями поставок продукции на мировой рынок.

Библиографический список

1. **Аникин, Б.А.** Основы логистики. Логистика и управление цепями поставок. Теория и практика / Б.А. Аникин, Т.А. Родкина. – М.: Проспект, 2014. – 344 с.
2. **Иванов, Д.А.** Логистика. Стратегическая кооперация / Д.А. Иванов. – М.: Вершина, 2006. – 176 с.
3. **Сергеев, В.И.** Корпоративная логистика в вопросах и ответах / В.И. Сергеев. – М.: Инфра-М, 2013. – 634 с.

4. **Сток, Дж.** Стратегическое управление логистикой / Дж. Сток, Д. Ламберт. – М.: Инфра-М, 2005. – 797 с.
5. **Уотерс, Д.** Логистика. Управление цепью поставок / Д. Уотерс. – М.: ЮНИТИ, 2003. – 504 с.

*Дата поступления
в редакцию: 15.01.2014*

S.B. Vdovina, I.S. Trufanova

**METHODOLOGICAL FOUNDATIONS OF DESIGN
AND MANAGEMENT INTEGRATED SUPPLY CHAIN**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Subject of research - the organization and management of inter-regional and inter-sectoral supply chains of industrial products. The purpose of research (methodology) - the creation of competitive flexible integrated supply chains. Given the conditions and requirements for integrated supply chain stages of the integration strategy, integrated approach to the organization and supply chain management, configuration and components of optimal supply chain modeling technique and reengineering of key business processes as the most important stage of the supply chain integration strategy.

The presented methodology of integrated logistics is very relevant for the Russian economy and recommended for implementation.

Key words: integration, organization, management, supply chain modeling, business process.

УДК 336

Г.А. Морозова

ПРОЦЕСС СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ГОСУДАРСТВЕННОГО УПРАВЛЕНИЯ

Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС

Предлагается методика New Public Management для совершенствования государственного и муниципального управления. Использование подходов, методов, методик, технологий менеджмента, разработанного в реальном секторе экономики в сфере государственного и муниципального управления. Результатом исследования является концепция использования методик, подходов, методов, технологий менеджмента, разработанного в реальном секторе экономики в сфере государственного и муниципального управления. На основе разработанной концепции использования методик предложены направления совершенствования государственного и муниципального управления.

Ключевые слова: государственное управление, муниципальное управление, управление в реальном секторе экономики, New Public Management, модернизация управления, современная концепция управления.

Управления в условиях российского федерализма

Как отмечалось ранее, современное общество для того, чтобы реализовывать свои цели имеет потребность в постоянном совершенствовании управления. Данное обстоятельство позволяет говорить о совершенствовании как о непрерывном процессе, характеризующемся совокупностью определенных действий.

Так, процесс совершенствования государственного управления представляет собой подсистему в государственном управлении с соответствующими целями, предметом, принципами и организацией, смысл которой заключается в придании государственному управлению как системному общественному явлению способности самопреобразования, саморазвития, самоулучшения.

Важную роль в налаживании указанного процесса играет целевая ориентация совершенствования государственного управления, которую можно разделить на две группы:

- внешние цели - состоят в повышении эффективности управляющих воздействий, их упорядочении и систематизации, в обеспечении адекватности объективным запросам управляемых объектов;
- внутренние цели, реализация которых предполагает совершенствование самой управляющей системы, улучшение её мобильности, рациональности, внутренней жизнедеятельности.

Сложность целей совершенствования государственного управления обуславливает использование при осуществлении всей этой работы определенных принципов, среди которых:

1. Принцип системности, определяющий охват данным процессом какой-либо крупной составной части функциональной и организационной структуры государственного управления (его подсистемы);

2. Принцип комплексности, требующий учёта многообразия элементов государственного управления, их сторон, свойств, аспектов, охвата различных факторов, средств, форм, методов и т.д., которые реально и в совокупности влияют на управленческие процессы;

3. Принцип непрерывности, исходя из которого действия по совершенствованию государственного управления должны вестись каждодневно, шаг за шагом, но неуклонно,

4. Принцип плановости, свидетельствующий о том, что цели процесса совершенствования государственного управления могут достигаться лишь путём тщательно спланированных и последовательно выполняемых действий.

Применение элементов New Public Management в государственном управлении в Российской Федерации

В большинстве стран реформы государственного управления развиваются под маркой так называемого нового государственного управления (New Public Management, или сокращенно - NPM). NPM, которому насчитывается уже более тридцати лет, подразумевает адаптацию успешных управленческих технологий бизнеса для целей управления в общественном секторе. Широкое распространение NPM связано с тем, что набор технологий и практик, объединяемых под этим названием, в значительной степени инвариантен к форме государственного устройства и может быть применен в странах с различными политическими режимами. Пожалуй, единственным условием для применимости NPM является рыночный характер экономики. В противном случае об аутсорсинге, создании механизмов квазиконкуренции, в различных формах мотивации ведомств и государственных служащих просто не приходится говорить.

Суть NPM – внедрять в государственный механизм все что можно из бизнеса, передавая частному исполнителю максимальное количество функций. Его цель – минимизация государства в экономике и сохранение его в сферах, где обществом признана целесообразность его присутствия, но там оно должно быть организовано оптимально (как бизнес). Один из экспертов в области нового государственного управления Роберт Бен определяет NPM как «коллекцию тактик и стратегий, нацеленных на преодоление неэффективности, присущей традиционной модели государственного сектора...». Согласно Гаю Питерсу, NPM основывается на принципах широкого участия институтов гражданского общества в принятии решений, гибкости, дерегулировании внутренних взаимодействий и использовании рыночных механизмов во внешних взаимодействиях. Дональд Кетл дает шесть основных характеристик NPM, таких как продуктивность, маркетингизация, ориентация на клиентов, децентрализация, ориентация на цели, заданные политиками, и отчетность по результатам.

Использование компьютеров, информационных сетей и баз данных позволяет обеспечить оперативное управление, объективный, относительно дешевый учет и контроль деятельности органов исполнительной власти, их подразделений и отдельных служащих, создать мощную информационную поддержку процессу принятия решений. То, что ранее невозможно было сделать из-за больших транзакционных издержек (например, поэтапный контроль административных процессов и отдельных служащих), теперь возможно с применением электронного документооборота и других информационных технологий (ИТ). При использовании современных ИТ бюрократические модели организации становятся конкурентоспособными в сравнении с моделями, основанными на NPM.

На пути внедрения NPM и совершенствования бюрократической организации стоит одна общая проблема, связанная с оценкой результативности. Контрактные по своей сути инструменты так же, как усовершенствованные регламенты и правила бюрократической организации, в явном или неявном виде содержат критерии результативности (в виде условий контрактов, инструкций или правил деятельности, указаний начальства). Эти критерии так же иерархичны, как и сама бюрократия. Достоверность интерпретации политических целей и критериев, адекватность им исполнительских действий характеризует качество бюрократии. Одна из главных задач административных реформ как раз и состоит в создании «понятливого» и эффективно работающего бюрократа.

В традиционной бюрократической системе основным критерием результативности служит полнота и четкость исполнения законов, правил, поскольку они выражают общественные приоритеты. В то же время законы зачастую допускают широкий выбор вариантов конкретных действий, в том числе выгодных бюрократам, а не обществу. Формирование законов прямого действия, детальных процедур и правил, согласованных с приоритетами, является необходимым условием повышения общественной полезности традиционной бюрократии. Аналогично условия контрактов в рамках NPM, сформулированные не вполне конкретно, могут не гарантировать желаемых общественных результатов. Детализация и кон-

кретизация заданий и условий их выполнения является главным признаком движения к управлению по результатам, будь то в рамках традиционной бюрократической модели или в модели NPM. С этой точки зрения противопоставление традиционной бюрократии (как системы, ориентированной на контроль затрат) и NPM (ориентированного на контроль результатов) выглядит эмоциональным и по сути не верным.

Более того, если нет уверенности в правильности определения результатов, то контракты становятся не только неэффективными, но и крайне опасными, поскольку накладывают на государство обязательства без гарантии получения ожидаемого результата. Если невозможно или очень дорого контролировать результат, более гибкая форма традиционного бюрократического управления является предпочтительной. И наоборот, чем легче измерить эффект государственной функции или услуги, тем больше шансов и смысла применять при их исполнении механизмы NPM. Именно поэтому новое государственное управление внедряется в основном на среднем и нижнем этажах административной пирамиды (агентства, учреждения, муниципалитеты), которые обеспечивают вполне ощутимый и измеримый эффект, и не распространяется на верхнем уровне (на уровне правительств, министерств), где результаты деятельности носят сложный характер, имеют множество побочных эффектов.

В тех сферах, где возможны определение и контроль результата, новое государственное управление получает преимущество за счет привлечения инициативы и ресурсов частного сектора к оказанию общественных услуг, в то время как традиционная бюрократия опирается лишь на собственные силы. NPM использует систему государственного заказа, аутсорсинга, частно-государственного партнерства, т.е. потенциал частного сектора для решения общественных задач, что позволяет гибко реагировать на изменение спроса на общественные блага и услуги. Однако расширение взаимодействия государства, в лице отдельных органов и чиновников, с частным сектором повышает опасность принятия невыгодных для общества решений, коррупции. Вероятность таких решений тем ниже, чем более детальны, открыты и прозрачны планируемые результаты, критерии и процедуры принятия решений. Таким образом, административная реформа предполагает сочетание совершенствования бюрократии, как в ее традиционном понимании, так и в контексте нового государственного управления.

В последнее пятилетие в России одновременно реализовывалось несколько направлений реформирования федерального и исполнительного уровней исполнительной власти. Наиболее значимыми среди них являются: реформы государственной службы, бюджета и бюджетного процесса, административная реформа, реформа федеративных отношений. Каждое из этих направлений реформирования содержит мероприятия, связанные как с совершенствованием традиционной бюрократической организации, так и с внедрением инструментов нового государственного управления.

Один из первых шагов по реформированию исполнительной власти в современной России был связан с аудитом государственных функций, которым в 2003 г. занималась Комиссия по административной реформе при Правительстве РФ. Ликвидация избыточных и дублирующих функций и полномочий государственных органов является известным, аксиоматичным условием повышения эффективности государства, лежащим в русле концепции нового государственного управления.

В ходе работы комиссии были проанализированы функции федеральных органов исполнительной власти и подготовлены рекомендации по сокращению избыточных и дублирующих функций (около 30% от общего числа). Однако на практике значимого сокращения государственных функций не произошло, поскольку это противоречило ведомственным интересам и даже ставило под вопрос целесообразность существования некоторых из них. Кроме того, последствия сокращения функций не были просчитаны из-за недостатка времени и экспертных ресурсов. Ликвидация излишних функций требовала широкомасштабных изменений в нормативных правовых актах, значительного времени и средств. В этих условиях отстаивать ведомственные интересы было проще, чем взять на себя ответственность за непо-

пулярные в бюрократической среде решения. В результате работа по оптимизации государственных функций не была доведена до конца, ожидания общества, и прежде всего бизнеса, по устранению административных барьеров не оправдались.

Очевидно, что оптимизация государственных функций должна быть не разовой, а постоянной задачей исполнительной власти. Ее решение может быть основано на принципах минимизации вмешательства государства в экономику, доказательства ведомствами необходимости того или иного вида деятельности.

В международной практике имеются примеры такого рода доказательных процедур. В Канаде, например, действует программа «сделай или купи», в соответствии с которой, государственные органы обязаны в ряде случаев обосновывать целесообразность самостоятельного оказания той или иной услуги в сравнении с вариантом ее покупки на рынке. Это прежде всего касается функций или услуг, обеспечивающих основную деятельность органов исполнительной власти.

Презумпция невмешательства, свойственная либеральному государству, является основанием практики аутсорсинга, частно-государственного партнерства, саморегулирования. Однако одних этих оснований недостаточно. Необходима развитая и диверсифицированная рыночная экономика, способная взять на себя выполнение ряда функций и предоставление отдельных услуг (аутсорсинг). В равной степени необходимо доверие бизнеса к государству (в случае частно-государственного партнерства), так же, как и государства к бизнесу (саморегулируемые организации).

Законодательно установленные функции органов исполнительной власти определяют их структуру. Приведению структуры органов в соответствие с типами исполняемых ими функций был посвящен первый этап административной реформы, связанный с уточнением специализации полномочий ведомств и созданием трехзвенной организационной модели: «министерства - службы - агентства»¹.

В рамках выбранной организационной модели функции выработки-политики и право-установления были сосредоточены в министерствах, функции оказания государственных услуг - в агентствах, а контроль и надзор (правоприменение) - в службах. Теоретически такая функциональная специализация позволяет избежать конфликта интересов, когда один и тот же орган планирует деятельность, исполняет и контролирует исполнение собственных планов. Аналоги такой структуры можно найти во многих странах.

Специализация органов исполнительной власти по видам функций требует выработки нового типа отношений между ними. Эти отношения могут быть построены на контрактной основе, в духе нового государственного управления, или на основе административной подчиненности, то есть традиционной бюрократической организации.

На практике в течение двух лет, прошедших после реорганизации российских правительственных органов, четкая модель их взаимодействия не сформировалась. С одной стороны, большинство федеральных агентств и служб были переданы в ведение соответствующих министерств, то есть в определенной степени оказались у них в подчинении. С другой стороны, агентства и службы сохранили статус главных распорядителей бюджетных средств (наличие самостоятельного бюджета), обрели административную автономию. Эта автономия не была дополнена контрактными, отношениями, за исключением определения для подведомственных агентств и служб показателей результатов деятельности. И не удивительно, что после утверждения новой структуры ведомств возникло множество процедурно неурегулированных ситуаций, перераставших иногда в личные конфликты руководителей ведомств и мешавших работе. Даже исполнение правительственных поручений, ответственность за которые возлагается на министерства, а реальное выполнение обеспечивается подведомственными им агентствами и службами, в ряде случаев стало проблемой, поскольку министерства

¹ Указ Президента Российской Федерации от 9 марта 2004 года № 314 "«О системе и структуре федеральных органов исполнительной власти».

не получили достаточных ни экономических, ни административных полномочий по контролю и координации работы находящихся в их ведении служб и агентств.

Созданные агентства и службы по сути стали «младшими министерствами», а не «хозрасчетными единицами», работающими на основе принципов NPM, как это принято в международной практике. Развитие системы исполнительной власти пошло по бюрократическому пути, и этот путь был закономерен. Дело в том, что большинство российских агентств и служб охватывают слишком широкие сферы ведения, и поэтому их деятельность непредметна, а значит, не может быть спланирована в терминах результатов, сбалансированных с ресурсами. Например, Федеральное агентство по промышленности организует выполнение работ по созданию авиационной техники, осуществляет ведение сводного реестра организаций оборонно-промышленного комплекса, государственного реестра контрольно-кассовой техники, ведомственного регистра ядерных материалов и др. Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека осуществляет государственный надзор за соблюдением санитарного законодательства, контроль за соблюдением законов, регулирующих отношения в области защиты прав потребителей, выдает лицензии на осуществление, например, деятельности, связанной с использованием возбудителей инфекционных заболеваний. Она, кроме всего прочего, регистрирует отдельные виды продукции, представляющие потенциальную опасность для человека (кроме лекарственных средств), а также лиц, пострадавших от радиационного воздействия и подвергшихся радиационному облучению в результате чернобыльской и других радиационных катастроф и инцидентов. Федеральное агентство по культуре и кинематографии занимается кино и театрами, библиотеками и архивами, музеями и выставками.

Многопрофильность, отсутствие каких-либо элементов «хозрасчета» в довольно крупных по международным меркам российских агентствах и службах не позволяет им перейти к контрактным отношениям с курирующими их работу министерствами, внедрить формализованную оценку деятельности и бюджетирование, основанное на планируемых результатах. Несмотря на то, что эти усилия до сих пор продолжаются в рамках реформы бюджетного процесса, все больше признаков того, что рецепты NPM для многопрофильных российских агентств (служб) и тем более министерств будут непродуктивны. Без перехода к большей специализации и без расширения экономической самостоятельности не удастся не только увязать затраты с результатами (что и является бюджетированием по результатам), но даже внятно и непротиворечиво определить сами результаты.

Создание системы взаимодействий, основанных на принципах, в том числе бюджетирования по результатам, требует более специализированного организационного дизайна, сосредоточения агентств и служб на однородных видах деятельности и клиентских группах, однотипных процессах и подотраслях. Такая специализация позволит учесть мнение однородных клиентских групп, объективно формулировать плановые задания и оценивать их исполнение. С точки зрения организационной рациональности, обоснование однородных предметных областей ведения может быть предпосылкой для уточнения полномочий и структуры федеральных органов исполнительной власти.

Помимо организационных изменений, внедрение контрактной практики в сфере государственного управления требует разработки процедур и методов определения результатов деятельности, а также нормативного обоснования их стоимости.

Определение конечных показателей результатов в общественном секторе является, как известно, сложной и конфликтной задачей, связанной с выбором правил и процедур, в рамках которых эти показатели утверждаются и контролируются. При этом недостаточно определить плановые показатели – необходимо обеспечить их достижение, т.е. обосновать объем ресурсов, гарантирующий достижение показателей (выполнение планов или контрактов). Решение этой задачи и означает, собственно, переход к бюджетированию по результатам.

В рамках современной концепции бюджетного процесса, получившей широкое распространение во многих странах, планирование и контроль исполнения бюджета перемеща-

ются из области сметного планирования затрат в область детального обоснования результатов и их бюджетной стоимости. С 2004 г. Россия также пошла по пути внедрения этого подхода в форме докладов о результатах и основных направлениях деятельности субъектов бюджетного планирования, разработки среднесрочного финансового плана, разделения бюджетов действующих и вновь принимаемых обязательств, совершенствования бюджетной классификации². Тем не менее, все еще недостаточно ясны цели и стратегия перехода от сметной модели финансирования к системе управления по результатам, то есть замены традиционного контракта (бюджет ведомства как компенсация за исполнительскую, политическую и административную лояльность) на контракт в духе NPM (бюджет ведомства как плата за общественно значимый и признанный результат).

В концепции бюджетной реформы не сказано, насколько самостоятельными в перспективе должны стать ведомства в вопросах планирования и управления финансовыми ресурсами и каким образом эта самостоятельность будет определяться. Не установлено, кто должен выступать в роли принципала при оценке деятельности ведомств и эффективности использования бюджетных ассигнований (правительство, министерства, Минфин России др.) и каковы его полномочия. Не определено, каким образом будут пересматриваться действующие бюджетные обязательства, в том числе низкоэффективные или недостаточно финансируемые в настоящий момент. Отсутствие ответов на эти вопросы не отрицает важности намеченных в концепции мероприятий, но в то же время не позволяет увидеть контуры новой финансовой модели органов исполнительной власти, основанной на бюджетировании по результатам, а значит, определить стратегию и тактику приближения к ней.

Можно сказать, что в рамках бюджетной реформы в настоящее время разрабатывается процедура планирования показателей деятельности и в меньшей степени процедура бюджетирования. Роли принципала и агента не разделяются. Тем самым речь скорее идет о развитии традиционного бюрократического подхода, чем о внедрении механизмов нового государственного управления.

Индикаторы результативности, устанавливаемые в докладах о результатах и основных направлениях деятельности российских субъектов бюджетного планирования, определяются самими органами исполнительной власти и лишь в незначительной степени учитывают мнения их клиентов и общественные приоритеты. Процедура обсуждения этих показателей и принятия решения по ним законодательно не установлена, полномочия рабочих групп, рассматривающих доклады, не определены. В результате одна из главных процедур NPM - определение показателей результатов и результативности - оказалась на периферии традиционных административно-управленческих процессов ведомств, стала экзотическим добавлением к ним.

В итоге цели, задачи, программы и показатели, фиксируемые в докладах о результатах и основных направлениях деятельности федеральных органов исполнительной власти, не играют той роли в годовом и среднесрочном бюджетном планировании, которая свойственна развитым моделям бюджетирования по результатам. Подготовка докладов и их защита не встроены в бюджетный процесс и протекают параллельно с ним. Решения по распределению бюджетных ассигнований принимаются не на основе докладов.

Концептуально не проработаны механизмы конкурентного распределения ресурсов по ведомственным программам, а также стимулирования достижения установленных в них плановых заданий. Неясны процедуры корректировки планов и бюджетов при существенном изменении приоритетов, ресурсных ограничений, рисков неисполнения намеченных программ и прочее. Идеи бюджетирования по результатам проще реализовать в тех типах органов исполнительной власти, для которых характерно преобладание локализуемых эффектов, наличие взаимодействий с гражданами и юридическими лицами, связанных с реализацией их законных прав и обязанностей, т.е. в агентствах и службах. Идентификация «бенефициаров» таких взаимодействий позволяет организовать обратную связь и тем самым объ-

² О мерах по повышению результативности бюджетных расходов: постанов. Правительства РФ от 22 мая 2004 г. № 249//СЗ РФ. 2004. № 22. С. 2180.

ективно определять результаты деятельности. Однако и в этом случае, как отмечалось ранее, деятельность агентств и служб должна быть достаточно специализирована, чтобы обеспечить возможность однородной оценки. В противном случае придется столкнуться с рационально не разрешимой в рамках административного процесса задачей - необходимостью сравнения разнокачественных эффектов деятельности. На практике решение подобной задачи почти всегда остается на усмотрение бюрократов.

Именно поэтому в министерствах инструменты NPM изначально могут быть применимы в очень малой степени, поскольку эти органы занимаются не точечными взаимодействиями с отдельными клиентами с понятными эффектами, а созданием общей среды - разработкой политики и нормативно - правовым регулированием подведомственных сфер. Результат их деятельности имеет долгосрочный, ярко выраженный общественный характер. Полноценно выразить его набором индикаторов невозможно, поскольку этот результат связан с трудно измеряемыми и гораздо более масштабными, чем в случае агентств и служб, побочными эффектами и в большей степени отражает влияние других властных институтов и различных экзогенных факторов. Таким образом, универсальный подход к разработке систем управления по результатам для разных типов органов не является обоснованным. В одном случае он приведет к избыточной и искажающей реальную ситуацию детализации плановых заданий, а в другом случае - к недостаточной их регламентации и конкретизации.

Библиографический список

1. **Морозова, Г.А.** Управление современной организацией / Г.А. Морозова. – Н.Новгород: Изд-во НИУ - филиала РАНХиГС, 2013. –118 с.
2. **Лапаев, Д.Н.** Методологические аспекты государственного и корпоративного управления: монография / Д.Н. Лапаев, В.П. Кузнецов, Г.А. Морозова; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2013. – 255 с.

*Дата поступления
в редакцию 21.01.2014*

G.A. Morozova

THE IMPROVEMENT OF PUBLIC ADMINISTRATION

The Nizhny Novgorod Institute of economics and management-a branch of the RANHiGS

A technique of New Public Management in order to improve the State and municipal administration. The use of approaches, methods, techniques, technologies, management, developed in the real sector of the economy in the area of State and municipal management. Result of research is the concept of using methods, approaches, methods, technology management, developed in the real sector of the economy in the area of State and municipal management.

Conclusions based on the concept of using methods of the directions of improvement of State and municipal management.

Key words: governance, municipal management, management in the real sector of the economy, New Public Management, modernization of management, modern management concept.

УДК 330.322.21

Д.Н. Лапаев, Я.С. Поташник

**КАПИТАЛЬНЫЕ ВЛОЖЕНИЯ В НИЖЕГОРОДСКОЙ ОБЛАСТИ:
СОСТОЯНИЕ, ПУТИ УВЕЛИЧЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексева

В статье обоснована значимость капитальных вложений для экономики Нижегородской области, выполнен анализ объемов и структуры капитальных вложений в регионе за период с 2003 по 2012 гг., выявлены основные проблемы сферы капитальных вложений Нижегородской области и обозначены направления их решения.

Ключевые слова: капитальные вложения, инвестиции, основные фонды, инвестиционный климат, Нижегородская область.

Динамика социально-экономического развития Нижегородской области в значительной степени детерминирована объемами и эффективностью осуществляемых на ее территории капитальных вложений, под которыми, согласно российскому законодательству, понимаются инвестиции в основной капитал, в том числе затраты на новое строительство, реконструкцию и техническое перевооружение действующих предприятий, приобретение машин, оборудования, инструмента, инвентаря, проектно-изыскательские работы и другие затраты [1]. Их осуществление способствует росту валового регионального продукта, количества рабочих мест, доходов граждан, налоговых поступлений в бюджеты разных уровней. Возникают многочисленные экономические, социальные, технические, технологические, экологические и прочие позитивные эффекты. Кроме того, только на основе ускоренного роста капитальных вложений, регион сможет справиться с проблемой высокой изношенности основных фондов (табл. 1) [10].

Таблица 1

**Степень износа и удельный вес полностью изношенных основных фондов
в Нижегородской области в 2003 – 2012 гг. (в процентах, на конец года)**

Наименование показателя	Год									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Степень износа основных фондов	46,9	46,6	47,6	48,2	48,6	49,5	48,9	49,2	50,1	50,2
Удельный вес полностью изношенных основных фондов	16,9	17,5	18,1	15,6	14,7	17,0	15,6	16,1	17,4	17,8

Привлечение капитальных вложений и достижение их высокой эффективности являются важнейшими задачами, стоящими перед регионом. Анализ состояния и тенденций в этой сфере и определение магистральных направлений решения задач являются целями настоящей работы.

Общие сведения об объемах и эффективности капитальных вложений в Нижегородской области в период с 2003 по 2012 гг. представлены в табл. 2 [5, 6, 7, 8, 9].

По данным Росстата, объем инвестиций в основной капитал в рассматриваемом периоде в фактически действовавших ценах вырос в 6,9 раза, в постоянных ценах в 2,3 раза. С 2003 по 2008 гг. объем капитальных вложений ежегодно увеличивался, в 2009–2010 гг. под влиянием последствий мирового финансового кризиса снижался, в 2010–2012 гг. стал вновь увеличиваться, но более умеренными темпами.

Таблица 2

**Общие сведения о капитальных вложениях в Нижегородской области
в 2003–2012 гг.**

Наименование показателя	Год									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1. Инвестиции в основной капитал, млрд руб., в фактически действовавших ценах	37,4	52,2	64,6	89,3	133,2	207,4	201,7	192,1	224,3	258,2
2. Место по показателю «1»:										
- в РФ	13	14	13	13	11	8	8	10	11	11
- в ПФО	5	4	4	3	3	2	2	2	2	2
3. Индекс физического объема инвестиций в основной капитал, в % к предыдущему году, в постоянных ценах	103,3	119,4	103,8	123,3	127,3	127,7	96,9	91,5	107,0	106,1
4. Доля в инвестициях в основной капитал в РФ, в %	1,71	1,82	1,79	1,89	1,98	2,36	2,53	2,10	2,03	2,05
5. Инвестиции в основной капитал на душу населения, тыс. руб., в фактически действовавших ценах	10,69	15,07	18,82	26,26	39,48	61,85	60,47	57,90	67,13	78,39
6. Место по показателю «5»:										
- в РФ	39	41	43	39	35	26	23	31	32	29
- в ПФО	4	4	5	5	5	2	2	2	2	2
7. Доля инвестиций в основной капитал в ВРП, %	18,08	21,56	21,55	23,74	23,92	35,22	36,86	29,70	29,11	29,74
8. Стоимость введенных в действие основных фондов, млрд. руб., в фактически действовавших ценах	24,54	32,98	44,79	56,13	70,78	88,33	131,14	115,92	152,86	168,96

По показателю «инвестиции в основной капитал» Нижегородская область в рассматриваемом периоде не опускалась ниже 14-го места среди субъектов Российской Федерации и 5-го места среди субъектов ПФО. Доля области в суммарном объеме капитальных вложений

в России находилась в интервале от 1,71 до 2,53%, что выше среднерегionalных значений в РФ и ПФО.

Динамика объема инвестиций в основной капитал на душу населения в Нижегородской области, в РФ и ПФО в 2003 – 2012 гг. представлена на рис. 1.

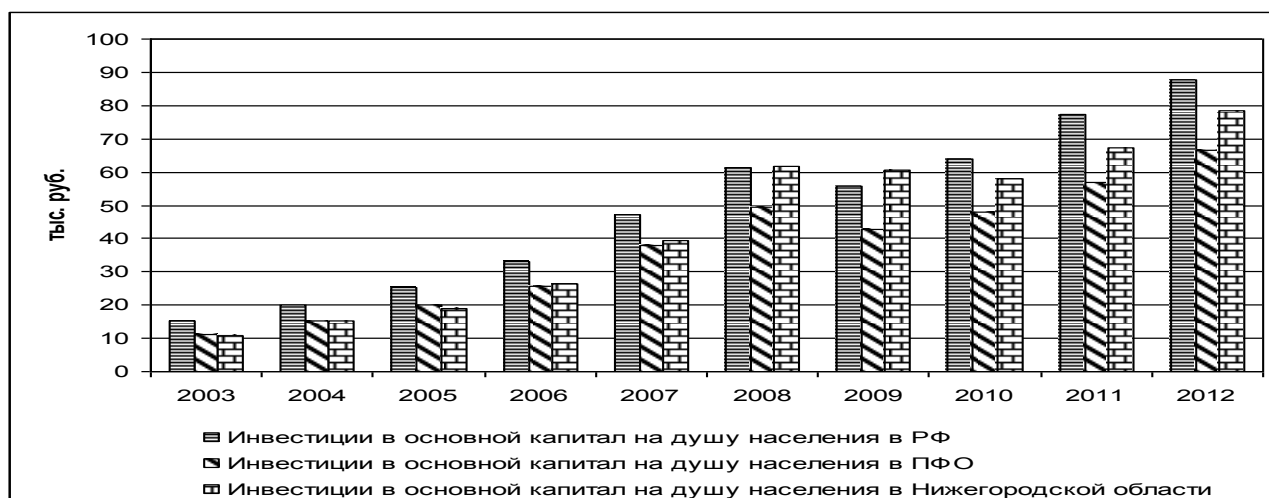


Рис. 1. Инвестиций в основной капитал на душу населения в 2003–2012 гг. (в фактически действовавших ценах)

Объем инвестиций в основной капитал на душу населения в Нижегородской области в рассматриваемом периоде вырос в 7,3 раза (в среднем по РФ и ПФО - в 5,8 раза). С 2003 по 2008 гг. объем соответствующих инвестиций в регионе возрастал, в 2009 – 2010 гг. уменьшался, в 2011–2012 гг. вновь начал расти. По данному показателю область ввиду относительно высокой плотности населения не поднималась среди регионов РФ выше 23 позиции, однако в ПФО на протяжении последних пяти лет занимала второе место, уступая только Татарстану.

Доля капитальных вложений в валовом продукте в Нижегородской области выше, чем в России в целом и в среднем по регионам ПФО (рис. 2). Наибольшего значения разрыв достиг в 2009 г. и составлял 16,3 п.п. относительно уровня РФ, 10,9 п.п. относительно уровня ПФО. К 2012 г. разрыв сократился до 9,7 п.п. и 3,3 п.п. соответственно.

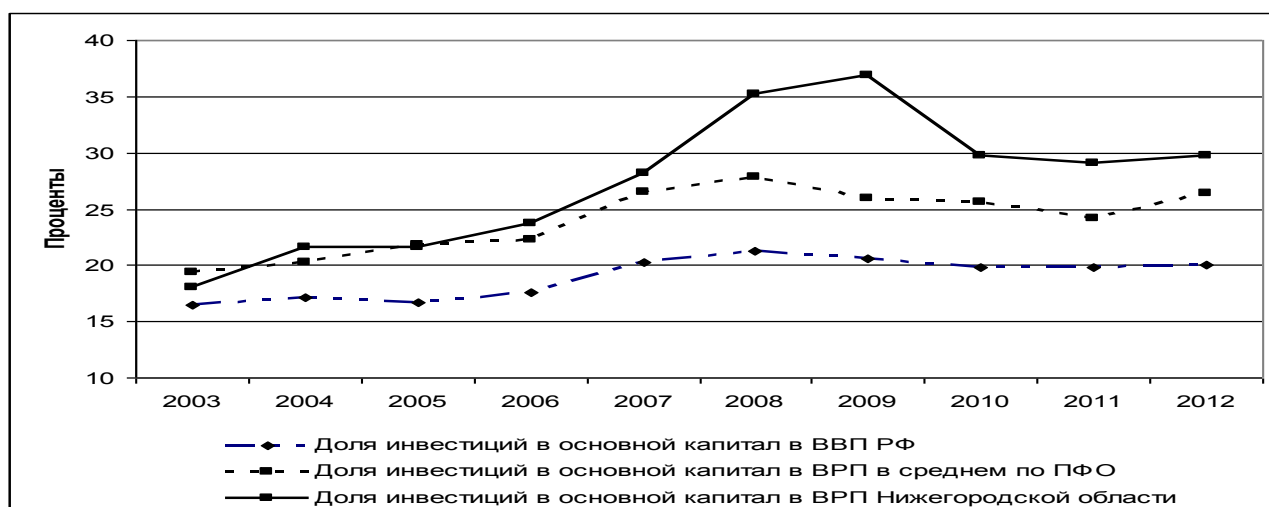


Рис. 2. Доля инвестиций в основной капитал в валовом продукте в 2003–2012 гг. (Нижегородская область, РФ и ПФО)

Сопоставление объемов инвестиций в основной капитал и стоимости введенных в действие основных фондов в Нижегородской области (рис. 3) показывает, что стоимость вводимых основных средств в расчете на один рубль капитальных вложений имеет тенденцию к уменьшению, что указывает на снижение соответствующей отдачи от капитальных вложений. Такая же ситуация характерна для ПФО и РФ в целом, однако в последнем случае темпы снижения отдачи умереннее.

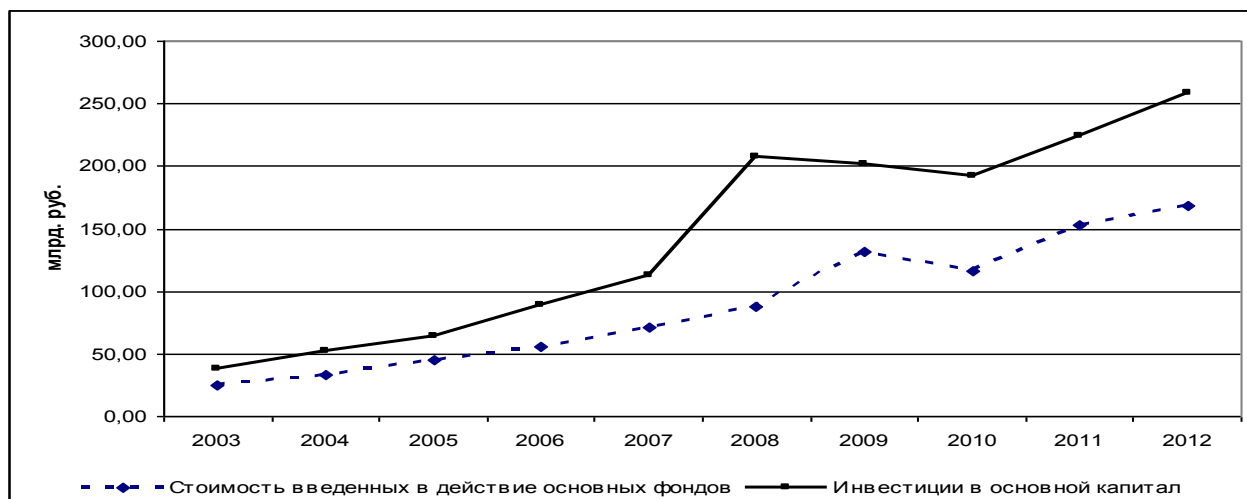


Рис. 3. Инвестиции в основной капитал и стоимость введенных в действие основных фондов в Нижегородской области в 2003–2012 гг.

Сведения, характеризующие структуру капитальных вложений в Нижегородской области в период 2003–2012 гг., представлены в табл. 3 [5, 6, 7, 8, 9].

Таблица 3

Структура капитальных вложений в Нижегородской области в 2003–2012 гг. (в процентах от общего объема)

Наименование показателя	Год									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. Капитальные вложения по видам основных фондов										
1.1. В жилища	12,4	10,6	12,8	16,9	15,6	18,7	21,1	20,6	17,0	17,1
1.2. В здания (кроме жилых) и сооружения	30,3	33,3	28,5	30,3	32,1	42,6	34,7	33,6	31,7	32,4
1.3. В машины, оборудование, транспортные средства	55,2	54,1	57,0	51,5	51,2	37,8	43,3	43,3	50,6	49,3
1.4. Прочие	2,1	2,0	1,7	1,3	1,1	0,9	0,9	2,5	0,7	1,2
2. Капитальные вложения по форме собственности										
2.1. Российские	81,2	83,8	79,5	81,6	87,7	86,0	84,3	87,6	82,1	81,5
из них										
- государственные	19,4	16,4	14,9	16,8	15,3	13,7	12,6	9,6	12,0	10,7
- муниципальные	5,5	4,3	4,9	5,0	6,4	7,5	6,5	4,7	6,2	4,5
- частные	48,5	59,2	55,0	56,9	62,3	60,6	59,8	66,7	55,5	58,5
- смешанные	7,8	3,9	4,7	2,9	3,7	4,2	5,4	6,6	8,4	7,8
2.2. Иностранные	4,0	2,9	7,3	5,1	4,6	10,1	11,9	3,9	5,1	5,4
2.3. Совместные российские и иностранные	14,8	13,3	13,2	13,3	7,7	3,9	3,8	8,5	12,8	13,1
3. Капитальные вложения по источникам финансирования										

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3.1. Собственные	60,2	59,9	57,3	50,9	42,9	37,2	35,8	44,7	35,8	40,3
3.2. Привлеченные	39,8	40,1	42,7	49,1	57,1	62,8	64,2	55,3	64,2	59,7
из них										
3.2.1. Кредиты банков	6,5	9,0	8,0	9,7	10,8	9,0	8,8	13,2	17,5	20,8
3.2.2. Бюджетные средства	14,7	10,7	12,9	15,2	21,8	21,9	20,0	17,3	18,8	19,9
из них										
- из федерального бюджета	7,8	6,4	7,3	8,8	10,5	7,0	9,3	7,5	8,0	10,1
- из бюджета субъекта	4,3	3,0	3,4	4,9	8,4	13,0	8,4	7,9	8,1	7,4

По данным табл. 3, приоритетным направлением капитальных вложений было приобретение машин, транспорта и оборудования (47,22% от их общего объема в рассматриваемом периоде). Однако доля данного типа инвестиций имела тенденцию к снижению (рис. 4).

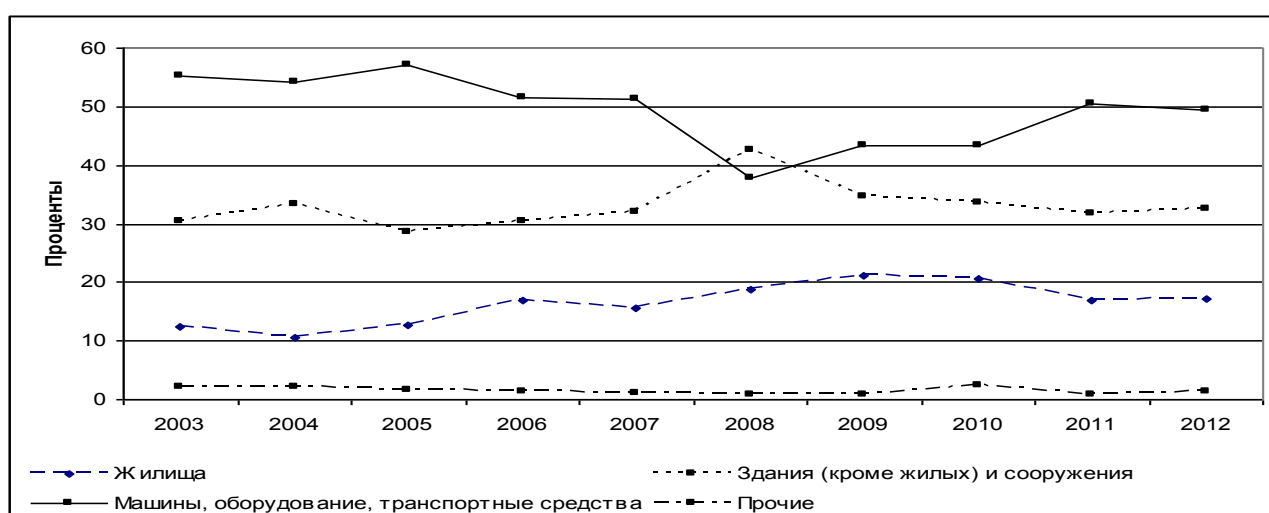


Рис. 4. Структура инвестиций в основной капитал по видам основных фондов в Нижегородской области в 2003–2012 гг.

Вторым по значимости направлением инвестирования были нежилые здания и сооружения (33,87%). Их доля в 2008 г. значительно выросла, составив 42,6%, но затем вернулась к значениям, близким к средним в данном периоде. В жилища было направлено 17,63% капитальных вложений от их общего объема, тренд – восходящий. Объем прочих инвестиций незначителен (1,28%), тренд – нисходящий.

Капитальные вложения из российских источников значительно превышали инвестиции с участием иностранного капитала (иностранцы и совместные российские и иностранные). Доля российских инвестиций в рассматриваемом периоде не опускалась ниже 79,5% и в среднем составила 84% (тренд – восходящий), в том числе из частных источников 59,5%, государственных – 12,9%, муниципальных – 5,7%, смешанных – 5,9%. Тренд частных инвестиций – восходящий, государственных – нисходящий, муниципальных и смешанных – горизонтальный. Доля капитальных вложений с участием иностранного капитала составила в среднем 16% от их общего объема (тренд – восходящий), из них прямых инвестиций – 7,7% (тренд – горизонтальный), портфельных инвестиций – 0,2% (тренд – нисходящий), прочих инвестиций – 8,1% (тренд – восходящий).

Структура капитальных вложений в Нижегородской области по источникам финансирования представлена на рис. 5.

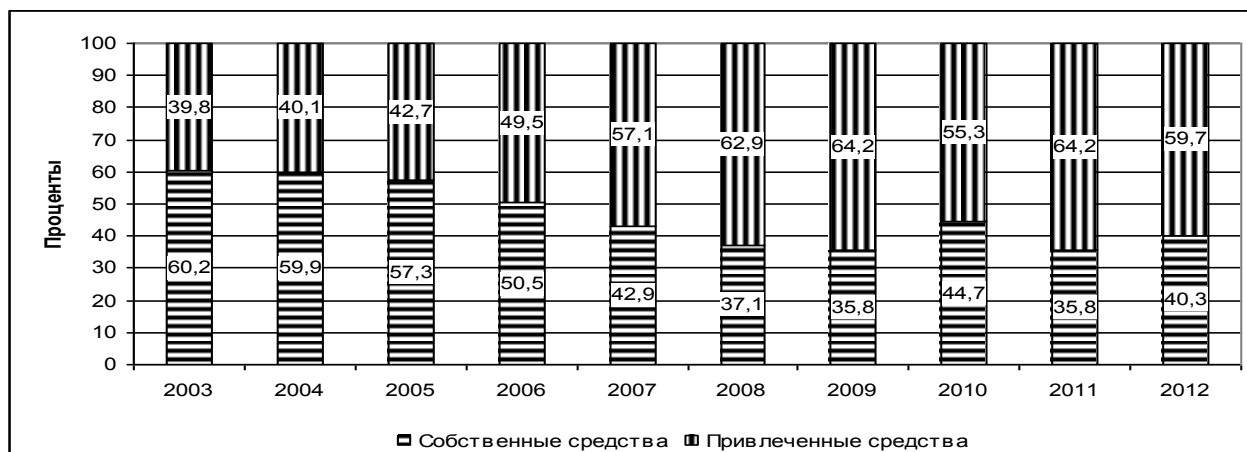


Рис. 5. Структура капитальных вложений по источникам финансирования в Нижегородской области в 2003–2012 гг.

По данным рис. 5, наблюдается заметное снижение доли капитальных вложений, финансируемых за счет собственных средств организаций. Если в 2003 г. соотношение между собственными и привлеченными средствами в структуре инвестиций составляло приблизительно 1,51:1, то в 2012 г. соотношение поменялось на противоположное, составив 1:1,48. В наибольшей степени на рост доли привлеченных средств повлияло увеличение удельного веса банковских кредитов (за 10 лет в 3,2 раза) и бюджетных средств (за 10 лет на 35%).

В отраслевом разрезе наиболее привлекательными для инвесторов были обрабатывающие производства (35,85% от общего объема капитальных вложений), транспорт и связь (24,38%), операции с недвижимым имуществом, аренда и предоставление услуг (12,49%), производство и распределение электроэнергии, газа и воды (7,14%). В совокупности в 2003–2012 гг. на данные виды экономической деятельности пришлось почти 80% капитальных вложений. Внутри обрабатывающих производств лидировали по инвестициям металлургическое производство и производство готовых металлических изделий (36%), химическое производство (19%), производство транспортных средств и оборудования (9%).

Иностранные инвесторы предпочитали осуществлять капитальные вложения в обрабатывающие производства (89% от общего объема инвестиций, поступивших от иностранных инвесторов), в том числе в химическое производство (46%), металлургическое производство и производство готовых металлических изделий (12%), производство машин и оборудования (11%) и производство транспортных средств и оборудования (10%).

Объемы капитальных вложений имеют прямую корреляцию с состоянием инвестиционного климата в регионе, под которым понимаются экономические, политические, финансовые и прочие условия, оказывающие влияние на приток внутренних и внешних инвестиций в экономику [2]. Для определения состояния и тенденций инвестиционного климата в Нижегородской области воспользуемся оценками специализированного рейтингового агентства «Эксперт РА». В качестве составляющих инвестиционного климата агентство рассматривает две относительно самостоятельные характеристики: инвестиционный потенциал и инвестиционный риск. Инвестиционный потенциал – количественная характеристика, учитывающая насыщенность территории региона факторами производства (природными ресурсами, рабочей силой, основными фондами, инфраструктурой и т.п.), потребительский спрос населения и другие показатели, влияющие на потенциальные объемы инвестирования в регион. Инвестиционный риск – характеристика качественная, зависящая от политической, социальной, экономической, финансовой, экологической и криминальной ситуации. Его величина показывает вероятность потери инвестиций и дохода от них.

Результаты оценки агентством «Эксперт РА» инвестиционного климата Нижегородской области и его составляющих за 2003–2012 гг. представлены в табл. 4 [11].

Таблица 4

**Показатели инвестиционной привлекательности Нижегородской области
в период с 2003 по 2012 гг.**

Наименование показателя	Год									
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Инвестиционный рейтинг	2В	2В	2В	2В	2В	2В	2В	2В	2В	2В
Место среди регионов РФ по инвестиционному потенциалу	7	6	6	11	11	9	9	10	13	8
Место среди регионов РФ по инвестиционному риску	7	9	8	15	8	9	24	30	59	32

Согласно оценкам «Эксперт РА», Нижегородская область в рассматриваемом периоде обладала инвестиционным рейтингом 2В (средний потенциал – умеренный риск), что соответствует удовлетворительному инвестиционному климату. В качестве сильных сторон региона агентство выделяет инновационный потенциал (высокий уровень развития науки и внедрения достижений научно-технического прогресса), институциональный потенциал (высокую степень развития ведущих институтов рыночной экономики) и трудовой потенциал (обеспеченность региона трудовыми ресурсами, образовательный уровень жителей).

Особенно негативно влияют на инвестиционный климат области высокий уровень преступности, волатильность экономического развития, недостаточная сбалансированность регионального бюджета и финансов предприятий.

Ценным дополнением к информации агентства «Эксперт РА» служат результаты проводимого Нижегородстатом ежегодно с 2007 г. опроса организаций, осуществляющих капитальные вложения на территории региона. На их основе нами были определены ранги влияния факторов, ограничивающих инвестиционную деятельность (табл. 5) [3, 4].

Таблица 5

Ранги влияния факторов, ограничивающих инвестиционную деятельность организаций в Нижегородской области

Наименование фактора	Год					
	2007	2008	2009	2010	2011	2012
1. Недостаточный спрос на продукцию	4	3	2-3	4	5	5
2. Недостаток собственных финансовых средств	1	1	1	1	1	1
3. Высокий процент коммерческого кредита	2-3	4	4	2	3	3
4. Сложный механизм получения кредитов для реализации инвестиционных проектов	9	7	5	5	6	6
5. Инвестиционные риски	2-3	5	8	6	4	2
6. Неудовлетворительное состояние технической базы	5-6	9	7	8	8-9	9
7. Низкая прибыльность инвестиций в основной капитал	7	6	6	7	8-9	7
8. Неопределенность экономической ситуации в стране	8	2	2-3	3	2	4
9. Несовершенная нормативно-правовая база, регулирующая инвестиционные процессы	5-6	8	9	9	7	8

Примечание:
 1 – самый высокий ранг, соответствует фактору (ам), имеющему (им) наибольшее отрицательное влияние на инвестиционную деятельность организаций.
 9 – самый низкий ранг, соответствует фактору (ам), имеющему (им) наименьшее отрицательное влияние на инвестиционную деятельность организаций.

По мнению респондентов, наиболее сильно ограничивают инвестиционную деятельность в регионе недостаток собственных финансовых средств, инвестиционные риски, неопределенность экономической ситуации в стране и высокий процент коммерческого кредита. Причем высокий отрицательный ранг данных факторов является достаточно устойчивым.

Проведенный анализ показывает, что Нижегородская область занимает ведущие позиции в Российской Федерации и ПФО по объемам капитальных вложений и их доле в валовом региональном продукте. Однако, ввиду нарастающей степени износа основных средств, существующих объемов недостаточно. Для достижения требуемых темпов роста капитальных вложений нами предлагается сделать акцент в работе по развитию инвестиционной деятельности на изложенных далее направлениях.

1. Необходимо существенно улучшить инвестиционный климат следующим образом:

- повышением качества работы правоохранительных органов, улучшением криминальной ситуации в регионе;
- реализацией мероприятий по снижению инвестиционных рисков (административно-правовых, экономико-финансовых и политических);
- повышением качества планирования и сбалансированностью регионального бюджета;
- повышением эффективности взаимодействия Правительства области с инвесторами;
- более активным развитием инвестиционной инфраструктуры региона;
- формированием устойчивого имиджа области как территории, благоприятной для капитальных вложений.

2. Необходимо создать привлекательные условия для отечественных и иностранных портфельных инвесторов, в том числе жителей Нижегородской области. Их вложения позволят увеличить объем имеющихся у организаций инвестиционных ресурсов. Необходимо стимулировать подготовку организациями, осуществляющими капитальные вложения, эффективных, амбициозных, но реалистичных планов роста, повышать, совершенствуя нормативно-правовую базу и образовательную среду, готовность собственников бизнеса к взаимодействию с инвесторами, обеспечить портфельных инвесторов информацией о предприятиях, стремящихся и готовых к взаимодействию с ними.

3. Нужно создать условия для снижения затрат финансовых, временных и прочих ресурсов организаций на осуществление необходимых капитальных вложений путем повышения эффективности работы предприятий – производителей инвестиционной продукции и конкуренции между ними. Обеспечить обоснованность и предсказуемость тарифов на электричество, тепло, воду и прочие услуги ЖКХ, что будет способствовать снижению затрат на эксплуатацию основных средств и росту привлекательности инвестиционных проектов.

4. Необходимо повысить активность привлечения на территорию региона средств прямых иностранных инвесторов – ведущих компаний, носителей самых современных производственных и управленческих технологий. Их деятельность позволяет региону не только добиться краткосрочного повышения спроса на инвестиционные товары, но и расширить пласт региональных специалистов, обладающих нужными компетенциями для создания предприятий по производству конкурентоспособных продуктов с высокой добавленной стоимостью, что будет стимулировать инвестиционный спрос в долгосрочном периоде.

5. Необходимо повысить равномерность распределения инвестиций между отраслями экономики региона. Анализ показал, что основная доля капитальных вложений в рассматриваемом периоде пришлась на относительно небольшое количество отраслей, что способствовало ускорению модернизации основных фондов работающих в них предприятий. При этом организации, занимающиеся прочими видами деятельности (сельским хозяйством, образованием, здравоохранением, предоставлением коммунальных услуг и т.д.), испытывали недостаток инвестиций в основной капитал. Отсутствие необходимых темпов обновления вынуждает многих из них эксплуатировать значительно или полностью изношенные основные фонды, что снижает надежность и качество работы организаций, повышает их эксплуатационные издержки. Кроме того, развитие узкой группы отраслей снижает диверсифицирован-

ность экономики Нижегородской области и усиливает ее зависимость от колебаний экономической конъюнктуры.

Считаем, что работа по перечисленным направлениям будет способствовать улучшению инвестиционного климата региона, увеличению объема осуществляемых на его территории капитальных вложений, снижению до приемлемых уровней степени изношенности основных фондов, повышению эффективности работы организаций и социально-экономического развития Нижегородской области.

Библиографический список

1. Федеральный закон №39 – ФЗ от 25.02.1999 «Об инвестиционной деятельности в Российской Федерации, осуществляемой в форме капитальных вложений». – М., 1999.
2. **Райзберг, Б.А.** Современный экономический словарь / Б.А. Райзберг, Л.Ш. Лозовский, Е.Б. Стародубцева. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: ИФНРА-М, 2008. – 512 с.
3. Нижегородская область. Статистический ежегодник. 2013: Стат. сб. / Нижегородстат. – Н.Новгород, 2013. –413 с.
4. Нижегородская область. Статистический ежегодник. 2012: Стат. сб. / Нижегородстат. – Н.Новгород, 2012. –404 с.
5. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2013: Стат. сб. / Росстат.– М., 2013. – 990 с.
6. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2012: Стат. сб. / Росстат.– М., 2012. – 990 с.
7. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2011: Стат. сб. / Росстат.– М., 2011. – 990 с.
8. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2009: Стат. сб. / Росстат.– М., 2009. – 990 с.
9. Регионы России. Социально-экономические показатели. 2007: Стат. сб. / Росстат.– М., 2007. – 991 с.
10. <http://nizhstat.gks.ru/>
11. <http://www.raexpert.ru/>

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

D.N. Lapaev, Y.S. Potashnik

APITAL INVESTMENTS IN THE NIZHNY NOVGOROD REGION: STATUS, WAYS OF INCREASING

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The article substantiates the importance of capital investments to the economy of the Nizhny Novgorod region, analysis of volumes and structure of capital investments in the region for the period from 2003 to 2012, identified the main problems in the sphere of capital investments of the Nizhny Novgorod region and identifies ways of their solution.

Key words: capital expenditures, investments, fixed assets, investment climate, Nizhny Novgorod region.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 303.425.6

Е.И. Скобелева, М.В. Прохорова, А.В. Ефимов

АНАЛИЗ СОЦИАЛЬНЫХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ СТУДЕНЧЕСКОЙ МОЛОДЕЖИ О ПРОБЛЕМАХ НАРКОМАНИИ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ДАННЫХ СОЦИОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ)

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируются проблемы зависимости социального поведения молодежных групп от того социокультурного контекста, который они используют, обсуждается проблема наркомании. Рассматривается с точки зрения теории социальных представлений С. Московиси сложность восприятия данной проблемы в молодежной среде, а также исследование социальной практики, связанной с употреблением наркотиков.. Анализируются источники формирования социальных представлений студенческой молодежи о наркотиках, а также специфика их влияния на регулирование социального поведения. В качестве эмпирической основы исследования используются данные социологического опроса студентов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева об отношении к проблеме наркомании, проведенного в январе 2014 года.

Ключевые слова: социальные представления, объектификация, анкеровка, ценностно-нормативная система общества, наркомания, респондент.

Среди глобальных проблем, стоящих перед российским обществом, проблема наркомании занимает одно из первых мест в силу того, что рассматривается она как основной фактор, создающий угрозу жизни и здоровью нации, подрывающий основы национальной безопасности. По данным Федеральной службы по контролю за оборотом наркотиков (ФСКН) и Правительства РФ, в 2013 году количество наркоманов в РФ составило около 8,5 млн человек, что соответствует 6% населения страны [1]. Опасность ситуации, сложившейся в связи с употреблением наркотиков в России, проявляется как в росте показателей смертности, так и в положительной динамике распространения болезней, обусловленных этой практикой - ВИЧ, гепатита и т.д. [2]. Таким образом, существуют достаточные основания считать распространение наркомании серьезной угрозой безопасности страны, сохранению ее социально-культурного и интеллектуального потенциала.

Очевидно, что необходимо прилагать все усилия для разработки превентивных и профилактических мер, ориентированных на сокращение употребления наркотических веществ. Решение этого вопроса требует системного подхода, предполагающего открытие лечебно – реабилитационных центров, социально ориентированных некоммерческих организаций, центров психологической поддержки и т.д. Для достижения максимального эффекта разработка программ реабилитации и профилактики должна опираться на эмпирическую основу, позволяющую достаточно аргументировано подходить к постановке и решению проблемных вопросов в сфере борьбы с наркоманией. Эмпирические исследования, в частности, позволят не только определить и уточнить функциональную направленность и масштабность принимаемых мер, но и теоретически осмыслить проблему наркомании с целью формирования комплексного подхода, учитывающего правовой, медицинский, социально-культурный аспект.

Проблема наркомании как социальной практики является частью социокультурной коммуникации, в которую в качестве субъектов вовлечены как социальные группы, употребляющие наркотики, так и те, кто их не употребляет; СМИ, в которых происходит обсуждение различных аспектов проблемы распространения наркомании; властные структуры, принимающие меры по решению данной проблемы и т.д. В повседневной жизни все субъекты занимают различные социальные позиции по отношению к проблеме распространения и употребления наркотиков, участвуют в дискуссиях по поводу использования методов и технологий ее решения, что определяет их поведение в социальной практике, лежит в основе принимаемых решений, обуславливающих их позицию в сфере социальных отношений.

Согласно статистическим данным, большинство среди употребляющих наркотики, составляет молодежь [3]. Однако сама молодежная среда неоднородна с точки зрения опыта знакомства с наркотиками. С одной стороны, часть молодежи не употребляет наркотики, но имеет теоретическое представление об их видах, способах и последствиях употребления и т.д. Другая часть – знакома с проблемой наркомании на примере своих знакомых, родственников и ближайшего окружения. Существуют и группы молодых людей, употребляющих наркотики как постоянно, так и «по случаю». Объединяет эти группы молодежи то, что все они выстраивают сложную систему коммуникаций, основанную на социальных представлениях о значимости, масштабности и степени опасности употребления наркотиков.

В фокусе нашего внимания, таким образом, оказывается проблема зависимости социального поведения молодежных групп от того социокультурного контекста, который они используют, обсуждая проблему наркомании. В качестве методологической основы исследования, которая позволит нам рассмотреть сложность восприятия проблемы наркомании в молодежной среде и ответить на ряд вопросов, касающихся социальной практики, связанной с употреблением наркотиков, возьмем теорию социальных представлений С. Московиси. Основываясь на положениях данной теории, проанализируем источники формирования социальных представлений студенческой молодежи о наркотиках, а также специфику их влияния на регулирование социального поведения.

В качестве эмпирической основы исследования используем данные социологического опроса студентов Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева об отношении к проблеме наркомании, проведенного в январе 2014 года. В рамках проведения областного социологического исследования по изучению привычек и убеждений жителей Нижегородской области в сфере распространения наркомании с 1.01.2014 по 15.01.2014 гг. в НГТУ им. Р.Е. Алексеева было опрошено 292 студента 1-го и 4-го курсов. Опрос был проведен в институтах ИНЭУ, ИНЭЛ, ИРИТ, ИФХТиМ, ИТС, ИПТМ, ИЯЭиТФ. Цель исследования заключалась в изучении специфики социальных представлений студенческой молодежи о наркотиках и о распространении проблемы наркомании в молодежной среде. Предполагается, что достижение поставленной цели даст возможность сформулировать концепцию превентивных мер, способствующих сокращению употребления наркотических средств в студенческой среде.

Теория социальных представлений С. Московиси основана на выявлении динамической взаимосвязи социокультурных представлений о социально значимом явлении, возникающих в процессе повседневных коммуникаций, с конструированием и трансформацией социального поведения. В данном случае нас интересуют социальные представления студенческой молодежи о проблеме наркомании, в частности, об опасности употребления наркотиков и об эффективности мер по профилактике наркомании, а также вопрос о влиянии социальных представлений студентов на принимаемые решения по поводу возможности и желательности употребления наркотиков.

Социальное представление, являясь специфической формой практического знания, связывает познающий субъект (респондента) с объектом (проблемой распространения

наркомании), дает возможность трансформировать в процессе мышления неизвестные и непонятные стороны объекта в известные, перемещая их в существующую систему координат и, тем самым, придать смысл собственным действиям в системе внутригрупповой коммуникации. Несомненно, наркотики являются одной из тем повседневной коммуникации в студенческой среде. Принимая то или иное решение, касающееся отношения к наркотикам, индивид опирается на определенную совокупность знаний и убеждений, которая лежит в основе формирования социальных представлений и предопределяет исход социального поведения.

Согласно теории С. Московиси, источниками социальных представлений являются научное знание и убеждения. Причем практически все представления основываются и на знаниях, и на убеждениях. В процессе формирования социальных представлений различные типы знания (научное, практическое, основанное на опыте употребления наркотиков или отношений с наркоманами и т. д.), убеждения, идеологические взгляды и т.д. комбинируются в едином подходе к объяснению объекта социальной реальности (в нашем случае - наркомании) на уровне здравого смысла.

Социальные представления обеспечивают описание и объяснение объекта социальной реальности - наркомании - в процессе чего осуществляется его познание. Познание как постижение смысла можно обозначить категорией «понимание». Однако в данной трактовке познание не имеет ничего общего с научным познанием социального объекта (согласно Веберовской концепции «понимающей социологии»), поскольку в большей степени представления респондентов выступают в форме оценочных суждений, т.е. выражают индивидуальное мнение об исследуемом объекте. Тем не менее, социальные представления индивида о наркомании, формирующиеся в процессе коммуникативной практики и выявляющиеся в процессе социологического исследования, позволяют конкретизировать содержание проблемы наркомании, выделить ее основные смысловые характеристики и, тем самым, способствуют ее пониманию.

Однако в процессе познания субъектом социального объекта социальные представления не только формируются, но и трансформируются. Согласно динамическому подходу, изучающему влияние социальной структуры на выработку социального представления, разработанному В. Дуазом (так называемая Женевская школа) в рамках теории социальных представлений С. Московиси, различные когнитивные процессы познающего субъекта (категоризация, умозаключение и др.) контролируются и направляются так называемой метасистемой, т.е. ценностно-нормативной системой общества, социальной группы (студенческая молодежь) посредством объектификации и анкеровки [4].

Рассмотрим процесс формирования социальных представлений студентов о наркомании на примере изучения данных социологического исследования об отношении студентов НГТУ им. Р.Е. Алексева к проблеме распространения и употребления наркотиков.

В процессе первоначального формирования социальных представлений студентов о наркомании (согласно теории социальных представлений С. Московиси) – анкеровки – проблема классифицируется и помещается в существующую систему координат, выработанную социальной группой (студенческая молодежь) и являющуюся продуктом социальной идентичности. В процессе анкеровки структурированное понятие «наркомания» укореняется в системе имеющихся знаний и убеждений студентов.

В анкете социологического исследования мнений студентов НГТУ система координат, ментальная система социальной группы представлена в виде набора социальных ценностей, которые являются значимыми, с которыми происходит соотнесение принимаемых решений, и на которых основывается социальное поведение. При опросе студентов была поставлена задача: выяснить, какие ценности являются для студентов наиболее значимыми в

повседневной коммуникации и определить тот социокультурный контекст, в котором формируются социальные представления студентов о наркомании (табл. 1).

Таблица 1

Выбор наиболее значимых для респондента ценностей

Варианты ответов	Частоты	Проценты
Активная, деятельная жизнь	121	41,4
Жизненная мудрость	39	13,4
Здоровье	195	66,8
Красота природы и искусства	21	7,2
Интересная работа	116	39,7
Любовь	125	42,8
Наличие хороших и верных друзей	148	50,7
Материально – обеспеченная жизнь	115	39,4
Общественное признание	11	3,8
Познание	29	9,9
Продуктивная жизнь	42	14,4
Развитие	111	38,0
Развлечения	34	11,6
Свобода	74	25,3
Счастливая семейная жизнь	142	48,6
Счастье других	17	5,8
Уверенность в себе	64	21,9
Творчество	29	9,9

Примечание. Сумма ответов по столбцам превышает 100%, поскольку предполагался выбор нескольких вариантов ответов из предложенных.

Согласно ответам студентов, приоритеты в наборе ценностей распределились следующим образом: здоровье (66,8%), дружба (50,7%), семья (48,6%), любовь (42,8%), активная жизнь (41,4%). Тем самым, была определена система ценностных координат, в которую должны быть встроены социальные представления студентов о наркомании. Обозначенные ценностные приоритеты студентов представляют собой основу для формирования убеждений студентов относительно значимости проблемы распространения наркомании. Данные убеждения могут служить основанием для формирования социальных представлений.

В следующем вопросе студентам предлагалось определить те ценности, которые удержали бы их от употребления наркотиков (табл. 2).

Таблица 2

Что удерживает Вас от употребления наркотиков?

Вариант ответа	Частоты	Проценты
Опасность заболеть ВИЧ-инфекцией и вирусными гепатитами В и С	88	30,1
Полное привыкание	76	26,0
Ранняя смерть	79	27,1
Боязнь оказаться в тюрьме	30	10,3
Боязнь остаться ненужным обществу	38	13,0
Потеря уважения близких	69	23,6
Боязнь отлучения от семьи	39	13,4
Осознанное отрицательное отношение к употреблению наркотиков	173	59,2
Другое (напишите)	16	5,5

Примечание. Сумма ответов по столбцам превышает 100%, поскольку предполагался выбор нескольких вариантов ответов из предложенных.

И в этом случае приоритеты распределения ценностей по шкале значимости оказались схожими с ответами на первый вопрос: активная жизненная позиция (осознанное отрицательное отношение к употреблению наркотиков) - (59,2%), здоровье (30,1%), смертность (27,1%), уважение близких (23,6%), семья (13,4%).

Таким образом, анализ ответов на данные вопросы позволил разместить социальные представления студентов о наркомании в системе социокультурных ценностей и, тем самым, определить смысловое содержание данных социальных представлений. В процессе анкеровки социальных представлений студентов изучаемый социальный объект – наркомания - был идентифицирован и размещен в матричную систему знаний и убеждений студентов.

Для реализации эффективной коммуникации субъекты должны опираться на некие общие понятия, которые известны всем. Посредством объективации абстрактный объект – наркомания - превращается в часть социальной реальности, становится доступным для коммуникации. Содержание понятия «наркомания» в этом случае разбивается на ряд смысловых категорий (причины распространения наркомании, знание законодательной ответственности за употребление, хранение и сбыт наркотических веществ и т.д.), воспринимаемых студентами идентично в социальном контексте. Социальные представления исполняют роль тех самых фильтров, через призму которых преломляется информация, касающаяся наркотиков, их опасности для здоровья (табл. 3, 4).

Таблица 3

В чем причина распространения наркомании в последнее время?

Варианты ответов	Частоты	Проценты
Неудовлетворенность жизнью	133	45,5
Моральная деградация общества, вседозволенность	157	53,8
Плохая работа правоохранительных органов	45	15,4
Излишняя свобода, отсутствие организованного досуга	95	32,5
Влияние наркобизнеса, доступность наркотиков	117	40,1
Безработица, экономические проблемы	39	13,4
Влияние массовой культуры и СМИ	66	22,6
Слабость профилактической работы	19	6,5
Другое	5	1,7

Примечание. Сумма ответов по столбцам превышает 100%, поскольку предполагался выбор нескольких вариантов ответов из предложенных.

Распределение студентами причин распространения наркомании по степени значимости и, таким образом, выделение определенных категорий, составляющих социокультурный контекст изучаемого объекта «наркомания»: моральная деградация общества, вседозволенность (53,8%), неудовлетворенность жизнью (45,5%), влияние наркобизнеса, доступность наркотиков (40,1%), излишняя свобода, отсутствие организованного досуга (32,5%), влияние массовой культуры и СМИ (22,6%) – позволяет предположить, что процесс объективации реализовался в данном случае в форме схематизации, т.е. ассоциирования объекта – наркомании – с визуализируемыми конструктами (безработица, наркобизнес и т.д.).

Таблица 4

Известна ли Вам законодательная ответственность Российской Федерации за употребление, хранение и сбыт наркотических веществ?

Вариант ответа	Частоты	Проценты
Да, очень хорошо известна	56	19,2
Да, известна в общих чертах	110	37,7
Мало известна	93	31,8

Совсем не известна	21	7,2
Нет ответа	12	4,1
Итого	292	100

Наибольшее число ответов студентов на данный вопрос («да, известна в общих чертах» и «мало известна» = 69,5%) предполагает наличие определенной социальной позиции, обуславливающей социальное поведение и оправдание осознанного отношения к вопросу распространения наркомании.

Одной из функций социальных представлений является функция регуляции социального поведения. В соответствии с теорией социальных представлений С.Московиси, индивид в процессе реакции на систему внешних стимулов, непременно обращается как к своему прошлому перцептивному опыту, так и ориентируется на членов своей социальной группы, элементом которой он себя воспринимает и, опираясь на систему общих представлений и убеждений которой, предпринимает то или иное действие, принимает решение о том или ином поступке (табл. 5 – 7).

Таблица 5

Знакомы ли Вы лично с людьми, употребляющими наркотики?

Варианты ответов	Частоты	Проценты
Нет, я не общаюсь с такими людьми	200	68,5
Да, в кругу моих друзей, знакомых такие люди есть	70	24,0
Да, я знаю много таких людей	19	6,5
Да, все мои знакомые, так или иначе, употребляют наркотики	1	0,3
Отказ от ответа	2	0,7
Итого	292	100

Таблица 6

Предлагали ли Вам когда-либо попробовать наркотики?

Варианты ответов	Частоты	Проценты
Да	91	31,2
Нет	189	64,7
Отказ от ответа	11	4,1
Итого	292	100

Ответы на приведенные вопросы позволяют вынести суждение о социальном окружении респондентов как о достаточно благополучном с точки зрения распространения наркомании. Большинство студентов (68,5%), таким образом, относится к той категории субъектов, которая формирует социальные представления о наркомании на основе теоретических представлений о конкретном содержании проблемы и не имеет опыта общения с лицами, употребляющими наркотики. Этим обстоятельством в большей степени объясняется распределение ответов на следующий вопрос анкеты.

Таблица 7

Как бы Вы поступили, если бы Вам предложили попробовать наркотическое средство?

Варианты ответов	Частоты	Проценты
Отказался бы	243	83,2
Исходил бы из того, какой наркотик	12	4,1
Повел бы себя в зависимости от ситуации и настроения	15	5,1
Попробовал бы	5	1,7
Не знаю	14	4,8
Отказ от ответа	3	1,0
Итого	292	100

Анализируя данные ответы, можно сделать вывод, что студенты НГТУ, не общающиеся с людьми, употребляющими наркотики (68,5%), не попадавшие в социальную среду, предлагающую употребить наркотики (64,7%), соответственно отказались бы пробовать наркотическое вещество, в случае поступления предложения (83,2%). Здесь прослеживается прямая взаимосвязь между тем социокультурным контекстом, в котором формировались социальные представления студентов о наркомании (приоритетная система ценностей и социальное окружение) и социальным поведением, обоснованным этими социальными представлениями. Анализ ответов на данные вопросы является прямой иллюстрацией регулятивной функции социальных представлений, проявляющейся в оправдании социального поведения субъектов сложившимися в процессе повседневной коммуникации социальными представлениями.

Таким образом, посредством анализа ответов респондентов на вопросы, конкретизирующие проблему распространения наркомании в среде студенческой молодежи, открывается возможность выявить процесс формирования и трансформации социальных представлений в отношении интересующего нас объекта - наркомании. При ответе на ряд вопросов у респондентов выявлено доминирование различных функций социальных представлений: коммуникативной, связанной с поддержанием социальной идентичности, и функцией регулирования социального поведения и социальных отношений.

Дальнейшая разработка исследуемой проблемы могла бы идти в нескольких направлениях: было бы интересно, с теоретической и прикладной точек зрения, рассмотреть динамику трансформации социальных представлений о распространении наркомании в молодежной среде, связанную с исследованием различных групп молодежи (не только студенческой); было бы актуально разработать концепцию профилактики наркомании в молодежной среде, основываясь на данных, полученных в результате проведения эмпирических исследований.

Библиографический список

1. Правительство РФ: Наркоманы составляют 6% населения России [Электронный ресурс] / <http://www.info-altai.ru/news/pravitelstvo-rf-narkomany-sostavlyayut-6-naseleniy> // ФСКН: в РФ количество наркоманов за год снизилось на 6% <http://www.bfm.ru/news/220702>
2. **Бовина, И.Б.** Обыденные представления о наркотиках в молодежной среде: теоретические аспекты [Электронный ресурс] // Психология и право. 2012. №4. URL: <http://psyjournals.ru/psyandlaw/2012/n4/56601.shtml>
3. Основные показатели деятельности наркологической службы в Российской Федерации в 2010-2011 годах // Статистический сборник. – М., 2012.
4. **Дуаз, В.** Феномен анкеровки в исследованиях социальных репрезентаций // Психологический журнал. 1994. № 1.
5. **Бовина, И.Б.** Наркотики и наркоманы: особенности социальных представлений в двух группах молодежи [Электронный ресурс] / И.Б. Бовина [и др.] // Психологическая наука и образование. 2012. №3. <http://www.vash-psiolog.info/psih/20260-narkotiki-i-narkomany-osobennosti-socialnyx-predstavlenij-v-dvux-gruppax-molodezhi1.html>
6. **Бовина, И.Б.** Россия в современном мире: подход теории социальных представлений / И.Б. Бовина [и др.] // Информационный гуманитарный портал «Знание. Понимание. Умение». 2009. №2. – Педагогика. Психология. <http://www.zpu-journal.ru/e-zpu/2009/2/Bovina&Stefanenko&Tikhomandritskaya&Malysheva&Golynchik/>
7. **Березина, Е.Б.** Содержание и структура обыденных представлений о болезнях в молодежной среде: дисс. ... канд. психол. наук / Е.Б. Березина. – М., 2011.
8. **Березина, Е.Б.** Алкоголизм и наркомания в обыденных представлениях молодежи / Е.Б. Березина, И.Б. Бовина // Вестник РУДН. Психология и педагогика. 2010. №3.
9. **Бовина, И.Б.** Социальные представления о здоровье и болезни: структура, динамика, механизмы: дисс. ... докт. психол. наук / И.Б. Бовина. – М., 2009.

10. **Емельянова, Т.П.** Конструирование социальных представлений в условиях трансформации Российского общества / Т.П. Емельянова. – М., 2006.
11. **Емельянова, Т.П.** Социальное представление – понятие и концепция: итоги последнего десятилетия // Психологический журнал. 2001. Т. 22. № 6.
12. **Гребенникова, О.В.** Особенности социальных представлений современных российских подростков [Электронный ресурс] // Психологические исследования. 2010 №. 2(10). <http://psystudy.ru/index.php/num/2010n2-10/308-grebennikova10>

*Дата поступления
в редакцию 15.04.2014*

E.I. Skobeleva, M.V. Prokhorova, A.V. Efimov

**ANALYSIS OF DRUG ADDICTION RELATED SOCIAL CONCEPTS ACCEPTED
BY THE STUDENTS (BASED ON THE RESULTS OF THE SOCIOLOGICAL SURVEY)**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Purpose. The article presents discussion of dependence between social behavior of young people and the socio-cultural context being used by them in developing their beliefs with respect to drug addiction issues.

Design/methodology/approach. Complex nature of perception of the drug-related problems by young people, as well as research of social practice of drug use, is considered from the point of view stated by the theory of social concept by Serg Moscovichy.

Findings. Sources responsible for formation of social concepts of the students and specific nature of their impact on regulation of social behavior are analyzed.

Originality/value. The data of a sociological survey about the attitude to the problems of drug addiction conducted among the students of Nizhny Novgorod State Technical University named after R.E. Alekseev in January 2014 served as an empirical basis of the present research.

Key words: social concepts, objectification, anchoring, value oriented normative system of the community, drug addiction, respondent.

УДК 316.65.0

А.В. Багаев

УПРАВЛЕНИЕ ЖИЗНЬЮ ЧЕЛОВЕКА: ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Рассматривается структура и динамика управления жизнью человека. Главной проблемой анализа в статье является проблема влияния управления на мышление и сознание личности. Предметом настоящей работы является исследование управления жизнью человека как творческого начала и движущего фактора развития социальных систем.

Представлен категориальный анализ управления жизнью человека, выявлены методологические аспекты его социологического дискурса. В качестве ключевого условия реализации управления жизнью человека обозначены аспекты психологии. Центральный момент работы заключен в раскрытии взаимосвязи современного общества и развития личности. Отдельно рассмотрен вопрос о ненасильственном управлении.

Ключевые слова: общество, управление, личность, мышление, сознание, жизнь, социальные системы, психология.

Каждая страна на определенном этапе развития обладает своими культурой и мировоззрением, стереотипами поведения и внутренними состояниями, идущими из прошлого. На уровне семьи психологический ресурс человека определяется его окружением: кругом общения, образовательно-профессиональной средой, СМИ, бытом и досугом, культурой в целом. В ведущих странах на современном этапе ориентирами жизни человека стали: чувственно-материальные удовольствия, деньги, власть, статус, обладание информацией, которые не обеспечивают сами по себе гармоничной и счастливой жизни. Существуют произвольные и непроизвольные страхи, иллюзии, мечты, которые, подобно мифам, наполняют жизнь современного человека. В большой степени, бытие людей протекает хаотично, неосознанно; диктуется необходимостью, чужой волей, неконтролируемыми эмоциями. Поэтому существует проблема управления человека и ее решения с целью достижения наиболее гармоничной жизни. Действительно, феномен управления пронизывает социум на всех его уровнях. Мы вольно и невольно являемся участниками процесса управления.

Управление нами происходит через государство, СМИ, образовательно-профессиональную среду, традиционную культуру (в том числе семью) и пр. *Управление собой* включает в себя: самоуправление, управление через психологические центры и группы единомышленников, любую среду, которая способствует управлению собственными состояниями, эмоциями, поведением.

В данном исследовании рассматривается совершеннолетний человек, которому необходимо обладание умениями себя организовать и замотивировать, навыками самосовершенствования с целью выработки гармоничного отношения с миром и самим собой.

Повседневная жизнь, считающаяся до недавнего времени не достойная внимания, становится объектом рассмотрения многих наук. Именно в сфере обыденного и происходит основная жизнь человека с его чувствами, мыслями, словами, поведением, делами, общением. Поэтому осознанному управлению должны подвергаться все сферы жизни человека: 1) личность (чувства, ценности, мышление, мировоззрение, планирование, развитие и пр.), 2) общение (семья, образовательно-профессиональная среда, СМИ, различные коммуникации, культура в целом), 3) профессиональная работа (люди, объекты, процессы, информация, деньги и пр.), 4) дом (вещи, порядок, чистота и пр.), 5) культура (идеальная и материальная, СМИ, хобби и пр.), 6) природа (здоровье, питание, гигиена и пр.).

Управление от маленьких объектов и процессов до больших включает в себя следующие этапы: позитивные мышление и чувства, постановка целей, планирование и учет, кон-

кретные действия, анализ результатов. Речь идет об осуществлении *глобального сценария жизни*, самосовершенствовании и развитии во всех сферах проявления человека.

Хаотичность повседневной жизни, особенно в чувствах, мыслях, нуждается в управлении. Не «психологические игры», самоуглубление и постоянная рефлексия, а реальное складывание нового *образа жизни* через самосовершенствование и самоорганизацию. Эффективные результаты получаются тогда, когда человек работает над собой не один, а в команде единомышленников под руководством опытного, профессионального наставника (коучинг).

На данный момент об управлении больше всего известно в сфере бизнеса, менеджмента, когда сама жизнь (успешные продажи!) подсказывает человеку быть более уверенным, коммуникабельным, планомерным. Также управление в смысле «самосовершенствование» ассоциируется с психологом, который вынужден заниматься с уже запущенными проблемами человека в семье и на работе (искажение характера, неврозы, неадекватность реальности). В данном исследовании, не умаляя заслуг бизнеса и психологии, разрабатывается программа исследований комплексного (тотального!) управления жизнью человека, не ограничиваясь его субъективностью. Решение многих современных проблем человечества и конкретного общества, группы, индивида лежат в осуществлении управления, согласованности действий, особо уделяя внимание психологической стороне жизни человека, его сознанию. Масштабность проблемы управления жизнью человека преодолевается последовательностью и постепенностью ее решения.

Управление возможно только при условиях хозяйственной, социальной, психологической самодостаточности и самостоятельности, позволяющие преодолевать социальный инфантилизм и нежелание быть собой в массовой культуре. Управление будет оправдано, если оно служит не только эгоистическим целям, но и социальному благу.

Большинство людей в обществе потребления заняты потреблением и лишь единицы устремлены к развитию. Оптимальным является развитие как внутренней, так и внешней гармонии с собой и миром. Развитие может быть выполнением чужого сценария жизни. Часто неумение адаптироваться к жизненным требованиям и неустроенность личной жизни приводит человека к необходимости развития. Социальными институтами, выполняющими функции развития, могли бы стать в полной мере государство, семья, образовательно-профессиональная среда, СМИ, другие общественные организации. Но для современного общества данные задачи и ответственность за них скорее не характерны. Неосознанно, такие черты, как умение общаться, позитивное мировосприятие, активная позиция, сотрудничество, уверенность становятся востребованными. Чаще людям не хватает элементарной психологической культуры для нормальной жизнедеятельности, а не стремления к высоким идеалам самосовершенствования. Для повседневной жизни более необходимыми являются успешность в профессии и в отношениях с близкими. Многолетний опыт и результаты исследований психологов приводят к следующим законам счастья [1]: 1) болеть можно, но нельзя чувствовать себя больным, 2) любовь – это жизнь. Умение выслушать, посочувствовать, открытость, доброжелательность – залог долголетия, 3) уметь прощать обиды, 4) учиться никогда не поздно и есть чему (интересы, развитая культура, ответственность к здоровью).

Одним из аспектов управления является самоорганизация – осознанный процесс управления своей жизнью. К эффективным методам самоорганизации относятся: записанные планы действий, четкие действия по времени, выработка позитивных привычек (в том числе управления!), привлечение других людей к управлению. Организация жизни предполагает, где, с кем и с каким планом мы живем.

Управление, в конечном счете, направлено на повышение качества жизни современного общества [2]. Для его достижения, как полагает С. Кови, необходимо опираться на следующие принципы [3, с. 32]: 1) проактивность, 2) представление конечной цели, 3) сначала делать то, что необходимо делать сначала, 4) думать, что выиграл, 5) сначала понять, а потом быть понятым, 6) достижение синергии, 7) независимость.

Управление имеет такие затруднения, как утрата человеком контроля над многими социальными процессами, увеличившееся неопределенность, незащищенность перед быстро меняющейся внешней средой, отказ от целей и планов. Управление также связано с самоопределением человека - познанием своих качеств, ограничений и возможностей, потребностей и целей.

Всеобщность и универсальность управления позволяет использовать его в практической жизни. Управлять – значит вызывать желательное (устранять нежелательное) поведение, свойства человека [4]. К составляющим управления относятся: осознание потребностей, ориентировка в ситуации, формулировка целей, программирование поведения, регулирование отдельных действий с планом и результатов с целью. В любом управлении должны быть две стороны: управитель и исполнитель (человек может быть для своего управления в двух лицах). Управление передается автоматически и осознанно. Гомеостаз различных систем предполагает отлаженный механизм управления. Кроме того, потребности и эмоции человека выступают как управитель. Переживаемые эмоции обиды, вины становятся управителями сознания. В этом случае управление безличное. Ошибки в управлении могут приводить к болезням.

Различают две парадигмы управления: насилия (принуждения) и ненасилия (поощрения). Важно отметить, что более действенным является скрытое принуждение через вызываемые в человеке чувства вины, стыда. Это так называемые «программы управления», неосознанно формирующиеся при социализации в данной культуре. В управлении большую роль играют внешние и внутренние мотивы управителя и исполнителя и их несогласованность. В большей степени, управление можно рассматривать как общение, коммуникацию двух субъектов данного процесса. Именно культура в целом является фактором управления, задающая программы и стереотипы эмоций и действий каждого человека.

Статусы и роли человека становятся факторами управления, закрепляясь в характере. В связи с этим, различают принудительное, автоматизированное, сознательное, безличное и личное управление. Например, любовь к труду и ответственность – более эффективны в управлении, нежели внешнее принуждение, действующее через вину, стыд, страх и т.п. Ожидание наказания – насильственная программа управления, порождающая негативные цели и отсутствие творчества. Управление насилием ведет к болезням (например, пищеварительная реакция на эмоциональный стресс). Принудительная педагогика превращает познание в средство избавления от неприятности. Любое поведение всегда имеет эмоциональное подкрепление (позитивное, негативное, нейтральное). Именно это является основой эффективного управления. Учет различных факторов управления (средств, условий, внешней среды, процесса и др.), в конечном итоге, - показатель благополучия человека и общества на всех уровнях их бытования.

Целью любого управления является управляемость собой и другими. Та или иная программы управления становятся привычкой, стереотипами данного общества. Ориентация на управление ненасилием сопутствует чувству выполненного долга, получению наград и званий, признанию, любви, творчеству и свободе. Напротив, насилие ведет к утрате смысла жизни, неуважению себя, подавленному состоянию, различным формам отчуждения. Такое управление создает напряжение, стресс, порабощенность, неприятный гнет обязанностей. Действительно, тот, кто использует насилие над собой, причиняет насилие другим. В то же время, полностью от насилия отказаться нельзя, но его надо рассматривать как вынужденное, нежелательное, временное [4]. Напротив, саногенное мышление и управление ненасилием - свободное, желательное, стратегическое. Например, «кодирование» при лечении алкоголизма основано на устрашении (страх тяжелых последствий, если «выпить»). Внешний тоталитаризм 1930-х годов в СССР находит продолжение во внутреннем тоталитаризме сознания, основанного на страхе и насилии.

Таким образом, общество нуждается в обучении эффективному управлению. К функциональным элементам такого поведения относятся [4, с. 33]: ориентировка в ситуации, выбор и реализация необходимой программы управления и соответствующих средств, регули-

рование и корректировка процесса управления. Общим показателем эффективного управления является получение удовольствия и позитивных эмоций при выполнении любого дела, приносящего благо обществу и конкретному индивиду. Такими критериями эффективного управления являются [4, с. 37]: 1) полнота, устойчивость в достижении цели, 2) минимальные затраты времени, средств, усилий, 3) последствия управления. Эффективным управителем выступает самосознание исполнителя (например, когда «стыдно не работать»). Эмоция вины – средство управления. Однако приходится констатировать повседневный и обыденный характер программы насилия в различных сферах общества. Часто расхождения ожиданий одних субъектов и реальности (поведения других) порождает насилие в управлении. Необходимо учесть, что управление возможно ради власти, а не для обслуживания жизни. Подавление исполнителя, слом его воли закрепляется привычкой у управителя (родитель, начальник, глава страны).

Итак, необходимо правильно оценивать возможности исполнителя и управителя, знать их желания и как они меняются в различных ситуациях. Не случайно, главным искусством управления является вызывание позитивных эмоций и переживаний у всех участников процесса управления [4, с. 40].

Для управления собой необходимы признание и реализация следующих положений [5]: 1) уникальность своей индивидуальности, 2) неограниченные возможности в достижении своих планов, 3) эффективные самоорганизация и самоуправление всех сторон своей жизни, 4) необходимость быть исследователем мира и своей жизни (открытие новых идей, методов, способов существования), 5) бесконечный поиск и нахождение ответов на различные, жизненно важные вопросы, 6) быть открытым к различным альтернативам, преодолевать ограничения, 7) быть готовым к слому старых привычек и созданию новых для большей эффективности жизни, 8) использование интуиции, воображения, творчества, 9) постоянное обучение, развитие и систематическая практика.

Важным методом эффективного управления жизнью является перепрограммирование сознания на успех, позитивные эмоции от каждого дела. «Визуализация» намеченных целей с позитивным подкреплением и ежедневные усилия по реализации планов – гарант успешной жизни. Кроме того, усилением управления является согласованность действий в команде единомышленников. Уважение и забота друг к другу оборачивается личным продвижением в эффективном управлении собой и успехами в жизни.

Итак, действенным методом управления становятся позитивные эмоции, мышление и вера в успех каждого дела и всей жизни.

Чтобы сделать из неосознанного, по привычке управления (а оно есть всегда) сознательное необходимо уходить от негативного мышления, затруднений в общении, недостатка интересов, бездействия к более насыщенной, творческой жизни [6]. Счастье как раз и заключается в позитивном мышлении для достижения самоудовлетворения и уверенности в себе. Не случайно в управлении мотивация на успех занимает важное место на всех стадиях данного процесса (вынашивание идеи, цели; планирование; конкретные действия; анализ результатов).

Традиционная культура закрепляет в стереотипах сознания определенные эмоции на различные ситуации нашей жизни. Постепенное освобождение от негативных эмоций и есть дело сознательного и эффективного управления своей жизнью. Мир таков, каким его мы представляем из своего опыта. Поэтому важны наши реакции на различные ситуации. В конечном счете, именно управление своими эмоциями составляют важную сторону искусства управления своей жизнью в целом!

Управление собой «силовыми методами» (принуждением), для достижения цели «любой ценой» входит в противоречие с общечеловеческими ценностями. Действительно, конечной целью любого управления должно стать гармоничное развитие всей системы «общество-культура-природа» и, прежде всего, достижение общего блага.

Подлинное управление самим собой направлено не только на удовлетворение потребностей для комфортного существования, но и для реализации блага других людей на началах любви и альтруизма. Управление – это не только какое-то фрагментарное действие для конкретной ситуации, но и «механизм» осуществления «программы воспитания» (развитие, совершенствование), которая должна быть у каждого человека, группы, общества в целом! «Жизнь по плану» - это не обезличивание и роботизация нашей жизни, а творческий процесс управления своей жизнью, высвобождение энергии, времени, средств для достижения наилучших результатов и гармонии [7].

Современное общество социализирует удовольствия, формирует каналы удовлетворения потребностей. Освобождение энергии может происходить через одну какую-нибудь потребность; человек становится роботом своих желаний, а не сознательным управляющим своей жизни [7, с. 110]. Управление потребностями задается образцами культуры.

Важнейшей задачей является управление эмоциями с помощью ума. Структура эмоций основана на сравнении наших ожиданий (запрограммированных воспитанием от культуры) и реального поведения человека. Включение другого человека в нашу реальность (в смысле его «обязанности» действовать в нужном нам направлении) и порождает отрицательные эмоции. Общество социализирует нас через обиду, вину, стыд и пр., управляя нами таким образом изнутри. Сформировавшаяся от общества в человеке «Я-концепция» становится источником управления его поведения, эмоций. Такие факторы, как лишение любви, негативное отношение взрослых, отвращение значимых для человека людей приводят к проблемному существованию и затруднению управления самим собой.

Общая негативная реакция на среду, на оценивание меня другими препятствует нормальному процессу приспособления человека к условиям общества. Многие эмоции (например, зависть, тщеславие, гордость), будучи проявлением бессознательного, определяют текущее поведение человека. Действительно, дух соперничества современной культуры основан на сравнении черт характера, состояния, статуса, способностей и др. Эмоция неполноценности вытесняет уникальность человека. Управление наталкивается на отсутствие согласия с самим собой и миром. Степень стадности, «проницаемость границ Я» в переживании эмоций за другого также программирует наше поведение, управляет нами. В данном случае только прогностическая способность ума, сила мышления позволяет сознанию управлять нашей жизнью.

Исследование феномена «управление жизнью человека», в конечном счете, предполагает осуществление самовоспитания, достигаемого сознательно и планомерно, но далекого от превращения человека в робота. Целью самовоспитания (т. е. управления жизнью человека) является согласие с самим собой и миром. Выработка общих способностей [7, с. 135], необходимых для любой деятельности, ведет к гармоничной жизни. К ним относятся: сила воли, постоянство тренировки, режим дня, уверенность в успехе, борьба с пустым времяпровождением, контроль потребностей, взаимоотношения с другими людьми, обладание собой в критических ситуациях и др. Управление собой возможно на основе глубокого самопознания и опыта социализации.

Принятие себя таким, каков я есть, предполагает терпимость, а изменение черт – новое мышление о себе! Действительно, человек не должен быть придатком своих потребностей, которые управляют им, а не наоборот. Развитие потребностей в труде, заботе о близких, самореализации становятся предметом управления человека, вставшего на путь самосовершенствования. Не случайно, здоровый образ жизни, касаясь всех сфер проявления человека, основан на осознанном мышлении и управлении своим внутренним миром.

Препятствием к эффективному управлению является «парадигма насильственного управления» [7, с. 156], основанная на приращении страдания человеку, не выполнившего определенного задания, желательного поведения. В этом случае управляемый будет стремиться избавиться от страха, наказания. Но возможна и другая парадигма – ненасильствен-

ного управления, в которой движущей силой поведения выступает предвосхищение радости, удовольствия, позитивных эмоций. Условиями данной парадигмы являются [7, с. 172-174]: свобода (цель определена нами), привычка (делать то, что нравится), отсутствие эмоциональных барьеров к действию; постепенные, систематические усилия.

Основой любого научения (в том числе управления, новой жизни) является позитивные переживания, предвосхищение удовлетворения. Процессы управления включают в себя как выработку позитивных привычек, так и устранение негативных привычек.

Осознание различных слоев в составе человека способствует более эффективному его управлению. Различают человека физического, привычки, воли, морали, личности. Понимание данного факта помогает выстраивать гармоничное управление. В самом деле, любая работа состоит из: 1) пускового позитивного образа, 2) воображения всех действий и результата, 3) непривязанного труда, тотального поглощения делом, 4) награды за выполнение предыдущих ступеней [7, с. 204-205].

Управление охватывает все стороны жизни человека. Особое место занимают развитие способностей и психических процессов. Такие черты, как решение интеллектуальных задач, память, эмпатия, сосредоточение выступают не только с точки зрения их развития, но и управления ими. В этом аспекте самовоспитание – не специальное дело, а любое дело – средство самосовершенствования. Управление памятью, воображением, в конечном счете, представляет собой сознательное оперирование образами, подкрепленные позитивными эмоциями. К чертам саногенного мышления (СГМ) относятся [7, с. 237-241]: 1) динамизм «я – образы мира», полное погружение в реальность, отделение Я от негативных эмоций, 2) размышление о себе в состоянии покоя, 3) конкретное представление о структуре психических состояний, которые контролируются, 4) углубление знаний о стереотипах, программах культурного поведения, архетипах, 5) концентрация внимания.

Указанные черты СГМ, с нашей точки зрения, и являются программой исследования управления жизнью человека. Кроме того, необходимо учесть значение общения в самовоспитании. Выделяют следующие правила техники общения [7, с. 254-256]: 1) знание потребностей в общении, 2) контроль потребностей в общении, 3) знание целей (свои, партнера), 4) соответствие целей и мотивов реальности, 5) знание способов удовлетворения потребностей, 6) преодоление стереотипов для взаимосогласия, 7) стремление к естественности, 8) уникальность Я, 9) не использовать насилия.

Итак, управление жизнью человека включает в себя [7, с. 256-268]: 1) постановку целей самовоспитания, 2) необходимость наставника, 3) моральную поддержку окружения, 4) соревнование с самим собой. Следует отметить, что управление жизнью человека не исчерпывается только его психологическими моментами. Пронизывая все сферы жизни общества, управление прежде всего включено в семью и производственный коллектив. Так, например, выделяют следующие функции управления для любой организации [8, с. 45-46]: организация, планирование, мотивация, контроль, маркетинг. Поэтому перспективами исследования данной темы является изучение управления во всех сферах жизни общества. Тем не менее, универсальные закономерности управления жизнью человека раскрываются, прежде всего, через субъекта любой деятельности – личность!

Библиографический список

1. **Козлов, Н.И.** Законы счастливой жизни [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.psychologos.ru> (Дата обращения 02.08.2013).
2. **Соловьев, Е.С.** Качество жизни как фактор управления деятельностью человека в условиях современного российского общества: социологический анализ [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.dissercat.com/content/kachestvo-zhizni-kak-faktor-upravleniya-deyatelnostyu-cheloveka-v-usloviyakh-sovremennogo-ro#ixzz2Z06v9yxV> (Дата обращения 02.08.2013).

3. **Кови, С.** Семь навыков высокоэффективных людей [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://mediashow.ru/sites/default/files/books/2010/05/7_navykov_vysoko_effektivnyh_lyudey.pdf (Дата обращения 02.08.2013).
4. **Орлов, Ю.М.** Управление поведением [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://radarsgm.ru/knigi/upravlen-povedeniem-broshura-.htm> (Дата обращения 02.08.2013).
5. **Кехо, Д.** Подсознание может все! [пер. с англ.] / Д. Кехо. – 5-е изд. – Мн.: ООО «Попурри», 2003. – 176 с.
6. **Фолкэн, Чак Т.** Психология – это просто: [пер. с англ. Р. Муртазина] / Фолкэн, Чак Т. – М.: Агентство «ФАИР», 1997. – 640 с.
7. **Орлов, Ю.М.** Восхождение к индивидуальности: Кн. для учителя. – М.: Просвещение, 1991. – 287 с.
8. **Кнорринг, В.И.** Теория, практика и искусство управления: учебник / В.И. Кнорринг. – М.: Изд. группа НОРМА-ИНФРА-М, 1999. – 528 с.

*Дата поступления
в редакцию: 29.04.2014*

A.V. Bagaev

MANAGEMENT OF HUMAN LIFE: THE RESEARCH PROGRAM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

The main subject of analysis is steering structure and steering process of life person. The main problem to be analyzed in this paper is a problem steering influence of mentality and consciousness person. The paper contains the research steering of life person as creative base and moving factor of social system development. Categorical analysis steering of life person term and methodological aspects of its sociological discourse are also presented here. The main condition steering of life person realization is the complex aspects of psychology. The key point is the revealing of the interrelation of modern society and development person. Authors pay special attention to the steering is not forcible.

Key words: society, steering, person, mentality, consciousness, life, social system, psychology.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов

ПРИМЕНЕНИЕ ВАРИАЦИОННОГО ПРИНЦИПА ГАМИЛЬТОНА ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ МИКРОДАТЧИКОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексева

Вариационный принцип Гамильтона основан на законе сохранения энергии и применяется для установления уравнений движения различных механических систем. Он также полностью применим для микросистем, с помощью которых в настоящее время конструируются измерительно-информационные и управляющие устройства.

Удобный метод теоретических исследований имеет вариационный принцип Гамильтона в форме записи Лагранжа (лагранжиана). В свою очередь лагранжиан представляет собой запись полной энергии в виде суммы из трех составляющих: кинетической энергии, потенциальной и диссипативной (или энергии потерь). Каждая из составляющих энергии зависит от числа степеней свободы подвижных микромеханических узлов. В конечном итоге, форма записи Лагранжа позволяет представлять математические модели микродатчиков в виде передаточных функций широко используемых в приборостроении.

Ключевые слова: вариационный принцип Гамильтона, микродатчик, степени свободы, лагранжиан, обобщенные координаты и силы, передаточные функции.

При установлении уравнения вариационного принципа Гамильтона и его применении пользуются понятием обобщенных координат и сил. Записываются обобщенные координаты в следующем виде:

$$q_i = q_i(t, x_1, x_2, x_3, \dots, x_n), \quad i = 1, 2, 3, \dots, n, \quad (1)$$

где q_i – обобщенные координаты, представляющие собой траекторию движения i -й точки системы; x_i – декартовы координаты.

Справедлива также и обратная формулировка записи (1). Между дифференциалом и вариацией обобщенных координат существует свойство, выражающее независимость этих операций:

$$\delta(dq) = d(\delta q). \quad (2)$$

Рассмотрим возможные начальные условия для вариаций обобщенных координат. Пусть какая-либо система переместилась из точки A в точку B (рис. 1). Сплошной линией показано прямолинейное движение из начальной точки $q(t_1)$ в конечную точку $q(t_2)$ за время $t_2 - t_1$. Система альтернативно может перемещаться из той же начальной точки в ту же конечную точку за то же время окольными путями. На рисунке показано пунктирной линией. Здесь совершенно очевидно, что вариации траекторий в начальной и конечной точках равны нулю:

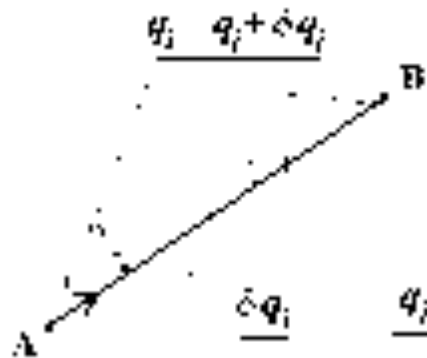


Рис. 1. Движение системы

$$\delta[dq(t_1)] = \delta[dq(t_2)] = 0. \quad (3)$$

В Гамильтоновой механике введено понятие – **действие**, математически оно записывается в следующем виде:

$$S = \int_{t_1}^{t_2} L dt, \quad (4)$$

где L – энергия системы, она имеет размерность (Нмс). Учитывая для консервативной системы закон сохранения энергии, имеем $L = \text{const}$. Следовательно, как бы не менялось численно в зависимости от времени действие системы, его вариация первого порядка всегда равна нулю:

$$\delta S = 0. \quad (5)$$

В общем виде первую вариацию **действия** системы через обобщенные координаты можно записать в следующем виде:

$$\delta S = \sum_i^n \left(\frac{\partial S}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial S}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i \right), \quad (6)$$

\dot{q}_i – производная по времени от обобщенной координаты.

Подставим **действие** (4) в уравнение вариации (6), получим

$$\delta S = \sum_i^n \left[\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} \delta q_i + \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i \right) dt \right]. \quad (7)$$

Преобразуем интеграл от второго слагаемого в (7), решив его по частям:

$$\int_{t_1}^{t_2} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta \dot{q}_i = L \delta q_i \Big|_{t_1}^{t_2} - \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \delta q_i dt. \quad (8)$$

В соответствии с начальными условиями (3) первое слагаемое в правой части уравнения (8) равно нулю. Объединяя формулы (7) и (8), получим

$$\delta S = \sum_i^n \left[\int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{\partial L}{\partial q_i} - \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) \delta q_i dt \right], \quad (9)$$

С учетом свойства (5) для вариации действия механической системы можно утверждать, что оно выполнится только в одном случае, когда подынтегральное выражение в (9) равно нулю. Окончательно запишем:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0. \quad (10)$$

Формула (10) и есть знаменитое уравнение вариационного принципа Гамильтона. Принцип проверен практикой и временем, он используется в различных отраслях науки и техники. Аналогичное по структуре уравнение было разработано Леонардом Эйлером для нахождения вариационных функционалов в задачах оптимизации.

Энергия L механической системы может быть представлена в виде лагранжиана. Лагранжиан назван по фамилии французского ученого Лагранжа и представляет собой запись полной энергии в виде суммы из трех составляющих: кинетической энергии, потенциальной и диссипативной (или энергии потерь):

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) + U(q) + D(\dot{q}), \quad (11)$$

где $T(q, \dot{q})$ – кинетическая энергия системы, которая является функцией локальных координат и скоростей, представляющих первые производные от координат по времени; $U(q)$ – потенциальная энергия, представляющая собой функцию от координат и не зависящую от скоростей системы, например, энергия сил упругости; $D(\dot{q})$ – диссипативная энергия. Чаще все-

го из диссипативной энергии рассматривают только составляющую потерь, например, потери на трение при скоростном демпфировании различных подвижных узлов.

В природе и в практической деятельности человека число степеней свободы механических систем обычно ограничено. Делается это чаще всего искусственно в соответствии со здравым смыслом, например, с целью удовлетворения технологическим возможностям или умышленному исключению ненужных в задаче движений. Кинетическая энергия в декартовой системе координат для объектов с шестью степенями свободы: три линейных x, y, z и три угловых α, β, γ , записывается в следующем виде:

$$T(x, y, z, \alpha, \beta, \gamma) = \frac{m\dot{x}^2}{2} + \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{m\dot{z}^2}{2} + \frac{J_x\omega_x^2}{2} + \frac{J_y\omega_y^2}{2} + \frac{J_z\omega_z^2}{2}, \quad (12)$$

где m - масса объекта; $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ - линейные скорости объекта; J_x, J_y, J_z - моменты инерции системы относительно осей x, y, z ; $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ - угловые скорости объекта. Число компонент в уравнении (12) зависит от числа степеней свободы исследуемого объекта, поэтому в каждом конкретном случае в первую очередь необходимо установить число степеней с учетом заданной погрешности от влияния отбрасываемых координат. Уравнение (12) для кинетической энергии связывает функционально между собой линейные и угловые скорости, а также массу и моменты инерции объектов, поэтому оно одновременно является одним из основных уравнений *связи*.

Производные от потенциальной энергии по обобщенным координатам названы обобщенными силами. Это могут быть силы упругости, массовые силы при действии ускорений, силы Кориолиса, электрические и магнитные силы, вызывающие действия и другие:

$$Q_x = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial x}, \quad Q_y = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial y}, \quad Q_z = -\frac{\partial U(x, y, z)}{\partial z}, \quad (13)$$

где Q_x, Q_y, Q_z - обобщенные силы.

Конкретизируем запись обобщенных сил упругости и сил демпфирования в декартовой системе координат:

$$\left. \begin{aligned} F_x &= G_x x, \quad F_y = G_y y, \quad F_z = G_z z, \\ F_\alpha &= G_\alpha \alpha, \quad F_\beta = G_\beta \beta, \quad F_\gamma = G_\gamma \gamma, \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

где G_x, G_y, G_z - жесткости линейных сил упругости; $G_\alpha, G_\beta, G_\gamma$ - жесткости угловых сил упругости;

$$\left. \begin{aligned} D_x &= K_x \dot{x}, \quad D_y = K_y \dot{y}, \quad D_z = K_z \dot{z}, \\ D_\alpha &= K_\alpha \dot{\alpha}, \quad D_\beta = K_\beta \dot{\beta}, \quad D_\gamma = K_\gamma \dot{\gamma}, \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

где K_x, K_y, K_z - абсолютные коэффициенты линейных сил демпфирования; $K_\alpha, K_\beta, K_\gamma$ - абсолютные коэффициенты угловых сил демпфирования.

Рассмотрим пример построения математической модели чувствительного элемента микроакселерометра осево-

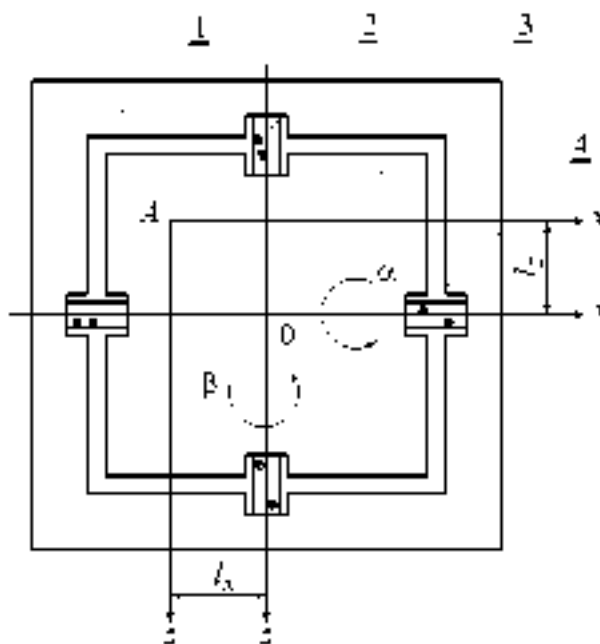


Рис. 2. Осевой чувствительный элемент микроакселерометра:

- 1 – неподвижная корпусная пластина,
- 2 - упругий подвес, 3 – подвижный узел,
- 4 – дефекты подвеса

го типа. Под влиянием действующих сил, приложенных к центру симметрии, жесткий центр имеет три взаимовлияющих движения, т.е. имеет три степени свободы: линейное перемещение вдоль оси y и угловые перемещения относительно осей x и z . Причем угловые перемещения относительно осей x и z обуславливаются технологическим разбросом параметров упругих перемычек или смещением центра масс относительно оси симметрии.

Точка A на рис. 2 представляет собой условную точку, при переносе в которую силы инерции F_j из действительного центра тяжести O подвижная часть чувствительной массы имеет только одну поступательную степень свободы - вдоль оси y . Координаты l_x и l_z зависят от неидентичности жесткостей тонких подвесов с разных сторон чувствительной массы. Для идеального подвеса $l_x = l_z = 0$.

Запишем для несовершенной конструкции чувствительной массы уравнения Лагранжа второго рода в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) - \frac{\partial T}{\partial \beta} = Q_\beta, \quad (16)$$

где $T = mv_c^2/2 + J_{cx} \omega_x^2/2 + J_{cz} \omega_z^2/2$ - кинетическая энергия жесткого центра чувствительной массы; m - масса жесткого центра чувствительной массы; $v_c = \dot{y} + \omega_x^2 l_x + \omega_z^2 l_z$ - линейная скорость центра масс; $\omega_x = \dot{\alpha}$, $\omega_z = \dot{\beta}$ - угловые скорости жесткого центра относительно осей x и z ; $J_{cx} = m(b_c^2 + c_c^2)/12$, $J_{cz} = m(a_c^2 + c_c^2)/12$, - моменты инерции относительно осей, проходящих через центр масс и параллельных соответственно осям x и z ; a_m, b_m, c_m - линейные размеры чувствительной массы; α, β - углы поворотов чувствительной массы относительно осей z и x соответственно. Преобразуем моменты инерции чувствительной массы относительно осей z' и x' :

$$J_{ax} = J_{cx} + ml_x^2, \quad J_{az} = J_{cz} + ml_z^2.$$

В развернутом виде формула для кинетической энергии жесткого центра представляется в виде

$$T = \frac{1}{2} m \dot{y}^2 + m \dot{y} \dot{\beta} l_z + m \dot{y} \dot{\alpha} l_x + m \dot{\alpha} \dot{\beta} l_x l_z + \frac{1}{2} J_{ax} \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_{az} \dot{\beta}^2. \quad (17)$$

Дифференцируя выражение (17), получим

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{y}} \right) &= m \ddot{y} + m \ddot{\alpha} l_x + m \ddot{\beta} l_z, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} \right) &= m \dot{y} l_x + J_{ax} \ddot{\alpha} + m \dot{\beta} l_x l_z, \\ \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} \right) &= m \dot{y} l_z + m \dot{\alpha} l_x l_z + J_{az} \ddot{\beta}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Силы упругости определяются в зависимости от соотношений жесткостей упругих подвесов, а силы демпфирования пропорциональны первой степени скорости соответствующего перемещения. Коэффициентами пропорциональности являются абсолютные коэффициенты демпфирования. Обеспечение демпфирования возможно несколькими способами: газодинамическим, гистерезисным или при помощи корректирующих устройств, включаемых в электрический контур обратной связи.

С учетом сил демпфирования линейных и угловых движений жесткого центра, а также линейных и угловых жесткостей сил упругих подвесов обобщенные силы можно выразить следующим образом:

$$\left. \begin{aligned} Q_y &= F_j - K_d \dot{y} - G_0 y, \\ Q_\alpha &= F_j l_x - K_{d\alpha} \dot{\alpha} - G_\alpha \alpha, \\ Q_\beta &= F_j l_z - K_{d\beta} \dot{\beta} - G_\beta \beta, \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

где $K_d, K_{d\alpha}, K_{d\beta}$ - линейный и угловые абсолютные коэффициенты демпфирования; G_0 - линейная жесткость упругих подвесов; G_α, G_β - угловые жесткости упругих переключателей относительно осей z и x , соединяющие жесткий центр с корпусной пластиной.

Подставив (18) и (19) в исходные уравнения Лагранжа (16), получим систему дифференциальных уравнений, описывающих движение интегральной чувствительной массы:

$$\left. \begin{aligned} ml_z \ddot{\beta} + ml_x \ddot{\alpha} + m\ddot{y} + K_d \dot{y} + G_0 y &= F_j, \\ ml_x \ddot{y} + ml_x l_z \ddot{\beta} + J_{ax} \ddot{\alpha} + K_{d\alpha} \dot{\alpha} + G_\alpha \alpha &= F_j l_x, \\ ml_z \ddot{y} + ml_x l_z \ddot{\alpha} + J_{az} \ddot{\beta} + K_{d\beta} \dot{\beta} + G_\beta \beta &= F_j l_z. \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

Перейдем от дифференциальных уравнений (20) к операторной форме записи, а также добавим к ним зависимость полного перемещения y_c центра масс от вращательных компонент:

$$\left. \begin{aligned} (ms^2 + K_d s + G_0)y + ml_x s^2 \alpha + ml_z s^2 \beta &= F_j, \\ ml_x s^2 y + (J_{ax} s^2 + K_{d\alpha} s + G_\alpha)\alpha + ml_x l_z s^2 \beta &= F_j l_x, \\ ml_z s^2 y + ml_x l_z s^2 \alpha + (J_{az} s^2 + K_{d\beta} s + G_\beta)\beta &= F_j l_z, \\ y_c &= y + \alpha l_x + \beta l_z, \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

где $s = d/dt$ - оператор Лапласа.

Передаточную функцию жесткого центра при реальных интегральных подвесах можно записать как отношение преобразования Лапласа для полного перемещения y_c центра масс к преобразованию Лапласа для входного воздействия F_j :

$$W_y(s) = \frac{y_c(s)}{F_j(s)} = \frac{y(s) + \alpha(s)l_x + \beta(s)l_z}{F_j(s)}. \quad (22)$$

Определим преобразования Лапласа для линейных и угловых перемещений из системы операторных уравнений (21):

$$y(s) = \Delta_y / \Delta, \quad \beta(s) = \Delta_\beta / \Delta, \quad \alpha(s) = \Delta_\alpha / \Delta, \quad (23)$$

где

$$\Delta = \begin{vmatrix} ms^2 + K_d s + G_0 & ml_x s^2 & ml_z s^2 \\ ml_x s^2 & J_{ax} s^2 + K_{d\alpha} s + G_\alpha & ml_x l_z s^2 \\ ml_z s^2 & ml_x l_z s^2 & J_{az} s^2 + K_{d\beta} s + G_\beta \end{vmatrix};$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} F_d & ml_x s^2 & ml_z s^2 \\ F_d l_x & J_{ax} s^2 + K_{d\alpha} s + G_\alpha & ml_x l_z s^2 \\ F_d l_z & ml_x l_z s^2 & J_{az} s^2 + K_{d\beta} s + G_\beta \end{vmatrix};$$

$$\Delta_\alpha = \begin{vmatrix} ms^2 + K_d s + G_0 & F_d & ml_z s^2 \\ ml_x s^2 & F_d l_x & ml_x l_z s^2 \\ ml_z s^2 & F_d l_z & J_{az} s^2 + K_{d\beta} s + G_\beta \end{vmatrix};$$

$$\Delta_{\beta} = \begin{vmatrix} ms^2 + K_{\text{д}}s + G_0 & ml_x s^2 & F_j \\ ml_x s^2 & J_{ax} s^2 + K_{\text{д}\alpha} s + G_{\alpha} & F_j l_x \\ ml_z s^2 & ml_x l_z s^2 & F_j l_z \end{vmatrix}.$$

Выражение (22) для передаточной функции жесткого центра с учетом (23) можно записать в виде

$$W_y(s) = \frac{\Delta_y + \Delta_{\alpha} l_x + \Delta_{\beta} l_z}{\Delta F_j}. \quad (24)$$

Подставим значения определителей Δ , Δ_y , Δ_{α} и Δ_{β} в формулу (24) и после преобразований получим передаточную функцию для интегральной чувствительной массы:

$$W_y(s) = K \frac{b_4 s^4 + b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + 1}{a_6 s^6 + a_5 s^5 + a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + 1}, \quad (25)$$

где

$$\begin{aligned} K &= \frac{b_0}{a_0} = \frac{G_{\alpha} G_{\beta} + G_{\alpha} G_0 l_z^2 + G_{\beta} G_0 l_x^2}{G_0 G_{\alpha} G_{\beta}}; \\ b_0 &= G_{\alpha} G_{\beta} + G_{\alpha} G_0 l_z^2 + G_{\beta} G_0 l_x^2; \\ b_1 &= [G_{\alpha} (K_{\text{д}} l_z^2 + K_{\text{д}\beta}) + G_{\beta} (K_{\text{д}} l_x^2 + K_{\text{д}\alpha}) + G_0 (K_{\text{д}\alpha} l_z^2 + K_{\text{д}\beta} l_x^2)] / b_0; \\ b_2 &= [K_{\text{д}\alpha} K_{\text{д}\beta} + K_{\text{д}} K_{\text{д}\beta} l_x^2 + K_{\text{д}} K_{\text{д}\alpha} l_z^2 + J_{cz} (G_{\alpha} + G_0 l_x^2) + J_{cx} (G_{\beta} + G_0 l_z^2)] / b_0; \\ b_3 &= [J_{cx} (K_{\text{д}} l_z^2 + K_{\text{д}\beta}) + J_{cz} (K_{\text{д}} l_x^2 + K_{\text{д}\alpha})] / b_0; \\ b_4 &= J_{cx} J_{cz} / b_0; \\ a_0 &= G_0 G_{\alpha} G_{\beta}; \\ a_1 &= (K_{\text{д}} G_{\alpha} G_{\beta} + K_{\text{д}\alpha} G_{\beta} G_0 + K_{\text{д}\beta} G_{\alpha} G_0) / a_0; \\ a_2 &= (m G_{\alpha} G_{\beta} + J_{az} G_{\alpha} G_0 + J_{ax} G_{\beta} G_0 + K_{\text{д}} K_{\text{д}\alpha} G_{\beta} + K_{\text{д}} K_{\text{д}\beta} G_{\alpha} + K_{\text{д}\alpha} K_{\text{д}\beta} G_0) / a_0; \\ a_3 &= [m (K_{\text{д}\alpha} G_{\beta} + K_{\text{д}\beta} G_{\alpha}) + J_{az} (K_{\text{д}} G_{\alpha} + K_{\text{д}\alpha} G_0) + J_{ax} (K_{\text{д}} G_{\beta} + K_{\text{д}\beta} G_0) + \\ &+ K_{\text{д}} K_{\text{д}\alpha} K_{\text{д}\beta}] / a_0; \\ a_4 &= [m J_{cz} G_{\alpha} + m J_{cx} G_{\beta} + G_0 (J_{ax} J_{az} - m^2 l_x^2 l_z^2) + m K_{\text{д}\alpha} K_{\text{д}\beta} + J_{az} K_{\text{д}} K_{\text{д}\alpha} + \\ &+ J_{ax} K_{\text{д}} K_{\text{д}\beta}] / a_0; \\ a_5 &= [m J_{cz} K_{\text{д}\alpha} + m J_{cx} K_{\text{д}\beta} + K_{\text{д}} (J_{ax} J_{az} - m^2 l_x^2 l_z^2)] / a_0; \\ a_6 &= m J_{cx} J_{cz} / a_0. \end{aligned}$$

В практических конструкциях интегральных датчиков ускорений исходные пластины кремния для травления ЧЭ подвергают тщательному контролю по равномерности распределения примесей и дислокаций. Контролю подвергаются также фотошаблоны и весь процесс анизотропного травления. Поэтому получаемые упругие подвесы по своим параметрам близки к идеальным. В рассматриваемом случае подвижный узел чувствительной массы имеет только одну линейную степень свободы - вдоль оси y . Передаточная функция такой чувствительной массы из уравнений (22) при $Q_{\alpha} = Q_{\beta} = 0$ может быть получена в следующем виде:

$$W_y^{\text{ИДБ}}(s) = \frac{1}{ms^2 + K_{\text{ДБ}}s + G_0}. \quad (26)$$

Очевидно, что при соблюдении требований ко всем технологическим процессам изготовления интегральных мембран их передаточная функция будет близка к виду (26). Ошибку крутизны статической характеристики мембраны можно рассчитать как отношение разности между крутизной характеристики несовершенного и идеального чувствительных элементов к крутизне идеального чувствительного элемента, т.е.

$$\delta_K = \frac{G_0 l_z^2}{G_\beta} + \frac{G_0 l_x^2}{G_\alpha}. \quad (27)$$

Найдем соотношения между угловыми и линейными жесткостями из рассмотрения перемещений чувствительной массы с несовершенными упругими подвесами от действия сил упругости и сил инерции. Допуская перемещения и углы поворотов чувствительной массы относительно исходного положения малыми, уравнения моментов сил для плоскостей xu и yz в соответствии со схемой рис. 2 можно записать так:

$$\begin{aligned} G_\alpha \alpha &= F_1(a_m - l_x) + F_2(a_m + l_x), \\ G_\beta \beta &= F_3(b_m - l_z) + F_4(b_m + l_z), \end{aligned} \quad (28)$$

где $F_1 = \frac{G_0}{2} y_1$, $F_2 = \frac{G_0}{2} y_2$, $F_3 = \frac{G_0}{2} y_3$, $F_4 = \frac{G_0}{2} y_4$ - силы упругости, приведенные к внешним сторонам чувствительной массы, вызванные суммарной силой:

$$y_1 = \left(\frac{a_m}{2} - l_x \right) \alpha, \quad y_2 = \left(\frac{a_m}{2} + l_x \right) \alpha, \quad y_3 = \left(\frac{b_m}{2} - l_z \right) \beta, \quad y_4 = \left(\frac{b_m}{2} + l_z \right) \beta$$

- перемещения внешних сторон чувствительной массы; α и β - соответственно углы наклонов плоскости жесткого центра относительно исходного положения. Выполнив преобразования в (28), получим

$$G_\alpha = G_0 \left(\frac{a_m^2}{4} + l_x^2 \right), \quad G_\beta = G_0 \left(\frac{b_m^2}{4} + l_z^2 \right). \quad (29)$$

Решая совместно уравнения (29) и (27), запишем ошибку крутизны статической характеристики интегральной чувствительной массы в виде

$$\delta_K = \frac{l_x^2}{a_m^2/4 + l_x^2} + \frac{l_z^2}{b_m^2/4 + l_z^2}. \quad (30)$$

Величины l_x и l_z имеют случайный характер и зависят от распределения дефектов в материале упругих подвесов. Для идеальных упругих подвесов $l_x = l_z = 0$, следовательно, ошибка крутизны характеристики равна нулю. В критическом случае, например, при разрушении каких-либо двух смежных упругих перемычек условная точка А перемещается на противоположный с ними угол чувствительной массы, а ошибка крутизны достигает 100 %. Результирующая формула (30) полезна для нахождения допустимой области смещения чувствительной массы, представляющей собой площадь $l_x l_z$, определяемую по заданной ошибке крутизны статической характеристики.

Выводы

1. Разработан обобщенный метод построения математических моделей микродатчиков;
2. Рассмотрен практический пример теоретического описания чувствительного элемента микроакселерометра осевого типа.
3. Показано возникновение возможных погрешностей характеристик микродатчиков, обуславливаемых неоднородностью конструкционного материала.

Библиографический список

1. Хаар, Д. Основы гамильтоновой механики / Д. Хаар. – М.: Наука, 1974. – 224 с.
2. Вавилов, В.Д. Интегральные датчики: учеб. пособие / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.02.2012*

V.D. Vavilov

APPLICATION OF THE VARIATIONAL PRINCIPLE OF HAMILTON TO BUILD MATHEMATICAL MODELS OF MICROSENSORS

Arzamas polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university
n.a. R.E. Alexeev

Purpose: The Variational principle Hamilton is founded on law of the conservation to energy and is used for determination of the equations of the moving the different mechanical systems.

Findings: He also shall completely use for micro systems by means of which at present create measuring-information and controlling device. The Suitable method of the basic researches has a variational principle Hamilton in the form record Lagranzha (lagranzhians).

Research /limitations /implications: In turn lagranzhians) presents itself writing the full energy in the manner of amounts from three forming: kinetic energy, potential and loss to energy (or energy of the losses. Each of forming energy depends on numbers of the degrees of the liberty rolling MEMS nodes.

Originality /value: Finally, the form record Lagranzha allows to present the mathematical models an microsens in the manner of transmission function broadly used in instrument construction.

Key words: variational principle Hamilton, microsensor, degree of the liberty, Lagranzhian, generalised coordinates and power, transmission functions.

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов¹, А.А. Грязев¹, С.И. Гайнов¹, С.Ф. Былинкин²**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ МИКРОСИСТЕМНОГО ДАТЧИКА
УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ**Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»²,

Рассмотрен вопрос разработки и оптимизации микросистемных датчиков угловых скоростей посредством конструктивных решений. Предложена новая конструкция микродатчика угловых скоростей, для которой получена математическая модель микрогироскопа как динамической системы в виде передаточной функции четвертого порядка. Рассмотрена электрическая схема датчика с широтно-импульсной модуляцией и ПИД-регулятором, отвечающая за съём сигнала и обеспечивающая обратную силовую связь.

Ключевые слова: микросистемные датчики, упругие подвесы, консоль, контурное демпфирование, точка резонанса, микродатчик угловых скоростей.

Существует множество конструктивных схем датчиков угловых скоростей (ДУС), выполненных по микросистемной технологии; их принцип действия основан на эффекте Кориолиса, при котором чувствительной массе придается тот или иной вид колебаний, на который накладывается вектор измеряемой угловой скорости. Возникающая кориолисова сила смещает колеблющуюся массу по направлению действия этой силы. Величина этого смещения пропорциональна измеряемой угловой скорости.

На рис. 1 приведена одна из возможных конструкций подвижного узла микрогироскопа, выполненного посредством специально спроектированных фотошаблонов. Состоит микрогироскоп из однородной пластины проводящего кремния, на которой размещены все узлы и элементы. Их названия приведены в подрисуночных подписях к чувствительному элементу. На рис. 2 представлен эскиз изоляционной обкладки чувствительного элемента. Изоляционная обкладка может быть выполнена, например, из непроводящего монокремния или из ионодержущего стекла. Обкладка представляет собой несущую пластину 1, на которой выполнены два одинаковых проводящих электрода 2 электростатического преобразователя момента, расположенные симметрично относительно оси x . На несущей пластине 2 имеются также: проводящие электроды 3 емкостного преобразователя угловых перемещений и проводящие электроды 4, предназначенные для возбуждения угловых движений маятника относительно оси y .

При наличии поворотной измеряемой скорости Ω_z , вектор которой направлен по оси z , на чувствительной массе 4 возникает знакопеременный момент от кориолисовой силы, направленный относительно оси x и приводящий ее вместе с внешней рамкой в колебания относительно той же оси. Частота этих колебаний совпадает с частотой вынужденных колебаний массы, а амплитуда колебаний пропорциональна измеряемой угловой скорости Ω_z .

Поскольку момент кориолисовой силы является знакопеременным, то он приводит во вторичные колебания внешнюю рамку вместе с чувствительной массой с той же частотой и с осью колебаний, ортогональной двум другим. Других движений в кинематической схеме нет. Мерой, определяющей величину поворотной скорости, является амплитуда колебаний чувствительной массы, на которую ее смещает момент кориолисовой силы. Учтем, что в рассматриваемой кинематической схеме для чувствительного элемента имеется две степени свободы, по которым возможны перемещения, но одна из этих степеней используется для возбуждения принудительных колебаний внутренней рамки (челнока).

Электростатический момент в компенсационных устройствах уравнивает в чув-

ствительном элементе соответственно действующий момент, сводя угловые перемещения чувствительной массы к нулю:

$$M_{\text{эл}} = M_{\text{кор}} + M_{\text{упр}} + M_{\text{помех}}, \quad (1)$$

где $M_{\text{эл}} = 2\varepsilon\varepsilon_0 U_{\text{оп}} U_{\text{вых}} FL/h^2$ – электростатический момент, уравнивающий чувствительную массу; ε_0 – диэлектрическая постоянная; ε – диэлектрическая проницаемость среды между подвижным и неподвижными электродами; $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение; $U_{\text{вых}}$ – выходное напряжение электронного контура регулирования; F – площадь подвижного электрода в плане (площадь чувствительной массы); L – плечо от оси качания x до центра обкладки силового преобразователя; h – зазор между подвижным и неподвижными электродами.

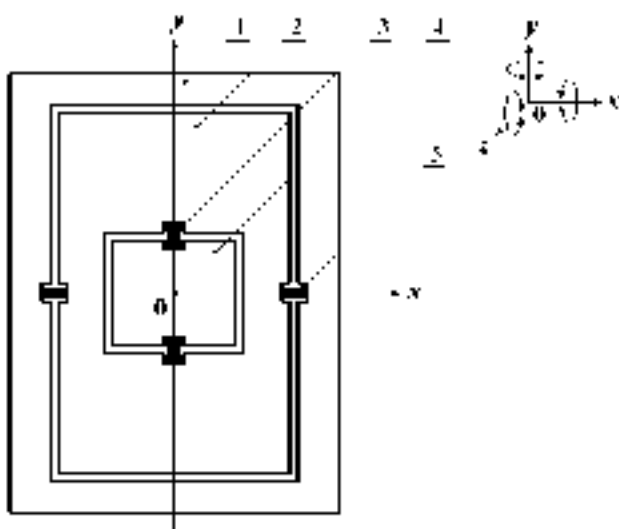


Рис. 1. Подвижный узел:

1 - несущая пластина; 2 - подвижный электрод силового преобразователя; 3 - упругие подвесы внутренней рамки; 4 - чувствительная масса (маятник); 5 - упругие подвесы внешней рамки

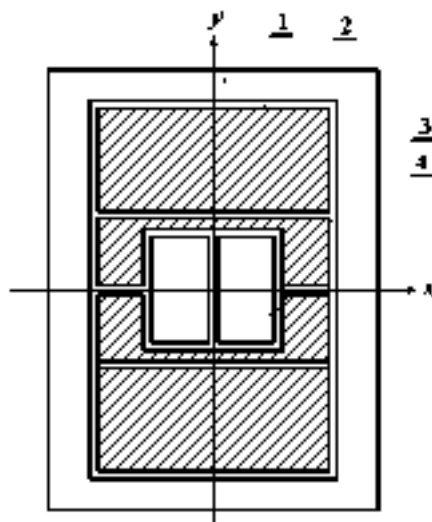


Рис. 2. Неподвижная обкладка чувствительного элемента:

1 - изоляционная пластина; 2 - проводящие электроды силового преобразователя; 3 - проводящие электроды емкостного преобразователя перемещений; 4 - электроды возбуждения принудительных колебания маятника

Момент кориолисовой силы относительно оси x определяется следующим выражением:

$$M_{\text{кор}} = 2m\omega_y l Q \Omega_z, \quad (2)$$

где m – чувствительная масса; ω_y – знакопеременная скорость чувствительной массы вдоль оси y ; Ω_z – измеряемая угловая скорость относительно оси z ; l – плечо колебаний чувствительной массы; Q – добротность механического узла.

Соответственно чем выше добротность, тем выше амплитуда колебаний и, следовательно, чувствительность механического узла. Угловая скорость перемещений чувствительной массы относительно оси y определяется частотой вынужденных колебаний и жесткостью подвесов в выбранном направлении.

Одним из преимуществ выбранной кинематической схемы является то, что жесткость подвесов механического подвижного узла может быть выполнена сколько угодно малой за счет увеличения длины струны подвеса. Так, жесткость подвеса на кручение с крестообразным поперечным сечением оценивается следующей формулой:

$$G = \frac{nE_{[100]}c_n^3 b_n}{32a_n(1+\gamma)}, \quad (3)$$

где a_n, b_n, c_n – соответственно длина, ширина и толщина струны подвеса в его сечении; n – количество подвесов; γ – коэффициент Пуассона. Причем ширина пружины b_n выполняется более чем на порядок ее толщины c_n , тем самым устраняется погрешность от воздействия боковой составляющей ускорения по оси y . Из приведенной расчетной формулы видно, что снижение жесткости пружины в зависимости от толщины ребра осуществляется по кубическому закону.

Соединение несущей пластины 1 с корпусом датчика угловых скоростей осуществляется по жесткому треугольнику с центром треугольника в центре тяжести чувствительной массы 4 . Обычно соединение осуществляют посредством промежуточной ситалловой пластины. Температурные коэффициенты корпуса, несущей и промежуточной пластин должны совпадать. Чаще всего для корпуса применяют нержавеющую сталь типа ковара. В динамическом плане подвижный узел датчика угловых скоростей имеет одну степень свободы и соответственно описывается передаточной функцией второго порядка:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{2m\omega_y l Q \Omega_z}{J_x s^2 + K_\phi s + G_\phi}, \tag{4}$$

где $J_x = m(a_m^2 + c_m^2)/12$ – полярный момент инерции подвижного узла относительно оси y ; $K_{\phi} = 2m\omega_y l Q$ – коэффициент чувствительности подвижного узла; K_ϕ – суммарный коэффициент потерь.

Демпфирование подвижного узла может осуществляться в электрическом контуре или газодинамическим методом. Количественно величина демпфирования определяется величиной скоростного момента в динамической системе.

Для определения передаточной функции маятникового акселерометра в замкнутом контуре справедлива структурная схема (рис. 3) с соответствующими параметрами. Одно из важных требований, предъявляемых к системам регулирования, заключается в том, чтобы постоянное входное воздействие обрабатывалось без установившейся ошибки.

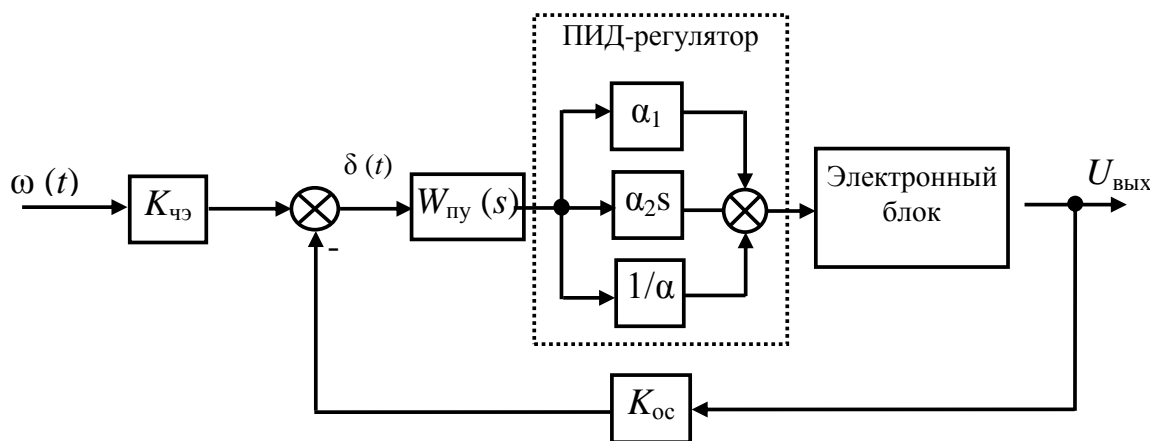


Рис. 3. Структурная схема микросистемного ДУС

Для статических систем при классическом синтезе этого можно добиться с помощью включения ПИД-регулятора, который для микросистемного ДУС является наиболее эффективным корректирующим устройством. Передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \tag{5}$$

где $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$ – постоянные времени звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего.

Настройка ПИД-регулятора осуществляется выбором его параметров в соответствии с задачей. В передаточной функции корректирующего устройства три неизвестных параметра. Их определение точнее всего осуществлять по экспериментальным данным. Тем не менее, возможно их определение теоретически по требуемым свойствам ПИД-регулятора. Многочисленными опытами установлено, что значение постоянных времени электрических узлов должно равняться постоянной времени механической части, например, челнока ДУС. Теоретически это можно объяснить как обеспечение синхронной работы всех узлов управляемой системы. При интегральном исполнении ДУС все постоянные времени соизмеримы и обеспечение постоянных времени механических узлов равных постоянным времени электронных узлов не представляет трудностей. Определим основные требования к корректирующему устройству исходя из естественных условий:

1. ПИД-регулятор должен обеспечивать оптимальное демпфирование в замкнутом контуре ДУС;
2. Для синхронной работы всех узлов микросистемного ДУС постоянные времени механической части и электрической: дифференциатора и интегратора должны быть равными между собой;
3. Постоянная времени апериодического фильтра сглаживания шумов дифференциатора должна определяться шумами на входе ПИД-регулятора;
4. В установившемся режиме работы ПИД-регулятор не должен оказывать влияния на статическую характеристику акселерометра;
5. ПИД-регулятор должен обеспечить задаваемую разработчиком полосу пропускания акселерометра.

Из этих требований получаем следующие равенства:

$$\alpha_1 = \alpha_3 = T = \sqrt{\frac{J_y}{G_\phi}}; \quad \alpha_2 = 1. \quad (6)$$

Совершенно очевидно, что в других устройствах значения параметров настройки ПИД-регулятора могут быть иными по сравнению с данным частным случаем.

С учетом отмеченных свойств передаточную функцию корректирующего устройства перепишем в виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \frac{T^2 s + Ts + 1}{Ts}. \quad (7)$$

Силовой электростатический преобразователь линеаризован по напряжению и работает на притяжение. Зазор между подвижным и неподвижным электродами составляет порядка десяти микрометров. Величина развиваемой силы электростатического преобразователя определяется следующим выражением:

$$M_{\text{эл}} = \frac{2\varepsilon\varepsilon_0 b_3 c_3 LU_{\text{оп}} U_{\text{упр}}}{h^2}, \quad (8)$$

где b_3 и c_3 – длина и ширина электрода; $U_{\text{упр}} = U_{\text{вых}}$ – управляющее напряжение.

Соответственно коэффициент передачи микросистемного датчика угловых скоростей в статике (крутизна характеристики) определится в виде:

$$K_\Omega = \frac{mvh^2}{\varepsilon\varepsilon_0 b_3 c_3 U_{\text{оп}}}, \quad (9)$$

где v – скорость раскочки подвижного узла.

Ограничение по нижнему пределу (порогу чувствительности) определяется в основном напряжением тепловых шумов, имеющих место в емкостной мостовой схеме:

$$U_{\text{тш}} = (2k \Theta / \pi C)^{1/2}, \quad (10)$$

где $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К – постоянная Больцмана; Θ – температура чувствительного элемента, К; C – емкость между электродами преобразователя перемещений, Ф. В чистом виде

напряжение тепловых шумов представляет собой погрешность нулевого уровня. Снизить эту погрешность возможно термостатированием чувствительного элемента при пониженной температуре или увеличением емкости преобразования перемещений. Последнее наиболее приемлемо для применения в микроакселерометрах и в микроДУСах.

Увеличение емкости между электродами преобразователя перемещений возможно двумя путями: уменьшением зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами, увеличением площади неподвижного проводящего электрода 3 (рис. 2) или одновременно тем и другим способами. Уменьшение зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами ограничено критической напряженностью электрического поля, при которой возникает электрический пробой. Например, в среде сухого азота критическая напряженность составляет $E_{кр} \approx 5 \cdot 10^6$ В/м.

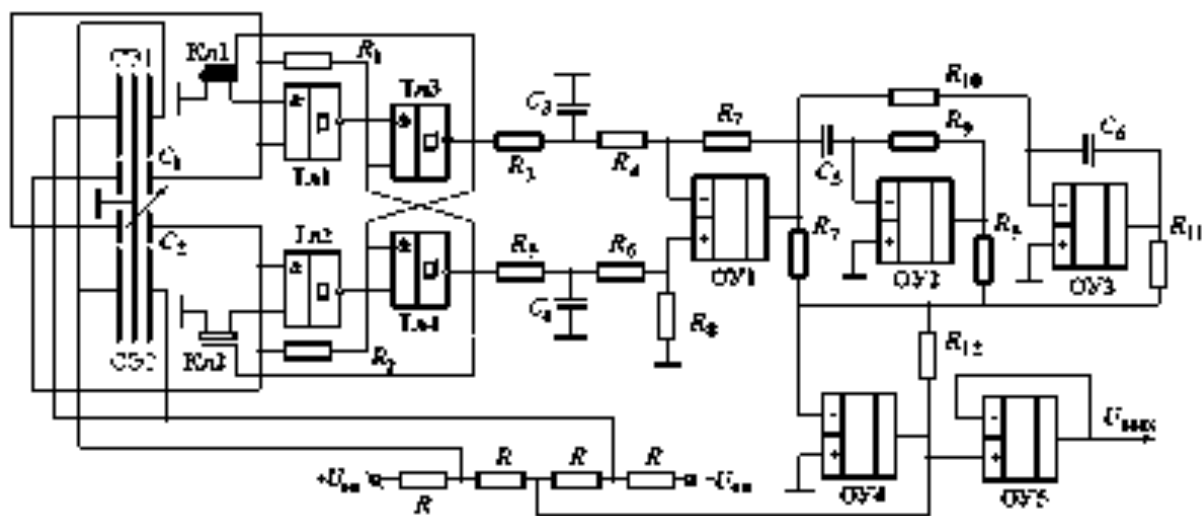


Рис. 4. Электрическая схема с широтно-импульсной модуляцией

Электроды емкостей датчика перемещений и датчика силы размещены на проводящей площади неподвижной обкладки и суммарно не могут превосходить эту площадь. В данном случае имеет место выбора оптимального соотношения между площадями датчика перемещений и датчика силы.

Для емкостных преобразователей перемещений с заземленным центральным электродом наиболее эффективной является электрическая схема с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ). Дифференциальные измерительные емкости C_1 - C_2 выполнены в виде неподвижных металлизированных электродов на стеклянных крышках и подвижного электрода, роль которого выполняет проводящий кремниевый маятник. Посредством триггера D_1 измерительных емкостей C_1 - C_2 и ключей Кл1 и Кл2 выполнен симметричный мультивибратор, на котором осуществлена широтно-импульсная модуляция. Заряд измерительной емкости C_1 проходит с прямого выхода триггера D_1 , а емкости C_2 – с инверсного. А разряд емкостей осуществляется поочередно посредством замыкания ключей Кл1 и Кл2.

Управляющими сигналами для ключей являются сигналы по перекрестным каналам с тех же выходов триггера. Временязадающие резисторы R_1 и R_2 выполнены одинаковыми. В нейтральном положении микроДУСа при $C_1 = C_2$ постоянные времени прямой и инверсной цепей мультивибратора равны, т.е. $R_1 C_1 = R_2 C_2$, а на выходе мультивибратора имеет место симметричный прямоугольный сигнал (меандр).

При действии ускорений подвижный электрод (проводящий маятник) дифференциальных емкостей отклоняется, что приводит к нарушению равенства постоянных времени и к ассиметризации выходного сигнала. Далее сигналы с прямого и инверсного выходов триггера

гера проходят через одинаковые низкочастотные фильтры ($R_{\Phi}-C_{\Phi}$) и широтно-модулированный сигнал преобразуется в разность напряжений на выходах фильтров, пропорциональную действующему ускорению.

Амплитуда импульсов на выходах триггера равна напряжению питания, поэтому оно должно быть стабилизировано, а в передаточных соотношениях должно использоваться как опорное $U_{оп}$. Пассивные фильтры нижних частот выделяют средние значения напряжений на измерительных емкостях, поступающих на прямой и инверсный входы операционного усилителя ОУ1 за один цикл в виде:

$$U_1 = U_{оп} \frac{C_1}{C_1 + C_2} \frac{1}{1 + R_3 C_3 s}; \quad U_2 = U_{оп} \frac{C_2}{C_1 + C_2} \frac{1}{1 + R_5 C_4 s}. \quad (11)$$

На входах масштабного усилителя, совмещенного с фильтром нижних частот, сигнал равен разности напряжений на пассивных фильтрах. При условиях $R_3 = R_4, C_3 = C_4$ имеем:

$$U_1 - U_2 = U_{оп} \frac{C_1 - C_2}{C_1 + C_2} \frac{1}{1 + R_3 C_3 s}. \quad (12)$$

Из уравнения (13) видно, что электрическая схема микросистемного с широтно-импульсной модуляцией (ШИМ) обладает логотметрическим свойством. Коэффициент передачи преобразователя перемещений в соответствии (12) определится в виде:

$$K_{\text{мн}} = U_{оп} \frac{L}{h}.$$

В соответствии со структурной схемой полная передаточная функция компенсационного ДУС с электростатической обратной связью и с ПИД-регулятором в прямой цепи имеет вид:

$$W_{\text{дус}}(s) = \frac{K(b_2 s^2 + b_1 s + b_0)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (13)$$

где $K = K_{\text{чз}} K_{\text{мн}} K_{\text{yc}}, a_4 = J T \tau T a_3 = K_{\text{дy}} T \tau + J T; a_2 = G T \tau + K_{\text{дy}} T + K_{\text{oc}} K_{\text{мн}} K_{\text{yc}} T^2;$
 $a_1 = (G_y + K_{\text{oc}} K_{\text{мн}} K_{\text{yc}}) T; a_0 = K_{\text{oc}} K_{\text{мн}} K_{\text{yc}}; b_2 = T^2; b_1 = T; b_0 = 1.$

Далее сигнал с выхода масштабного усилителя поступает в цепь обратной связи на вход резистивного линейризатора, который формирует напряжение на силовых электродах отработки. Величина электростатического момента, развиваемого электродами силовой отработки, с учетом линейризатора определяется следующим выражением:

$$M_{\text{oc}} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 F L}{2} \left[\frac{(U_{\text{оп}} + U_{\text{ynp}})^2}{(h - x)^2} - \frac{(-U_{\text{оп}} - U_{\text{ynp}})^2}{(h + x)^2} \right], \quad (14)$$

где x – смещение подвижного электрода от нейтрального положения. После несложных преобразований величину момента обратной связи можно получить в виде:

$$M_{\text{oc}} = \frac{2 \varepsilon \varepsilon_0 F L U_{\text{ynp}} U_{\text{оп}}}{h^2}, \quad (15)$$

с относительной ошибкой нелинейности по перемещению, равной

$$\delta_{\text{н}} = 2x/h. \quad (16)$$

В связи с тем, что ошибки компенсационных приборов определяются ошибками обратного преобразователя, то без принятия специальных мер, его ошибка нелинейности цели-

ком будет присуща всему измерительному прибору. Проблема может быть решена различными способами. Первый, наиболее приемлемый и точный, это использование интеграторов в прямой цепи, что придает компенсационным приборам астатический режим и отработку к нулю смещения x . В тех случаях, когда применение астатизма невозможно, например, из-за потери динамической устойчивости прибором, ошибку нелинейности можно снизить до допустимого значения ограничением величины смещения.

Крутизну характеристики электростатического преобразователя силы для передаточных функций компенсационных приборов можно представить, учитывая (15), в следующем виде:

$$K_{oc} = 2\varepsilon\varepsilon_0 U_{оп} FL/h^2.$$

Выводы

1. Наибольший вклад в погрешность микросистемного ДУС вносят нестабильность зазора h между подвижным и неподвижным электродами, нестабильность принудительной скорости v раскачки подвижного узла и нестабильность опорного напряжения $U_{оп}$;

2. Погрешности, вносимые в работу ДУС, имеют разные знаки, поэтому имеется возможность статической настройки крутизны характеристики.

Библиографический список

1. Северов, Л.А. Микромеханические гироскопы: конструкции, характеристики, технологии, пути развития / Л.А. Северов [и др.] // Изв. вузов. Приборостроение. 1998. Т. 41. № 1-2. С. 57–73.
2. Распопов В.Я. Микромеханические системы / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. –410 с.

Дата поступления
в редакцию 06.02.2014

V.D. Vavilov¹, A.A. Gryazev¹, S.I. Gainov¹, S.F. Bylinkin²

MATHEMATIC MODEL OF MICROSYSTEM ANGULAR RATE SENSOR

Arzamas polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC ARPE «TEMP-AVIA», Arzamas²

Question of the development and optimization micro gyroscope is considered in the article by means of constructive decisions. The mathematical model of a microgyroscope as dynamic system is received in the form of transfer function of the fourth-order. The largest contribution to the error of microsystem gyroscope made by instability gap between the movable and fixed electrodes, instability forced swing speed mobile node and the reference voltage instability. Errors introduced to the work of microgyroscope have different signs, so it make possible to configure the slope of the static characteristic. In considered constructive development of the introduction, bring positive whine effect are following: 1 – an using asymmetrical cruciform under-weight; 2 – an using dry air-cushion in electric sidebar; 3 – vibroinsulation sensor of the element by means of consoles; 4 – an using the power supply power converter alternating current. Due to using the noted innovations increased is sewn sensitivity microsystems gyroscope and reduced his inaccuracy.

Key words: microsystem sensors, strings of the lavalier, console, contour air-cushion, point reasonable, angular rate microsensors.

УДК 629.7.05/06

В.Л. Волков¹, Н.В. Жидкова¹, А.А. Жидков²**ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОТЫ МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ
ДАТЧИКОВ В УСЛОВИЯХ ПОМЕХ**Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО Арзамасский электромеханический завод²

Предмет, тема, цель работы: Получение методов обеспечения статической и динамической точности компенсационных микросистемных датчиков.

Методология проведения работы: Составлена математическая модель микросистемного датчика на основе оптимальных параметров корректирующего устройства, обеспечивающих минимальные динамические ошибки датчиков. Разработана методика компьютерного эксперимента на основе Matlab для получения оценок эффективности микромеханических систем в условиях помех.

Результаты: Исследована работоспособность микромеханических датчиков в условиях воздействия помех различной интенсивности с применением типовых фильтров. Представлены сравнительные результаты средних квадратов ошибок фильтрации Калмана, фильтрации Винера, апериодического фильтра в реальных условиях среды. Представлены результаты моделирования МЭМС в виде графиков средних квадратов ошибок. На графиках показана эффективность фильтра Калмана для широкого диапазона сигналов и помех.

Значения исследования: Применение предложенной методики обеспечения эффективности МЭМС дает минимальные средне квадратичные ошибки датчика в условиях различных помех.

Новизна/ценность: На базе рассмотренных методик проектирования и исследования МЭМС сформулированы требования к алгоритмам фильтрации по критерию динамической точности.

Ключевые слова: МЭМС, датчик, точность, чувствительность, средний квадрат ошибки, моделирование, фильтрация, эффективность.

Введение

В литературе наблюдается повышенный интерес к микроминиатюрным датчикам, построенным по микросистемной технологии [1–8]. Вопросы разработки и исследования таких датчиков связаны с применением физических законов, определяющих их принцип действия. Следует отметить, что принципы действия микромеханических датчиков разного назначения существенно отличаются друг от друга. Так, микромеханический датчик угловой скорости (ДУС) основан на эффекте Кариолисова ускорения, а микроакселерометр – на возникновении вращающих моментов или сил, действующих на подвижные массы, в соответствии с правилами традиционной механики. В данной статье, тем не менее, рассматриваются микроэлектромеханические системы (МЭМС) разного принципа действия, но имеющие ряд общих свойств.

Прежде всего, рассматриваемые МЭМС датчики выполняются по интегральной технологии на основе конструкционного материала кремния. *Во-вторых*, все рассматриваемые МЭМС приборы имеют компенсационную схему измерений. Основными показателями качества всех микромеханических датчиков при этом считается статическая и динамическая точность. Вопросы обеспечения статической и динамической точности МЭМС приборов затрагивались в ряде работ [4–7]. Так, для микромеханического акселерометра была показана возможность построения корректирующего устройства (КУ) с параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок [5, 6]. В работе [6] обсуждались вопросы по предельно допустимым отклонениям параметров КУ относительно оптимальных. Довольно убедительно в работах [6, 7] приведены результаты по учету влияния всех конструктивных параметров типового микромеханического датчика на крутизну статической характеристики и даны рекомендации к обеспечению стабильности этих параметров для достижения необхо-

димой статической точности. Выводы, полученные в названных работах относительно статической и динамической точности конкретных микромеханических датчиков, касаются достаточно широкого круга МЭМС независимо от их назначения и принципа действия.

Следует учесть, что при проектировании МЭМС датчиков, как правило, задаются диапазон измерения входной физической величины и предельная относительная ошибка датчика. Методика расчета конструктивных параметров датчика для заданного диапазона измерения в этом случае предполагает сначала вычисление соответствующего значения номинальной крутизны статической характеристики K , затем, с учетом предельно допустимой ошибки, формулирование требований к номинальным значениям конструктивных параметров и их возможным отклонениям [4]. Известно, что для компенсационной схемы измерения, при достаточно большом коэффициенте усиления в прямой цепи, крутизна характеристики K обеспечивается практически за счет коэффициента передачи чувствительного элемента датчика $K_{чэ}$ и коэффициента обратной связи $K_{ос}$: $K = K_{чэ} / K_{ос}$.

Это накладывает особые требования на стабильность этих параметров при воздействии возмущений среды. Часто в МЭМС приборах параметры $K_{чэ}$ и $K_{ос}$ оказываются взаимосвязанными и их расчет приходится вести при выполнении противоречивых условий. Тем не менее, всегда удается найти компромиссные решения, обеспечивающие в целом необходимую крутизну статической характеристики датчика и соответствующий диапазон измерения.

Важной задачей при расчете МЭМС датчиков на разные диапазоны измерения является выбор ключевых параметров, наиболее сильно влияющих на крутизну статической характеристики (этими параметрами можно регулировать задание диапазона измерения датчика). В этом случае, в методике расчета датчика, сначала решается задача определения величины ключевого параметра дающего крутизну K , затем рассчитываются другие сопутствующие параметры датчика. Далее с учетом коэффициентов влияния параметров предъявляются требования к их допустимым отклонениям относительно расчетных [4–7].

Постановка задачи

Кроме обеспечения статической точности в работе МЭМС датчиков, и в переходных режимах – динамической точности важным является обеспечение эффективной работы датчиков в реальных условиях случайной среды. В реальности, как полезные измеряемые физические величины, так и помехи имеют случайные свойства, которые принято описывать статистическими характеристиками – такими, как корреляционные и спектральные функции. Реальные условия случайной среды связаны с областями применения датчиков, при этом можно выделить работу датчиков при измерении медленно или быстро изменяющихся физических величин. Характер измерительных помех тоже существенно влияет на точностные характеристики датчиков. Особенно опасными считаются ШСВ помехи (широкополосная случайная вибрация) – наподобие белого шума [9].

Эффективная работа МЭМС датчиков в условиях случайной среды обеспечивается применением фильтров, ослабляющих помехи и по возможности полно пропускающих полезные сигналы. Традиционный калмановский алгоритм фильтрации эффективно оценивает полезные составляющие сигналов на фоне аддитивных белых шумов. Также часто применяют фильтр Винера и более простые фильтры, например, апериодические. Для выбора способа фильтрации МЭМС датчиков в условиях случайной среды требуется проведение исследования эффективности алгоритмов фильтрации. При этом, кроме теоретических оценок эффективности, необходимо для сравнения получить экспериментальные оценки.

Имитировать реальные условия случайной среды надо на основе вычислительного

эксперимента в современной программной среде *Matlab*, имеющей достаточные инструментальные средства для моделирования как МЭМС датчиков, так и сигналов со случайными свойствами [10].

Математическая модель МЭМС датчика

Оптимальный режим движения подвижных частей МЭМС датчика в режиме чувствительности обеспечивается отрицательной обратной связью (ОС). Приемник перемещений в микромеханическом датчике, как правило, выполняется по дифференциальной мостовой схеме включения преобразователя, что дает компенсацию влияния температурных погрешностей и исключает многие другие методические ошибки.

Для анализа работы МЭМС датчика в режиме динамики и с целью оптимизации его характеристик по аналогии с работами [4–7] составлена структурная схема, которая представлена на рис. 1.

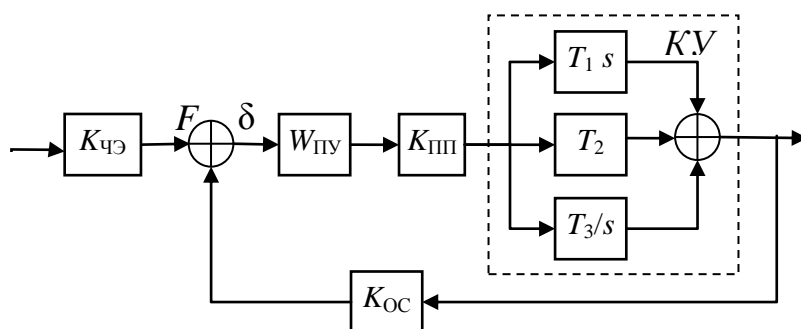


Рис. 1. Структурная схема МЭМС датчика:

- $K_{чЭ}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента;
 $W_{ПУ}$ – передаточная функция подвижного узла;
 $K_{ПП}$ – коэффициент передачи емкостного преобразователя перемещений;
 T_1, T_2, T_3 – коэффициенты корректирующего устройства;
 $K_{ОС}$ – коэффициент передачи звена обратной связи

Общая передаточная функция, согласно структурной схеме, вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чЭ} \frac{W_{ПУ} K_{ПП} W_{КУ}}{1 + W_{ПУ} K_{ПП} W_{КУ} K_{ОС}}, \quad (1)$$

где $W_{КУ} = T_1 \cdot s + T_2 + T_3/s$ – передаточная функция корректирующего устройства типа ПИД-регулятора (пропорционально-интегрирующе- дифференцирующего регулятора).

Основные математические модели чувствительного элемента, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи являются специфическими для разных типов датчиков и используются в соответствии с теоретическими положениями работ по МЭМС.

Корректирующее устройство типа ПИД-регулятор в микросистемных датчиках было применено еще в работе [4], далее обсуждались особенности выбора параметров КУ в работах [5–7]. В работе [5] на основе данного КУ была показана возможность достижения малой колебательности переходного процесса МЭМС или даже обеспечения его затухания по аperiодическому закону с достаточно малым временем. Далее в работах [6, 7] для разных МЭМС датчиков была показана возможность достижения малых значений динамических искажений – среднего квадрата ошибки (СКО) практически на уровне 10^{-7} , что для подобных приборов достаточно неплохой показатель.

Экспериментальное исследование основных характеристик микродатчиков

С целью расчета конструктивных параметров микросистемных датчиков и их передаточных функций на основе объектно-ориентированной среды было разработано программное

обеспечение, включающее управляющую программу и ряд программ-функций. В качестве среды проектирования программного обеспечения была выбрана матричная лаборатория *Matlab*, имеющая визуальную среду для отображения структурных схем, подобных рис. 1, и позволяющая изображать результаты испытаний (моделирования) устройства в виде графиков [8].

В частности, разработаны программы-функции для расчета параметров ДУС: $[Z, W_{pu}, W_{che}, W_{be}, W] = dus(P)$ и акселерометра: $[Z, W_{pu}, W_{che}, W_{be}, W] = acselerometer(P)$, входными данными которых являются векторы параметров датчика P (подвижного узла, блока электроники, конструкции). Выходными параметрами программ-функций являются передаточные функции: W_{pu} – подвижного узла; W_{che} – чувствительного элемента; W_{be} – блока электроники; W – полная передаточная функция датчика; Z – вектор расчетных параметров датчика.

Текст программ-функций $dus(P)$ и $acselerometer(P)$ на языке *Matlab* составлен в соответствии с принципом действия, теоретическими формулами механики, формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи, формулами для вычисления передаточных функций (в работах автора это сделано для микроакселерометра [6] и для микро ДУС [7]). Примеры такого рода программ приводились ранее также в работе [5] (алгоритмы и тексты программ для микроакселерометра).

Использование программ-функций $dus(P)$ и $acselerometer(P)$ осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров P . Все исходные параметры ЧЭ, и других элементов, необходимые для расчета при этом сведены в файл *input.dat* текстового формата *ascii*. Для расчета выходных параметров выполняется вызов $dus(P)$ или $acselerometer(P)$ из управляющей программы *control*:

```
Po=load('input.dat'); P= Po;
```

```
[Z,Wpu,Kche,Wbe,W]=dus(P) % вызов программы-функции и получение результатов.
```

Пример. При исходных данных ДУС для заданного диапазона измерения 150 град/с определены результирующие параметры. При использовании программы-функции dus рассчитаны все параметры ДУС (основные параметры приведены в табл. 1).

Таблица 1
Основные параметры ДУС для диапазона ± 150 град/с

Параметр	K_{che}	m , кг	w , рад/с	G_y	K_{oc}	K	K_{pp}	U_{op} , В	U_{max} , В	T , с
Значение	$2,03e-9$	$4,03e-7$	$1,68e+3$	2,03	$8,85e-10$	2.292	$4e+10$	20	6	$1.6e-3$
Параметр	W_{max}	A_{tx}	B_{tx}	C_{tx}	A_{ty}	B_{ty}	C_{ty}	lk	bk	
Значение	$1,9 e-10$	$3,24e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1,0e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1e-4$	$1e-5$	

Соответствующие полученным параметрам передаточные функции представлены в табл. 2 (см. рис. 1).

Таблица 2
Передаточные функции ДУС, соответствующие структурной схеме МЭМС датчика

Передаточная функция подвижного узла	$W_{pu}(s) = \frac{1}{4 \cdot 107s^2 + 1,28 \cdot 10^{-3}s + 2,03}$
Передаточная функция КУ	$W(s) = \frac{4,03s^2 + 1,28 \cdot 10^4 s + 2,03 \cdot 10^7}{s}$
Полная передаточная функция датчика	$W_o(s) = \frac{4,54 \cdot 10^{-7} s^2 + 1,44 \cdot 10^{-3} s + 2,292}{2,8 \cdot 10^{-15} s^3 + 2,0 \cdot 10^{-7} s^2 + 6,3 \cdot 10^{-4} s + 1}$

Далее решая задачу обеспечения точности рассматриваемых МЭМС приборов в условиях помех, рассмотрим эффективность применения различных алгоритмов фильтрации.

Фильтр Калмана для МЭМС

Задача построения фильтра Калмана для микромеханических датчиков возникает при обеспечении повышенной точности прибора в условиях измерительных шумов. Это в основном традиционная задача фильтрации Калмана для процесса со случайными свойствами. Схема объекта наблюдения для построения фильтра Калмана представлена на рис. 2.

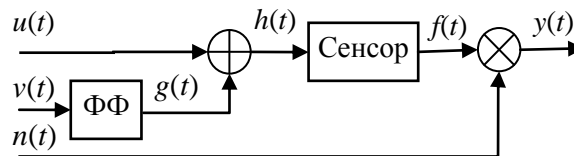


Рис. 2. Структурная схема объекта наблюдения

На схеме использованы обозначения: ФФ – формирующий фильтр случайной составляющей входного процесса; $v(t)$ – возмущающий белый шум на входе формирующего фильтра; $u(t)$, $g(t)$ – детерминированная и случайная составляющие измеряемого процесса; $n(t)$ – аддитивный белый шум измерения (интенсивность шума измерений – R); $h(t)$ – полный полезный измеряемый сигнал; $y(t)$ – измерение; $f(t)$ – выходной сигнал с сенсора.

Рассчитаем полную модель объекта наблюдения *Plant* в соответствии со схемой рис. 2. К наблюдаемой динамической системе в данном случае относится входной детерминированный стохастический процесс $h(t)$ и сенсор (ДПИ), измеряющий этот процесс. Пусть сенсор задан передаточной функцией $Wd(s)$, а входной процесс $h(t)$ задан случайной составляющей $g(t)$ со спектральной функцией $S_g(w)$ и средним значением $u(t)$.

Для исходных данных сенсора в виде МЭМС с учетом ПИД корректирующего устройства были получены оптимальные передаточные функции в виде [6, 7]:

$$W(s) = \frac{K}{Ts + 1}, \quad (2)$$

где T – постоянная времени (примерное значение $T = 2 \cdot 10^{-9}$); K – коэффициент передачи сенсора (примерное значение $K=2,3873$ взято из [7]).

Пусть спектральная функция случайной составляющей $g(t)$ задана в виде

$$Sg(w) = \frac{c_1 w^2 + c_0}{d_2 w^4 + d_1 w^2 + d_0}, \quad (3)$$

где c_0, c_1, d_0, d_1, d_2 – коэффициенты числителя и знаменателя спектральной функции.

Для расчета формирующего фильтра процесса $g(t)$ используем факторизацию спектральной функции $S_g(w)$ в виде

$$Sg(s) = \frac{-c_1 s^2 + c_0}{d_2 s^4 - d_1 s^2 + d_0} = \frac{c_0}{d_0} \frac{b_1 s + b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \frac{-b_1 s + b_0}{a_2 s^2 - a_1 s + a_0} = Q \cdot Wg(s) \cdot Wg(-s), \quad (4)$$

где b_0, b_1, a_0, a_1, a_2 – коэффициенты числителя и знаменателя передаточной функции формирующего фильтра; $Q = c_0/d_0$ – интенсивность возмущающего белого шума на входе формирующего фильтра; $Wg(s)$ – передаточная функция формирующего фильтра.

После задания объекта наблюдения передаточными функциями, связывающими входы и выходы, легко выполнить переход к моделям в пространстве состояний. Модель объекта наблюдения при этом получается с двумя входами – u и v и одним выходом. Эта модель имеет: X – вектор состояния системы; U – вектор входа; V – вектор возмущения (или вектор формирующих белых шумов для стохастического сигнала); F – вектор выхода. Связь векторов U, V, X, F определяется матричным линейным дифференциальным уравнением состояния [11]:

$$\dot{X} = AX + Bu + Bv, \quad (5)$$

и уравнением выхода

$$f = CX, \quad (6)$$

где $v(t)$ - гауссовский шум с нулевым средним и интенсивностью $\dot{I} [v^2(t)] = Q$ (M - оператор математического ожидания);

A, B – переходные матрицы состояния (матрицы коэффициентов);

f – выходной сигнал;

C - матрица линейного преобразования размера $m \times n$.

Измерения параметров объекта наблюдения осуществляются с аддитивными гауссовскими шумами. Уравнение измерений удовлетворяет линейному соотношению:

$$y(t) = CX(t) + n(t), \quad (7)$$

где $n(t)$ - гауссовский белый шум измерений с интенсивностью $\dot{I} [n^2(t)] = R$.

Для получения матриц A, B, C моделей (5), (6) рассмотрим по отдельности матричные модели сенсора и формирующего фильтра. Дифференциальное уравнение работы сенсора в соответствии с передаточной функцией (2) имеет вид:

$$T \frac{df}{dt} + f(t) = K \cdot h(t). \quad (8)$$

Обозначим через X_1 выходную переменную фильтра – $f(t) = x_1$, тогда уравнение (8) получит следующий вид:

$$\frac{dx_1}{dt} = -\frac{1}{T} x_1 + \frac{K}{T} (g + u). \quad (9)$$

Теперь запишем дифференциальное уравнение формирования процесса $g(t)$ на основе передаточной функции формирующего фильтра (4).

$$a_2 \frac{d^2 g}{dt^2} + a_1 \frac{dg}{dt} + a_0 g(t) = b_1 \frac{dv}{dt} + b_0 v(t). \quad (10)$$

Перейдем от уравнения (10) к матричной модели методом вспомогательной переменной, используя в качестве компонент состояния x_2, x_3 . Матрицы A_2, B_2, C_2 при этом получают вид [11]:

$$A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -a_0/a_2 & -a_1/a_2 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 1/a_2 \end{bmatrix}; \quad C_2 = [b_0 \quad b_1]. \quad (11)$$

Совместим полученные модели в единую матричную модель с учетом того, что $g = C_2 \cdot X$:

$$A = \begin{bmatrix} -1/T & C_2(1) & C_2(2) \\ 0 & 0 & A_2(1,2) \\ 0 & A_2(2,1) & A_2(2,2) \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} K/T & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B_2(2) \end{bmatrix}; \quad C = [1 \quad C_2(1) \quad C_2(2)]. \quad (12)$$

Для использования полученной матричной модели в *Matlab* необходимо учитывать правила ввода исходных данных с помощью функции *tf* [10].

Реализация расчетов матричной модели в *Matlab*. Вводятся исходные данные:

$Sg = tf([-16 \ 0 \ 4], [0.0006 \ 0 \ -8 \ 0 \ 2.5]);$ $Wd = tf([2.3873], [1.646e-009 \ 1]);$

$Mg = 2.0944;$ $R = 0.01.$

Передаточная функция формирующего фильтра процесса определена с помощью функции факторизации *fact* [11]:

$Wg = fact(Sg).$

$2s + 1$

$Wg = \frac{\dots}{0.01549 s^2 + 1.797 s + 1}$

Получение коэффициентов для модели формирующего фильтра в *Matlab* осуществляется в виде.


```
[bg,ag]=tfdata(Wg,'v'); [bd,ad]=tfdata(Wd,'v');
bg=[ 0 2.0000 1.0000]; ag=[ 0.0155 1.7975 1.0000];
bd=[1.0e+009 * (0 1.4510)]; ad=[ 1 607600000].
```

Матричная модель реализуется в *Matlab* традиционно в виде [10]: $X'=AX+Bu$; $y=CX+Du$. С учетом обозначений в *Matlab* программе на основании (12) получим формулы для расчета матриц:

```
A=[-ad(2)/ad(1) 1/ad(1)*bg(3) 1/ad(1)*bg(2); 0 0 1; 0 -ag(3)/ag(1)-ag(2)/ag(1)];
B=[1/ad(1) 0; 0 0; 0 1/ag(1)];
C=[bd(2) bg(3) bg(2)];
D=[0 0].
```

Непрерывная матричная модель объекта наблюдения, соответствующая рассчитанным матрицам составлена в виде *Plant*:

```
Plant=ss(A,B,C,D,'inputname',{ 'u' 'v' },'outputname','f');
```

Фильтр Калмана, как непрерывный - *kalmN*, так и дискретный - *kalmD*, рассчитываются с использованием *Matlab* функции *kalman*. на основе модели *Plant* [10]. Для примера приведена команда для расчета непрерывного фильтра Калмана:

```
[kalmN,L,Pn]=kalman(Plant,Q,R).
```

Для расчета дискретного фильтра Калмана используется дискретная модель объекта контроля, полученная из непрерывной с помощью *Matlab* функции *c2d* [10].

Моделирование и исследование полученной измерительной информационной системы ИИС проведено с помощью визуальной среды *Simulink* [10]. Схема моделирования ИИС с непрерывным и дискретным фильтром Калмана представлена на рис. 3.

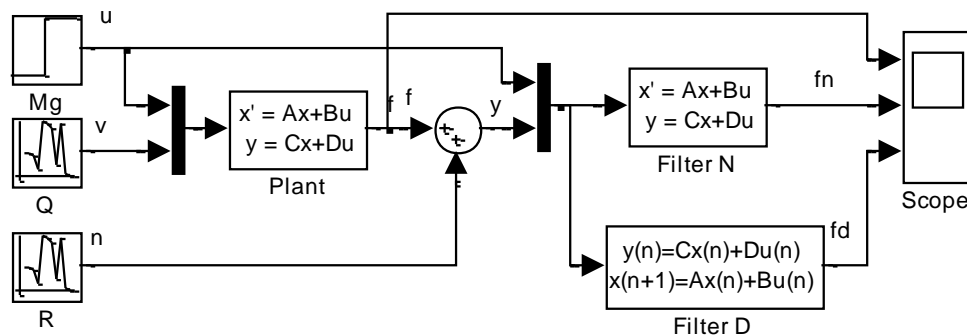


Рис. 3. Схема моделирования ИИС на основе фильтра Калмана

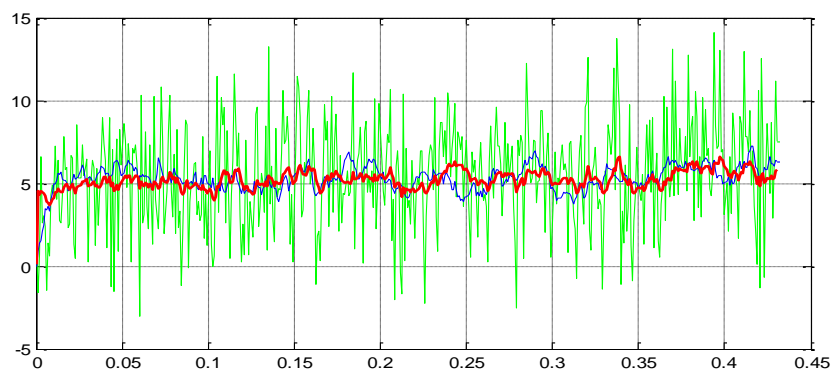


Рис. 4. Графики для дискретного фильтра Калмана (фонový график – это измерения $u(t)$, жирным выделен график сигнала с фильтра – $fn(t)$)

На схеме в качестве входов объекта контроля *Plant* показаны сигналы $u(t)$ и $v(t)$, являющиеся соответственно детерминированным (неслучайным) и возмущающим (случайным) сигналами.

На входе фильтра сформирован векторный сигнал, состоящий из сигнала $u(t)$ и измерения $y(t)$ (измерение $y(t)$ получено путем наложения помехи $n(t)$ на выходной сигнал $f(t)$ объекта $Plant$).

На рис. 4 представлены графики, полученные при моделировании дискретного фильтра Калмана при достаточно мощной помехе ($R=10$, что соответствует величине предельной ошибке в измерениях для МЭМС ДУС примерно 9 рад/с или $\xi=300\%$ от диапазона).

Для $R=10$ получен средний квадрат ошибки СКО = 0.49, эффект фильтрации при этом составляет $kd = 4.52$ (т.е. ошибка измерений уменьшается более чем в четыре раза). По данным СКО, предельная ошибка фильтра в оценивании полезного процесса составляет примерно: $\delta = 12,8\%$.

Проведено также моделирование дискретного фильтра Калмана при помехе $R=[1; 0,1; 0,01; 0,001]$. Для $R=1$ величина предельной ошибки в измерениях соответствует примерно 3 рад/с или $\xi=100\%$ от диапазона, для $R=0,1$ – 0,95 рад/с или $\xi=45\%$, для $R=0,01$ – 0,3 рад/с или $\xi=12,5\%$, для $R=0,001$ – 0,1 рад/с или $\xi=4\%$. Графики процессов при моделировании дискретного фильтра Калмана имеют похожий на рис. 3 вид (при уменьшенной интенсивности помехи). Результаты по предельной ошибке в измерениях ξ , значениям СКО, коэффициента фильтрации kd , предельной ошибке δ фильтра представлены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты моделирования МЭМС с фильтром Калмана

R	$\xi, \%$	СКО	kd	$\delta, \%$
10	300	0,49	4,52	12,8
1	100	0.2357	2.04	10
0,1	45	0.0612	1.32	5
0,01	12,5	0.009	1.06	2
0,001	4	0.00099	1.005	0,6

Обобщая результаты исследования фильтра Калмана при различной интенсивности помех, на рис. 5 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

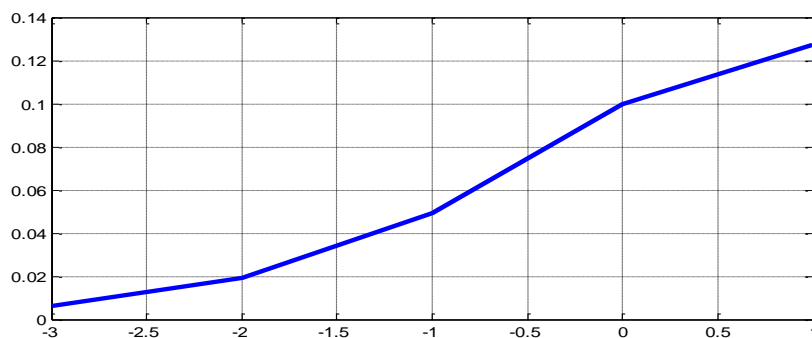


Рис. 5. График предельной ошибки фильтра Калмана

Эффективность фильтра Калмана при ослаблении измерительных помех оказалась довольно низкой. Фильтр Калмана обеспечивает погрешность менее 1% только при достаточно слабых шумах ($R=0,001$ – интенсивность помехи на уровне 4% от предельного сигнала).

Двойной апериодический фильтр для МЭМС

Следует исследовать возможность ослабления помехи за счет двойного апериодического фильтра с полосой пропускания, в 2 раза превышающей частотный диапазон полезных сигналов. Для этой цели используем максимальную частоту – ω_m , полученную для сигнала

при расчете периода дискретности (пусть $\omega m = 3651,4$ рад/с). Постоянная времени апериодического фильтра на основании импульсной теоремы при этом будет составлять: $T_0 = 1/(2 * \omega m) = 1,37 \cdot 10^{-4}$.

Обобщая результаты исследования двойного апериодического фильтра при различной интенсивности помех, на рис. 6 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10). Предельная ошибка фильтра изменяется от единиц процента (характерно для интенсивностей помехи от 0,001 до 0,1) до десятков процентов (15% при интенсивности помехи 1 и 63% при интенсивности помехи 10). Такой фильтр не справляется с помехами высокой интенсивности ($R \geq 1$, что соответствует величине предельной ошибки в измерениях примерно 3 рад/с или чуть более 100% от диапазона).

Следует признать, что результаты фильтрации для двойного апериодического фильтра получены хуже, чем у фильтра Калмана. Как поведет себя двойной апериодический фильтр при более медленном входном процессе (быстродействие процесса определяется спектральной функцией $Sg(\omega)$) предстоит исследовать несколько позже.

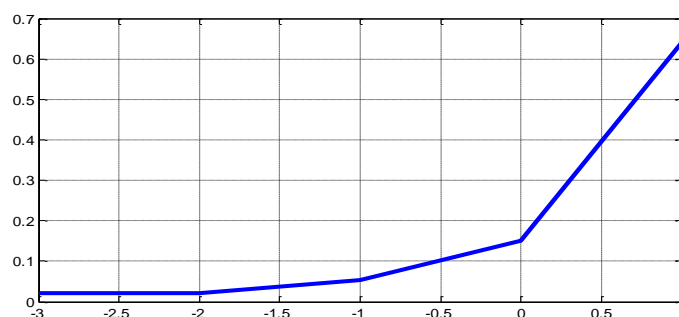


Рис. 6. График предельной ошибки аperiодического фильтра

Фильтр Винера для МЭМС

Далее исследуется возможность ослабления помехи с помощью фильтра Винера. Для этой цели используется передаточная функция фильтра Винера в условиях помех типа белый шум. Обобщая результаты исследования фильтра Винера при различной интенсивности помех, на рис. 7 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

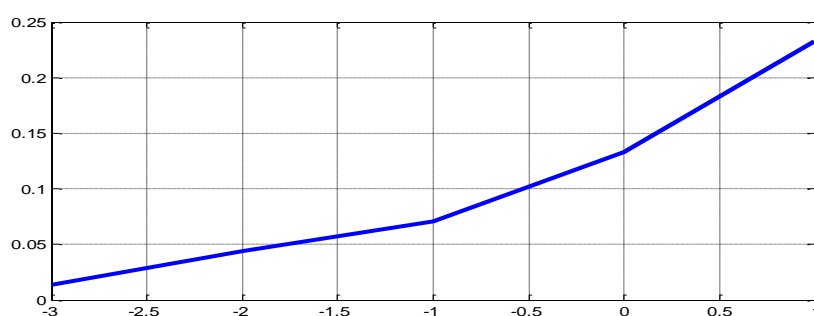


Рис. 7. График зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи для фильтра Винера

Результаты по ошибкам у фильтра Винера несколько хуже, чем у фильтра Калмана, но лучше, чем у двойного апериодического фильтра. Сравнивая эффективность работы фильтра Калмана, двойного апериодического фильтра и фильтра Винера, можно сделать вывод о необходимости применения фильтра Калмана для ослабления помех при любых условиях (при любой мощности помех). При этом фильтр Калмана должен быть адаптивным, т.е. дол-

жен быть настроен на конкретную интенсивность помех и спектральную функцию полезного сигнала, действующие в данный момент времени.

Исследование фильтрации при медленном входном процессе

Все результаты фильтрации, полученные ранее, были при достаточно быстром входном процессе $g(t)$. Следует также исследовать возможность ослабления помехи при других данных спектральной функции, соответствующей медленным процессам. На рис. 8 представлены графики спектральных плотностей быстрого (*a*) и медленного (*б*) процессов.

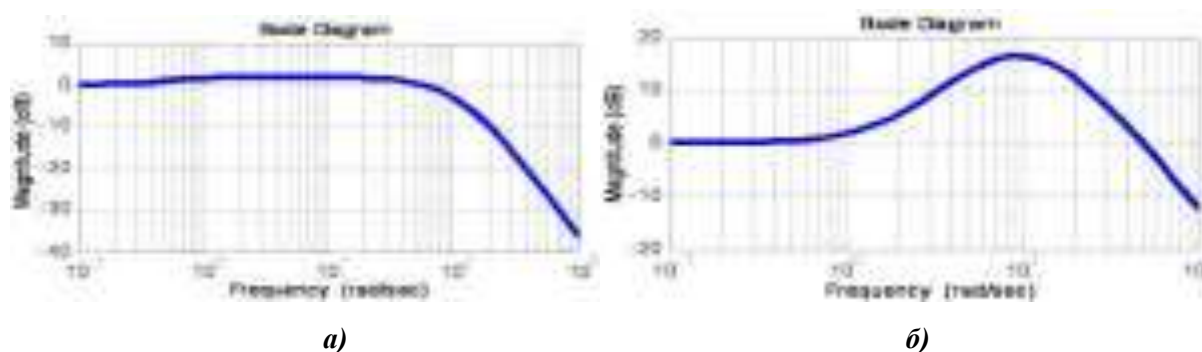


Рис. 8. S_g быстрого (*a*) и медленного (*б*) процессов

Исходные данные при исследовании фильтров для медленного процесса в *Matlab* были введены в виде:

$$S_g = tf([-2 \ 0 \ 8], [1 \ 0 \ -198 \ 0 \ 10201]).$$

Обобщая результаты исследования фильтра Калмана при различной интенсивности помех для медленного процесса, на рис. 9 представлен график зависимости предельной ошибки фильтра от интенсивности помехи (интенсивность помехи изменяется в диапазоне от 0,001 до 10 с кратностью 10).

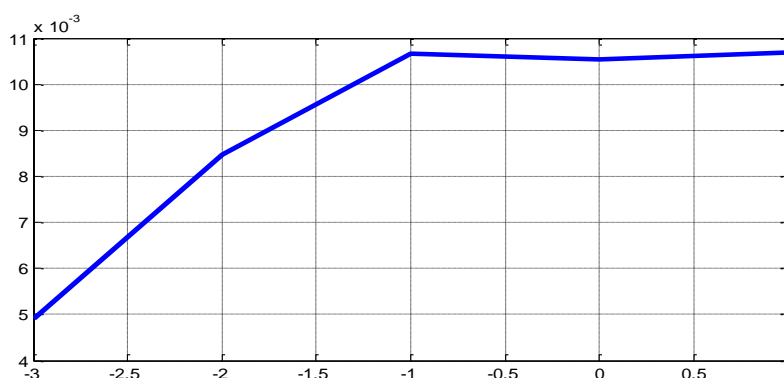


Рис. 9. График предельной ошибки фильтра Калмана от интенсивности помехи для медленного процесса

Результаты оказались вполне приемлемыми. Ошибка ИИС на основе фильтра Калмана в диапазоне от 0,5 до 1,08%. При больших интенсивностях помех ошибка всего на уровне 1,07% (1,08 % при интенсивности шума 0,1).

Было проведено также моделирование работы двойного апериодического фильтра и фильтра Винера для медленного процесса (см. рис. 8, *б*). Для фильтра Винера и двойного апериодического фильтра ошибки по сравнению с фильтром Калмана оказались несравнимо большими, особенно при больших интенсивностях шумов.

Сравнивая эффективность фильтрации измерительной помехи с помощью различных

фильтров, построены графики ошибок фильтрации для быстрого и медленного процессов. На рис. 10 приведены результаты ошибок в виде ансамбля графиков (кривые обозначены: А-фильтр – для двойного апериодического фильтра, В-фильтр – для фильтра Винера, К-фильтр – для фильтра Калмана).

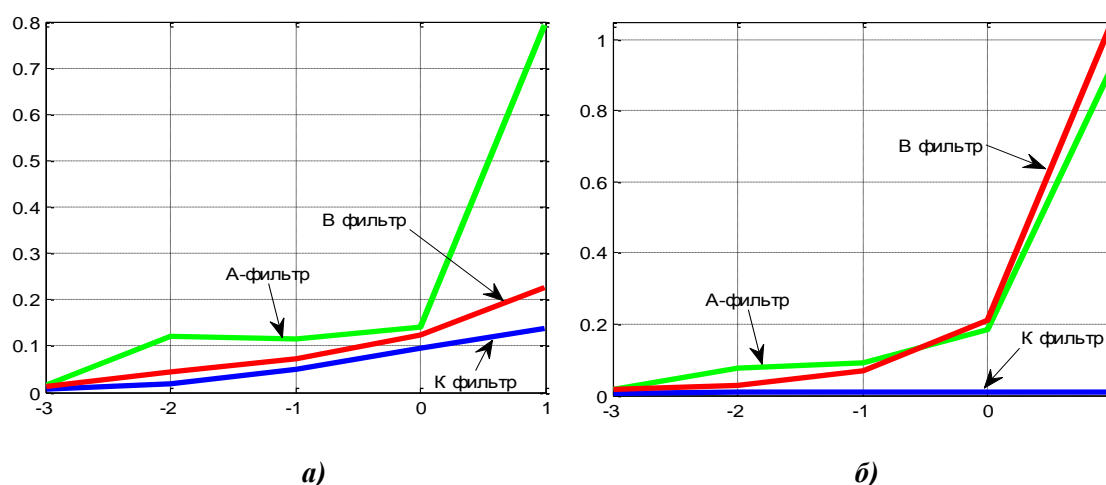


Рис. 10. Результаты ошибок в виде графиков:
а – для быстрого процесса; б – для медленного процесса

Заключение

В данной работе сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС датчиков по критерию статической точности, разработана методика расчета статических и динамических характеристик ДУС, соответствующих заданному диапазону измерения.

Полученные результаты по эффективности фильтрации доказывают эффективность применения адаптивного фильтра Калмана при различной интенсивности помех, как для быстрых, так и для медленных процессов.

Для быстрого процесса эффективность фильтра Винера оказывается сравнимой с фильтром Калмана, но для медленного процесса фильтр Винера практически неприемлем при больших интенсивностях помех.

Исследование возможностей фильтрации проведено еще не полностью. Для более корректных результатов эффективности фильтрации необходимо учитывать уровень помех по соотношению сигнал/шум, как это принято в теории информации.

Библиографический список

1. **Альмишев, И.В.** Разработка и оптимизация элементов роторно-вибрационного гироскопа / И.В. Альмишев [и др.] // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. статей по материалам ВНТК; НГТУ. – Н. Новгород – Арзамас, 2002. С. 402–408.
2. **Былинкин, С.Ф.** Расчет и исследование элементов и узлов интегрального датчика угловых ускорений / С.Ф. Былинкин, В.Л. Волков, О.Н. Глазков // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: сб. статей по материалам ВНТК; НГТУ. – Н. Новгород – Арзамас, 2002. С. 392–397.
3. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учеб. пособие / В.Д.Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
4. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин / Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. № 3 (82). С. 308–314.
5. **Волков, В.Л.** Исследование измерительных систем на компьютере / В.Л.Волков. – Арзамас: ООО “Ассоциация ученых”, 2011. – 64 с.
6. **Волков, В.Л.** Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 2 (87). С. 288–295.

7. Волков, В.Л. Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости / В.Л. Волков, М.В. Хрисанова // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2013. № 2 (99). С. 329–338.
8. Распопов, В.Я. Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.
9. Испытания на воздействие случайной широкополосной вибрации с использованием цифровой системы управления виброиспытаниями. ГОСТ Р 51502–99 (Международный стандарт МЭК 60068-2-64–93). – М., 1999.
10. Дьяконов, В.П. *Simulink 5/6/7*: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс. 2008. – 784 с.
11. Волков В.Л. Измерительные информационные системы: учеб. пособие / В.Л. Волков; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. – 243 с.

Дата поступления
в редакцию 06.02.2014

V.L. Volkov¹, N.V. Zhidkova¹, A.A. Zhidkov²

EFFICIENCY OF MICRO MECHANICAL SENSORS IN CONDITIONS OF HINDRANCES

Arzamasskiy polytechnic institute (branch) Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Arzamas electromechanical plant²

Purpose: Making methods of provision steady-states and dynamics accuracy compensation micro system sensors.

Design/methodology/approach: Is formed mathematical model of micro system sensor on base optimum parameter correcting device, providing minimum dynamic mistakes of sensor. The Designed methods of computer experiment on base Matlab for reception estimation to efficiency of micro mechanical systems in condition of hindrances.

Findings: Explored capacity to work micro mechanical sensors in condition of influence of hindrances to different intensity with using standard filter. Will Presented comparative results of average square mistake of filtering Kalman, filtering of Viner, aperiodic filter in reals conditions of ambience. The Presented results of modeling MEMS in manner graph of average squares mistakes. Efficiency of the kalman filter is shown on graph for signals and hindrances broad range.

Research limitations/implications: Using the offered methods of provision to efficiency MEMS gives minimum square-law mistakes of sensor in conditions of intensive hindrances.

Originality/value: On the base of considered methodes of designing and studies MEMS is worded requirements to algorithm of filtering on criterion by dynamic accuracy.

Key words: MEMS, sensor, accuracy, sensitivity, average square of the mistake, modeling, filtering, efficiency.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 513.015.2

В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, С.В. Лещева

ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОШИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Известно, что вероятностное распределение Коши не имеет ни математического ожидания, ни дисперсии. Поэтому для оценки его параметров приходится модифицировать излагаемые в учебниках методы. Так, в [3] использовался метод моментов с дробными степенями. В данной статье приводится еще ряд оценок, а также даются результаты численного эксперимента.

Ключевые слова: вероятностное распределение, состоятельные и эффективные оценки, неравенство Рао-Крамера.

1. Под однопараметрическим распределением Коши понимается вероятностное распределение с плотностью

$$f(x) = \frac{1}{\pi} \cdot \frac{a}{a^2 + x^2}, \quad (-\infty < x < +\infty), \quad (1)$$

зависящее от параметра a . Это распределение довольно экзотично по сравнению с известными часто встречающимися распределениями, например нормальным. Тем не менее оно имеет интересные свойства и находит приложение в экономике. Отметим некоторые из этих свойств ([1], [2]):

1) распределение Коши безгранично делимо;
2) отношение независимых нормально распределенных случайных величин распределено по Коши;

3) если случайная величина X распределена по Коши, то $Y = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{X}{a}$ и $|Y|$ распределены равномерно на интервалах $[-1, 1]$ и $[0, 1]$ соответственно.

В [3] отмечено, что второе свойство используется при моделировании статистического поведения биржевого курса валют и, следовательно, нахождение оценок параметра a по статистическим данным x_1, x_2, \dots, x_n реализации X имеет и прикладное значение.

При исследовании этого вопроса мы сразу же встречаемся с той трудностью, что X не имеет ни математического ожидания, ни дисперсии, поскольку соответствующие интегралы для $M(X)$ и $D(X)$ расходятся. Это обстоятельство заставляет, по крайней мере, на первых порах исключить из рассмотрения классические оценки типа среднего арифметического $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$ и среднего квадратичного $\overline{x^2} = \frac{1}{n}(x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2)$.

2. Сделаем несколько замечаний о стандартных методах нахождения оценок – методе максимального правдоподобия и методе моментов. В первом из них значение параметра ищется из требования максимальности выражения

$$L = f(x_1)f(x_2)...f(x_n) \tag{2}$$

для экспериментальных данных x_1, x_2, \dots, x_n .

Отсюда получаем $\frac{\partial L}{\partial a} = 0$ и, используя (1), сведем последнее равенство к уравнению

$$\sum_{i=1}^n \frac{a^2}{a^2 + x_i^2} = \frac{n}{2}. \tag{3}$$

Каждое слагаемое в левой есть возрастающая функция $a > 0$, а потому можно заключить, что уравнение (3) имеет единственное решение относительно a , которое принимается за оценку a . Однако явно решить уравнение (3) не удастся, а потому вопрос о точности оценки в этом методе остается открытым.

В методе моментов вычисляется величина

$$M_k = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i|^k, \tag{4}$$

при заданном k . Математическое ожидание этой величины содержит нужный параметр и, приравняв M_k ее математическому ожиданию, находим оценку параметра. Однако для распределения Коши моменты целых порядков не существуют (точнее они равны ∞).

М.Л. Шинкеев ([3]) обошел эту трудность, рассматривая (4) при $0 < k < 1$, где математическое ожидание существует и равно $\frac{a^k}{\cos \frac{\pi k}{2}}$. Для a оценка получается в виде

$$a \cong a_k^* = \left(M_k \cos \frac{\pi}{2} \right)^{1/k}. \tag{5}$$

К изложенному можно добавить, что M_k можно рассматривать и для отрицательных k из интервала $(-1, 0)$. Следующее соображение показывает, что выигрыша при этом не происходит. Дело в том, что распределение Коши инвариантно при преобразовании $X \rightarrow \frac{1}{X}$,

$a \rightarrow \frac{1}{a}$ и (5) дает

$$\frac{1}{a} \cong a_{-k}^* = \left(M_{-k} \cos \frac{\pi k}{2} \right)^{1/k}.$$

Чтобы исключить множитель $\cos \frac{\pi k}{2}$, можно предложить оценку

$$a \cong \sqrt{\frac{a_k^*}{a_{-k}^*}} = \left(\frac{M_k}{M_{-k}} \right)^{\frac{1}{2k}}.$$

3. Иные типы оценок можно получать трансформируя исходную случайную величину X в другую, имеющую более удобный для исследования закон распределения. Проиллю-

стрируем это двумя примерами. Как отмечено ранее, величина $Y = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{|X|}{a}$ имеет равномерное распределение на интервале $[0,1]$. Для математического ожидания Y , равного $\frac{1}{2}$, имеется оценка ([4]) $\frac{1}{2}(y_{\min} + y_{\max})$, где $y_i = \frac{2}{\pi} \operatorname{arctg} \frac{x_i}{a}$.

Следовательно, имеем приближенное равенство

$$\frac{1}{2} \cong \frac{1}{\pi} \left(\operatorname{arctg} \left| \frac{x_{\min}}{a_i} \right| + \operatorname{arctg} \left| \frac{x_{\max}}{a} \right| \right), \quad (6)$$

которое легко преобразуется к виду

$$a \cong a^* = \sqrt{|x_{\min}| \cdot |x_{\max}|}. \quad (7)$$

Оценка (6) относится к типу так называемых «сверхоценок», у которых дисперсия на порядок меньше той, которая следует из неравенства Рао-Крамера ([1,2,6]). Однако утверждать, что таким же свойством обладает и оценка (7), нельзя.

Второй пример трансформации X рассмотрим более подробно. От X перейдем к величине $Z = \ln|X|$.

Функция распределения $F_Z(x)$ вычисляется стандартным образом:

$$F_Z(x) = p(Z < x) = p(|X| < e^x) = \int_{-e^x}^{e^x} \frac{2}{\pi} \cdot \frac{a}{a^2 + x^2} dx.$$

После вычисления интеграла и дифференцирования $F_Z(x)$ получается выражение для плотности распределения величины Z :

$$f_Z(x) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{ae^x}{a^2 + e^{2x}}, \quad (-\infty < x < +\infty). \quad (8)$$

У Z существуют моменты любого неотрицательного порядка.

Математическое ожидание $M(Z) = \int_{-\infty}^{+\infty} x f_Z(x) dx = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x \frac{ae^x}{a^2 + e^{2x}}$, если положить $a = e^\alpha$ и сделать замену $x \rightarrow x - \alpha$ в интеграле, получается равным

$$M(Z) = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} (x + \alpha) \frac{dx}{e^x + e^{-x}} = \alpha. \quad (9)$$

Для центрального момента порядка k получаем интегральное представление

$$M_k(Z) = \frac{2}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x^k \frac{dx}{e^x + e^{-x}} = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x^k dx}{\operatorname{ch} x}.$$

Очевидно, что моменты целого нечетного порядка $k > 0$ обращаются в ноль. Явные выражения для моментов четного порядка получаются, если рассмотреть известный интеграл ([5])

$$\int_0^{\infty} \frac{\cos px}{\operatorname{ch} x} dx = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\operatorname{ch} \frac{p\pi}{2}}.$$

Используя степенные разложения

$$\cos t = 1 - \frac{1}{2!}t^2 + \frac{1}{4!}t^4 - \frac{1}{6!}t^6 + \dots,$$

$$\frac{1}{\operatorname{ch} t} = 1 - \frac{E_2}{2!} t^2 + \frac{E_4}{4!} t^4 - \frac{E_6}{6!} t^6 + \dots,$$

где $E_2 = 1, E_4 = 5, E_6 = 61$ – так называемые числа Эйлера, легко найти, что

$$M_{2k}(Z) = \left(\frac{\pi}{2}\right)^{2k} E_{2k}.$$

В частности, дисперсия $D(Z) = \frac{\pi^2}{4}$.

В качестве оценки $\alpha = \ln a$ возьмем среднее арифметическое значение $z_i = \ln|x_i|$ величины Z :

$$\alpha \cong \alpha^* = \frac{1}{n} \sum_i \ln|x_i|. \tag{10}$$

Эта оценка состоятельна и несмещена. Чтобы оценить ее эффективность, обратимся к неравенству Рао-Крамера, для несмещенной оценки θ :

$$D(\theta) \geq \frac{1}{\left\| \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} \right\|^2},$$

где L дается формулой (2), в которой $f(x)$ надо заменить на $f_Z(x)$ из (8). Квадрат нормы $\|u\|^2$ дается кратным интегралом

$$\|u\|^2 = \int_{-\infty}^{\infty} \dots \int_{-\infty}^{\infty} u^2 L dx_1 \dots dx_n.$$

Несколько громоздкие, но нетрудные вычисления дают $\left\| \frac{\partial \ln L}{\partial \alpha} \right\|^2 = \frac{n}{2}$ и значение $\frac{2}{n}$ для нижней

границы дисперсии. Но $D(\alpha^*) = \frac{1}{n} D(Z) = \frac{2,4\dots}{n}$ мало отличается от $\frac{2}{n}$. Возможно оценка α^*

является эффективной, так как нижняя граница $\frac{2}{n}$ не может быть достигнута для распре-

деления (8). Для того чтобы перейти к оценке параметра a , надо взять экспоненту от α^* , т.е. среднее геометрическое $\sqrt[n]{|x_1| \cdot |x_2| \cdot \dots \cdot |x_n|}$.

4. В статистическом пакете программ из Maple есть программа, генерирующая значения случайной (квазислучайной) величины, распределенной по Коши. Был проведен численный эксперимент и подсчитывались значения рассмотренных ранее оценок.

Моделировалось распределение с параметром $a = 2$ для значений $n = 10, 100, 1000$. Полученные результаты даны далее (табл. 1, 2, 3). В каждой из них приводятся результаты по 10 реализаций X . Через a_1, a_2, a_3, a_4 обозначены оценки:

$$a_1 = \sqrt{|x_{\min}| \cdot |x_{\max}|};$$

$$a_2 = \left(\frac{M_k}{M_{-k}} \right)^{\frac{1}{2k}}, \quad k = \frac{1}{4}, \text{ где } M_k \text{ – дается формулой (4);}$$

$$a_3 = \sqrt[n]{|x_1| \cdot |x_2| \cdot \dots \cdot |x_n|};$$

a_4 – корень уравнения (3).

Таблица 1

 $(a = 2, n = 10)$

№ п/п	a_1	a_2	a_3	a_4
1	3,854	2,050	1,925	1,071
2	1,789	1,143	1,125	1,057
3	2,179	3,091	3,111	3,197
4	1,437	1,780	1,794	1,982
5	9,530	3,062	2,927	2,155
6	1,126	2,421	2,927	2,822
7	1,496	1,866	1,870	1,945
8	0,691	1,345	1,408	1,951
9	9,374	5,959	5,883	4,759
10	5,212	3,632	3,564	2,649

Таблица 2

 $(a = 2, n = 100)$

№ п/п	a_1	a_2	a_3	a_4
1	2,322	2,459	2,454	2,429
2	4,738	2,554	2,504	2,334
3	2,928	1,949	1,958	1,926
4	0,691	1,719	1,752	1,804
5	1,106	1,916	1,899	1,761
6	8,884	2,054	1,981	1,819
7	1,499	1,210	1,224	1,424
8	1,036	1,971	1,994	2,094
9	11,10	2,722	2,539	2,350
10	2,358	2,262	2,248	2,097

Таблица 3

 $(a = 2, n = 1000)$

№ п/п	a_1	a_2	a_3	a_4
1	2,6740	2,9631	1,9615	1,9443
2	4,3306	2,0016	1,9872	1,9750
3	1,7889	2,0634	2,0616	2,0259
4	1,2766	2,0209	2,0228	2,0211
5	1,6135	1,9583	1,9545	2,0212
6	1,6135	1,9583	1,9545	1,9204
7	3,5532	2,1465	2,1474	2,1560
8	0,8521	1,8769	1,8946	1,9273
9	4,1821	2,2677	2,2433	2,2129
10	2,5099	1,9825	1,9993	2,0494

Как видно из таблиц, оценка a_1 очень грубая. Небольшую точность, но лучшую, чем у a_1 дают и другие оценки при $n = 10$. Но оценки a_2, a_3, a_4 становятся весьма удовлетворительными при $n = 100$ и $n = 1000$. Практически можно рекомендовать работу с экспериментальными данными в объеме нескольких десятков.

Библиографический список

1. Крамер, Г. Математические методы статистики / Г. Крамер. – М.: Мир, 1975.
2. Ван дер Варден, Б.Л. Математическая статистика / Б.Л. Ван дер Варден. – М.: Иностранная литература, 1960.
3. Шинкеев, М.Л. Оценка параметров распределения Коши / М.Л. Шинкеев; Национальный исследовательский Томский политехнический университет. – Томск.
4. Математическая энциклопедия // Оценка статистическая. – М.: Советская энциклопедия, 1984. Т. 4.
5. Рыжик, И.М. Таблицы интегралов, сумм, рядов и произведений / И.М. Рыжик, И.С. Градштейн. – М.–Л.: Госиздат, 1951.
6. Аниковский, В.В. Математическая статистика / В.В. Аниковский, Л.Н. Ерофеева. – Н. Новгород, 2013.

Дата поступления
в редакцию: 22.04.2014

V.M. Galkin, L.N. Erofeeva, S.V. Leshcheva

THE PARAMETER ESTIMATES OF CAUCHY DISTRIBUTION

Purpose: The design is the methods of the estimates finding, of the probability distributions which have not the moments of integer orders to give

Design/methodology/approach: The transformations of the distributions to ones that having the arbitrary order moments are used.

Findings: The new estimates are found.

Research limitation/ implications: The results of this paper will be useful for the students and aspirants.

Originality/value: The paper is useful for not enough papers of this sort in literature are.

Key words: probability distribution, consistent and efficient estimates, Rao-Kramer inequality.

УДК 537.86

Е.М. Громов, Т.В. Наседкина, В.В. Тютин

СОЛИТОНЫ В РАСШИРЕННОМ НЕЛИНЕЙНОМ УРАВНЕНИИ ШРЕДИНГЕРА С ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ДИСПЕРСИИ В ВИДЕ ПЕРЕПАДА

Национальный исследовательский университет Высшая Школа Экономики

Цель работы: В данной работе рассмотрена динамика солитонов в рамках расширенного неоднородного уравнения Шредингера с пространственной неоднородностью дисперсии в виде плавного перепада и при учете псевдо индуцированного рассеяния на затухающих НЧ волнах.

Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически.

Результат: Показана возможность баланса псевдоиндуцированного рассеяния, приводящего к смещению пространственного спектра волновых чисел солитона в длинноволновую область, и убывающей дисперсии, смещающей спектр солитона в коротковолновую область. В явном виде получено солитонное решение, возникающее в результате этого баланса.

Новизна: Результаты исследования новые и могут иметь приложение для разработки новых поколений оптоволоконных линий связи на базе коротких оптических солитонов.

Ключевые слова: расширенное нелинейное уравнение Шредингера, солитон, вынужденное рассеяние, неоднородность, дисперсия второго порядка, аналитическое решение, численный эксперимент

Введение

Интенсивные волновые пакеты довольно большой протяженности способны распространяться в нелинейных средах без изменения формы (солитоны). Для решения многих прикладных задач существует необходимость уменьшения протяженности солитонов до нескольких длин волн. Подобное уменьшение сопровождается, как правило, индуцированным рассеянием на низкочастотных (НЧ) возмущениях среды, разрушающим стабильность распространения солитонов. До настоящего времени довольно подробно изучено индуцированное рассеяние на однородных по пространственной координате временных НЧ модах среды (индуцированное рассеяние Рамана) [1]. Данное рассеяние описывается в расширенном нелинейном уравнении Шредингера (НУШ) дополнительным слагаемым с временным запаздыванием нелинейного керровского отклика. Для солитонов учет данного рассеяния приводит к смещению их частот вниз по спектру [2] и, как следствие, к потере устойчивости и разрушению. Возможность компенсации рамановского сдвига частоты изучена к настоящему времени довольно подробно [3, 4].

Однако для ряда сред распространение коротких солитонов сопровождается возбуждением затухающих НЧ волн. В плазме это ионно-звуковые волны, возбуждаемые электромагнитными или ленгмюровскими солитонами; в стратифицированной жидкости - внутренние волны, возбуждаемые солитонами поверхностных волн. Учет волнового характера возбуждаемых НЧ возмущений существенным образом меняет динамику коротких солитонов высокочастотного (ВЧ) поля в подобных средах. Впервые модель для описания индуцированного рассеяния ВЧ волн на затухающих НЧ волнах, названное как псевдоиндуцированное рассеяние, предложена в работе [5], в которой получено модельное уравнение в виде расширенного НУШ с псевдоиндуцированным рассеянием и показано, что псевдоиндуцированное рассеяние приводит к сдвигу пространственного спектра волновых чисел солитона в длинноволновую область. До настоящего времени рассмотрены случаи дисперсии, убывающей в пространстве по линейному [5] и экспоненциальному [6,7] законам.

В данной работе динамика солитонов в рамках расширенного НУШ с псевдоиндуцированным рассеянием рассмотрена при пространственной зависимости дисперсии в виде перепада. Показана возможность компенсации псевдоиндуцированного рассеяния.

Исходное уравнение и интегральные соотношения

Рассмотрим динамику ВЧ волнового пакета $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$ в расширенном НУШ с псевдоиндуцированным рассеянием и неоднородной дисперсией [5]:

$$2i \frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(q(\xi) \frac{\partial U}{\partial \xi} \right) + 2U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} = 0, \tag{1}$$

где $q(\xi)$ - линейная дисперсия второго порядка; μ - коэффициент псевдоиндуцированного рассеяния. Последнее слагаемое в (1) описывает индуцированное рассеяние ВЧ волнового поля на затухающих НЧ волнах и является пространственным аналогом индуцированного рассеяния Рамана в оптике (псевдоиндуцированное рассеяние). Уравнение (1) при нулевых условиях на бесконечности $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$ имеет следующие дифференциальные соотношения для интегральных моментов волнового пакета:

$$\frac{dN}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = 0, \tag{2}$$

$$2 \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} K|U|^2 d\xi = -\mu \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} \right]^2 d\xi - \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{d\xi} \left[\left(\frac{\partial|U|}{\partial \xi} \right)^2 + K^2|U|^2 \right] d\xi, \tag{3}$$

$$N \frac{d\bar{\xi}}{dt} \equiv \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} qK|U|^2 d\xi, \tag{4}$$

где $U \equiv |U|\exp(i\phi)$, $K \equiv \partial\phi / \partial\xi$ - добавочное волновое число пакета. Масштабы неоднородности дисперсии и волнового числа K примем много большими масштаба неоднородности огибающей волнового пакета $D_{q,K} \gg D_{|U|}$. В этом случае, полагая добавочное волновое число не зависящим от пространственной координаты [5], $K(\xi, t) = k(t)$, система (2)-(4) для солитонно подобных волновых пакетов сводится к виду:

$$2N \frac{dk}{dt} = -\mu L_0 / n^3 - q'(\bar{\xi}) Z_0 / n^2 - q'(\bar{\xi}) N k^2, \quad \frac{dn}{dt} = q'(\bar{\xi}) n k, \tag{5}$$

где $q'(\bar{\xi}) = (dq/d\xi)_{\bar{\xi}}$, $n = q(\bar{\xi})/q_0$, $q_0 = q(0)$; $L_0 = \int_{-\infty}^{\infty} [\partial(|U(\xi, t=0)|^2) / \partial\xi]^2 d\xi$,

$Z_0 = \int_{-\infty}^{\infty} [\partial|U(\xi, t=0)| / \partial\xi]^2 d\xi$ - начальные интегральные моменты волнового поля. Система

(5) имеет состояние равновесия

$$k = 0, \mu = \mu_* \equiv -q'(\bar{\xi}_0) Z_0 / L_0, \tag{6}$$

при котором псевдоиндуцированное рассеяние компенсируется убывающей дисперсией $q'(\bar{\xi}_0) < 0$: при $\mu = \mu_*$ начальный волновой пакет при $t > 0$ остается неизменным.

Солитонное решение

Рассмотрим решение уравнения (3) в виде стационарной волны $U(\xi, t) = \psi(\xi)\exp(i\Omega t)$ при пространственном профиле дисперсии в виде перепада $q(\xi) = q_0[1 - \tanh(\xi/D)]:$

$$q_0[1 - \tanh(\xi/D)] \frac{d^2\psi}{d\xi^2} - \frac{q_0}{D \cosh^2(\xi/D)} \frac{d\psi}{d\xi} + 2\psi^3 - 2\Omega\psi + \mu\psi \frac{d(\psi^2)}{d\xi} = 0. \tag{7}$$

Масштаб неоднородности дисперсии примем много большим масштаба неоднородности огибающей волнового пакета $D \gg L_\psi$. С учетом малости параметра $\varepsilon \sim L_\psi / D \sim \mu \ll q_0$ и аппроксимации $\tanh(\xi / D) \approx \xi / D$, решение уравнения (7) будем искать в виде $\psi = \psi_0 + \psi_1$, где $\psi_1 \sim \varepsilon \psi_0 \ll \psi_0$. Удерживая члены порядка ε , имеем

$$q_0 \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} + 2\psi_0^3 - 2\Omega \psi_0 = 0, \tag{8}$$

$$q_0 \frac{d^2 \psi_1}{d\xi^2} + (6\alpha \psi_0^2 - 2\Omega) \psi_1 = \frac{q_0}{D} \frac{d^2 \psi_0}{d\xi^2} \xi - \frac{2}{3} \mu \frac{d(\psi_0^3)}{d\xi} + \frac{q_0}{D} \frac{d\psi_0}{d\xi}. \tag{9}$$

Уравнение (8) имеет классическое солитонное решение $\psi_0 = A_0 / \cosh(\xi / \Delta)$, где $\Delta = \sqrt{q_0} / A_0$, $\Omega = A_0^2 / 2$. Уравнение (9) после замены $\eta = \xi / \Delta$ и $\Psi = \psi_1 D / (A_0 \Delta)$ примет вид

$$\frac{d^2 \Psi}{d\eta^2} + \left(\frac{6}{\cosh^2 \eta} - 1 \right) \Psi = 2 \frac{\eta}{\cosh^3 \eta} - \frac{\eta}{\cosh \eta} + \frac{5}{4} \frac{\mu}{\mu_*} \frac{\sinh \eta}{\cosh^4 \eta} + \frac{\sinh \eta}{\cosh^2 \eta}, \tag{10}$$

где $\mu_* \equiv -5q_0 / (8A_0^2 D)$ - величина псевдоиндуцированного рассеяния, отвечающая состоянию равновесия системы (5). При $\Psi(0) = 0$ уравнение (10) имеет точное решение

$$\Psi(\eta) = \left(\Psi'(0) \eta - \frac{\eta^2}{4} \tanh \eta + \frac{\mu}{4\mu_*} (\tanh \eta) \ln(\cosh \eta) \right) \operatorname{sech} \eta + \frac{1}{12} \left(\frac{\mu}{\mu_*} - 1 \right) (\tanh^2 \eta) \sinh \eta. \tag{11}$$

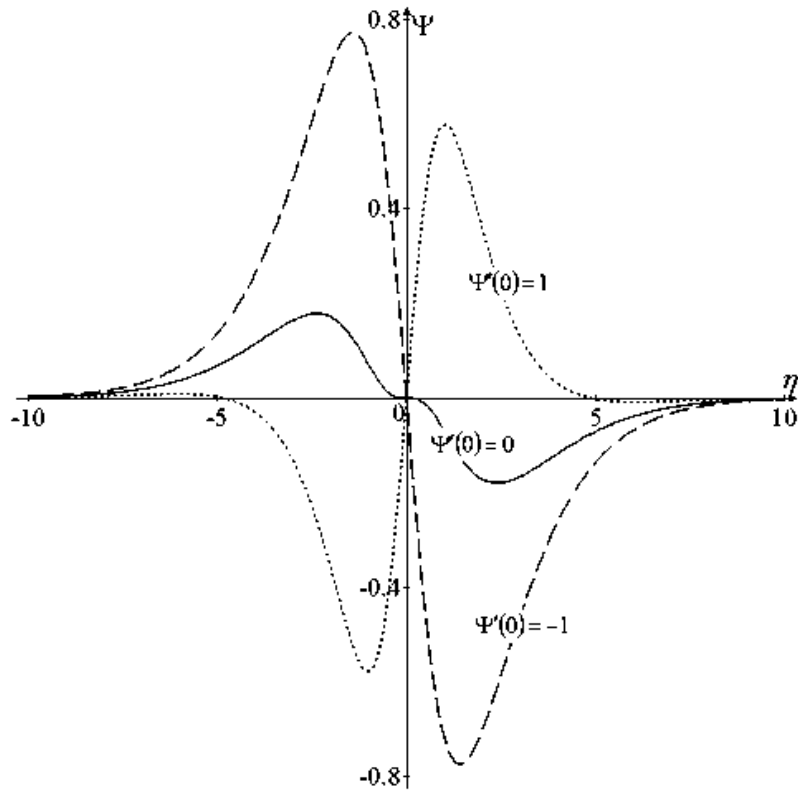


Рис. 1. Распределение $\Psi(\eta)$ при $\mu = \mu_*$ и различных $\Psi'(0)$

При $\mu = \mu_*$, отвечающем балансу псевдоиндуцированного рассеяния и убывающей дисперсии, решение (11) локализовано. Асимптотика (11) в этом случае на больших значениях аргумента следующая: $\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty) \approx \pm\eta^2 \exp(-|\eta|)$. На рис. 1 показано распределение волнового поля $\Psi(\eta)$ при $\mu = \mu_*$ и различных значений $\Psi'(0)$.

Решение $\Psi(\eta)$ антисимметрично. Солитоны с антисимметричными «хвостами» возникают и в хорошо известной системе линейно связанных НУШ.

При $\mu \neq \mu_*$ решение (11) не локализовано $|\Psi(\eta \rightarrow \pm\infty)| \rightarrow \infty$. На рис. 2 приведено распределение функции $\Psi(\eta)$ при начальных условиях $\Psi'(0) = 0$ и различных значениях μ .

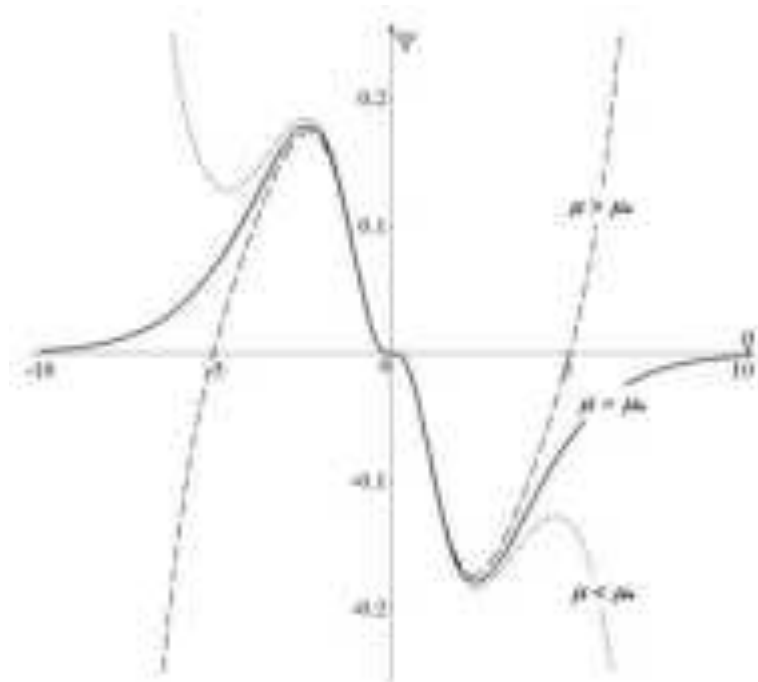


Рис. 2. Распределение $\Psi(\eta)$ при $\Psi'(0) = 0$ и различных μ

Численное моделирование

Рассмотрим численно начальную задачу динамики пакета $U(\xi, t = 0) = \text{sech}\xi$ в рамках (1) при $q(\xi) = 1 - \tanh(\xi/10)$ и различных значениях μ . Величина равновесного значения псевдоиндуцированного рассеяния для выбранного профиля неоднородности дисперсии и данного начального импульса из аналитического соотношения (6) составляет $\mu_* = 1/16$. На рис.3 приведены численные результаты пространственно-временного распределения $|U|$ при различных μ . При $\mu = 1/16 \equiv \mu_*$ (рис. 3, а) исходный волновой пакет не меняется во времени, что соответствует состоянию равновесия псевдо индуцированного рассеяния и неоднородной дисперсии. Отклонение параметра μ от равновесного значения μ_* приводит к изменению параметров солитона (волновое число, амплитуда) во времени. На рис. 3, б показано пространственно-временное распределение модуля огибающей $|U|$ при $\mu = 1/32 \equiv \mu_*/2$.

На рис. 4 приведена динамика во времени локального волнового числа в точке максимума модуля огибающей волнового пакета при различных значениях μ . Непрерывные кривые отвечают результатам численного счета, пунктирные - аналитическое решение системы (5).

Результаты численного счета близки к аналитическим. Небольшое различие связано с

малыми полями излучения из ядра солитона, приводящими к уменьшению эффективного параметра псевдо индуцированного рассеяния.

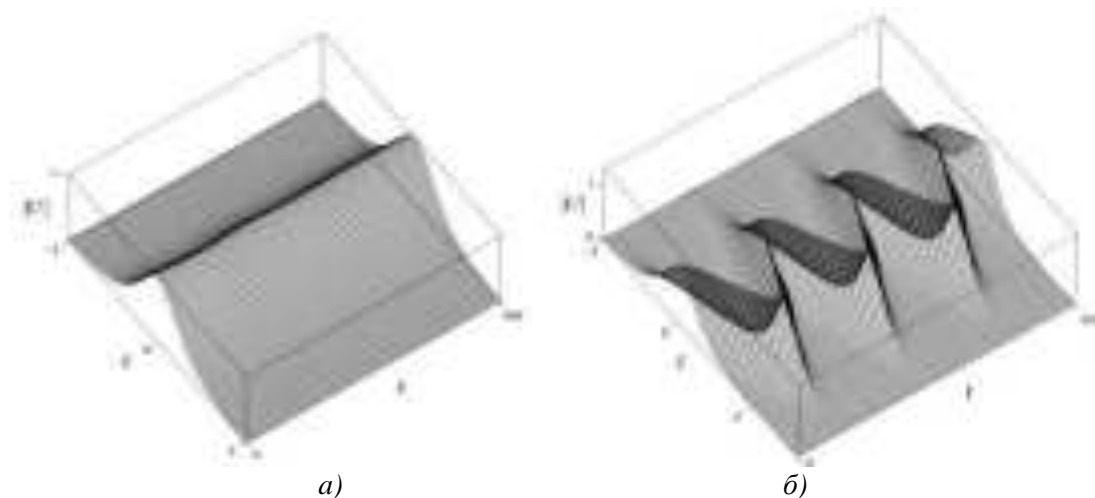


Рис. 3. Численные результаты пространственно-временного распределения $|U|$ при различных μ : $\mu = 1/16 \equiv \mu_*$ (а); $-\mu = 1/32 \equiv \mu_*/2$ (б)

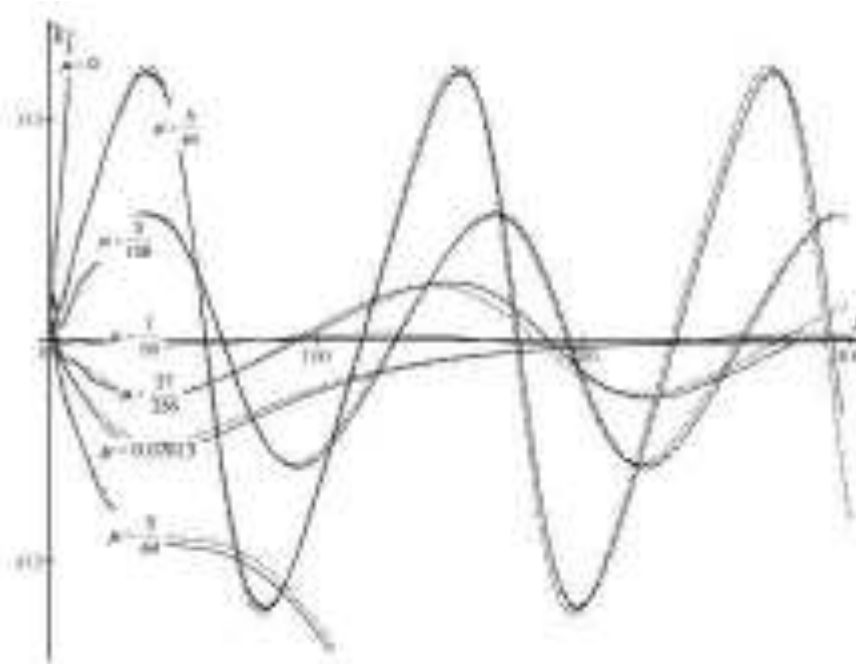


Рис. 4. Численные и аналитические результаты (сплошные и пунктирные кривые) для локального волнового числа в точке максимума огибающей волнового пакета в зависимости от времени t при различных значениях μ

Заключение

В данной работе рассмотрена динамика солитонов в рамках расширенного НУШ с псевдоиндуцированным рассеянием и пространственно неоднородной дисперсией в виде перепада. Показана возможность баланса псевдоиндуцированного рассеяния, приводящего к смещению спектра волновых чисел солитона в длинноволновую область, и убывающей в пространстве дисперсии, смещающей спектр солитона в коротковолновую область.

Данное научное исследование (№ проекта 14-01-0023) выполнено при поддержке Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2014/2015 гг.

Библиографический список

1. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S. Kivshar, G.P. Agraval // Academic, San Diego, 2003.
2. **Gordon, J.P.** Theory of the soliton self-frequency shift // Optics Letters 11 (1986) 662-664.
3. **Malomed, B.A.** Soliton Management in Periodic Systems / B.A. Malomed. Springer, New York, 2006.
4. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang. Springer, New York, 2001.
5. **Gromov, E.M.** Soliton dynamics in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial counterpart of the stimulated Raman scattering / E.M. Gromov, B.A. Malomed // J. Plasma Physics 79 (2013) 1057-1062.
6. **Gromov, E.M.** Damped solitons in an extended nonlinear Schrödinger equation with a spatial stimulated Raman scattering and decreasing dispersion / E.M. Gromov, B.A. Malomed // Opt. Comm. 320 (2014) 88-93.
7. **Aseeva, N.V.** The short envelope soliton dynamics in inhomogeneous dispersive media with allowance for stimulated scattering by damped low-frequency waves / N.V. Aseeva, E.M. Gromov, V.V. Tyutin // Radiophysics and Quantum Electronics 56 (2013) 157-166.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014*

E.M. Gromov, T.V. Nasedkina, V.V. Tyutin

**SOLITONS IN AN EXTENDED NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION
WITH A SPATIAL KINK-TYPE DISPERSION DISTRIBUTION**

National Investigate University Higher School of Economics

Purpose: Dynamics of solitons is considered in the framework of the extended nonlinear Schrödinger equation including a pseudo-stimulated-Raman-scattering term, i.e., a spatial-domain counterpart of the stimulated-Raman-scattering term, which is a known ingredient of the temporal-domain nonlinear Schrödinger equation in optics. Also included is inhomogeneity of the spatial second-order dispersion in kink-type form.

Approach: Soliton's dynamic investigated as analytically as numerically.

Findings: An analytical soliton solution with a permanent shape is found in an approximate form.

Originality: The obtained results is original and can be important for optical fibers application.

Key words: Extended Nonlinear Schrödinger Equation, Soliton Solution, Stimulated Scattering, Inhomogeneity, Second-Order Dispersion, Analytical Solutions, Numerical Simulation

УДК 629.4.015

Ю.С. Ромен¹, Я.М. Клебанов², Е.А. Солдусова²**ДИНАМИКА ДВИЖЕНИЯ КОЛЕСНОЙ ПАРЫ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ЭКИПАЖА С УЧЕТОМ ХАРАКТЕРИСТИК РЕЛЬСОВОГО ПУТИ**Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта¹,
Самарский государственный технический университет²

Рассматривается построение уравнений динамики движения колёсных пар железнодорожных экипажей с учётом характеристик рельсового пути. Составленная система уравнений полностью охватывает все степени свободы движения колесной пары и взаимодействующих с нею конструктивных элементов тележки модели ЦНИИ-ХЗ типа 18-100.

Ключевые слова: дифференциальные уравнения движения, компьютерное моделирование, центр масс, колесная пара, железнодорожный вагон.

Учет характеристик рельсового пути при моделировании динамики движения подвижного состава направлен на повышение безопасности движения поездов. Оценка состояния технических средств инфраструктуры наряду с оценкой состояния технических средств подвижного состава и оценкой режима ведения поезда является важной частью общей оценки безопасности движения поездов по определенному участку пути.

Компьютерное моделирование движения железнодорожного подвижного состава опирается на уравнения многомассовой динамики твёрдых тел. Такие уравнения, нашедшие своё применение в решении прикладных задач, представлены в ряде работ [1-5]. Далее рассматривается построение уравнений колебаний колёсных пар тележек железнодорожного экипажа, которые используются авторами для моделирования динамики движения экипажей. Составленная система уравнений ориентирована на конструктивные особенности тележки модели ЦНИИ-ХЗ типа 18-100.

Движение колёсной пары представляется как совокупность поступательного движения вместе с центром масс пары и вращательного движения вокруг центра масс. В этом случае, согласно теоремам о количестве движения и кинетическом моменте, поступательное движение определяется только главным вектором внешних сил, а вращательное – только главным моментом этих сил. Рассматривая колебания колёсных пар, пренебрегаем квадратами угловых скоростей и их парными произведениями по сравнению с угловыми ускорениями.

При составлении дифференциальных уравнений движения и уравнений связи была использована правая декартова система координат (см. рис. 1) с вертикальной осью Z , направленной вниз, поперечной горизонтальной осью Y , направленной вправо по ходу движения, и продольной осью X , проходящей на уровне пятниковых узлов и направленной по ходу движения экипажа. Для углов поворота положительные направления следующие: вилание Ψ – по часовой стрелке, если смотреть по оси Z , боковая качка Φ – по часовой стрелке, если смотреть по направлению движения (по оси X). Используются следующие обозначения индексов: i – номер колесной пары ($i = 1, 2$), j – номер тележки (для первой по ходу тележки $j = 1$), k – индекс для обозначения стороны тележки ($k = 1$ – правая сторона по ходу движения, $k = 2$ – левая).

Предполагается, что экипаж движется со средней скоростью V . Это позволяет вместо оператора $\frac{d()}{dt}$ ввести $\frac{Vd()}{dx}$. В дальнейшем дифференцирование по x отмечается штрихом.

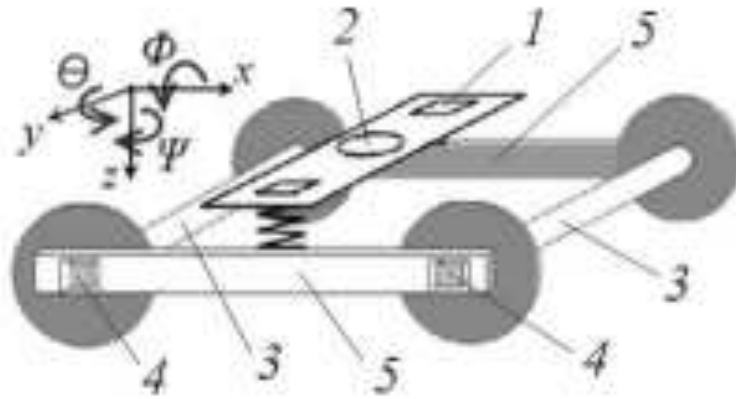


Рис. 1. Схема тележки:

1 – наддресорная балка; 2 – пятниковый узел; 3 – колёсная пара;
4 – букса; 5 – боковая рама

Вертикальные колебания колёсной пары описываются уравнением

$$V^2 m z''_{ij} = \sum_k \Delta N_{ijk} - \sum_k \Delta N_{ijk}^+ + P,$$

где P и m – вес и масса колесной пары с буксами; ΔN_{ijk} – силы взаимодействия колеса и рельса; ΔN_{ijk}^+ – силы взаимодействия колёсной пары с боковыми рамами тележки. Для них

$$\Delta N_{ijk} = \begin{cases} -\frac{r_0}{s} H_{Pijk} (-1)^k & \text{для } \Delta_{ijk} \leq 0; \\ -c_z \Delta_{ijk} - k_z V \Delta'_{ijk} - \frac{r_0}{s} H_{Pijk} (-1)^k & \text{для } \Delta_{ijk} > 0, \end{cases} \quad (1)$$

где, если по (1) получается $\Delta N_{ijk} \geq 0$, то далее принимаем $\Delta N_{ijk} = 0$; H_{Pijk} – поперечная сила, действующая на боковую раму тележки от i -й колесной пары c_z – вертикальная жесткость рельса; k_z – демпфирование в пути, s – расстояние между кругами катания; r_0 – номинальный радиус колеса по кругу катания; Δ_{ijk} – прогиб рельса, определяемый зависимостями:

$$\Delta_{ijk} = z_{ij} - (-1)^k \frac{s}{2} \Phi_{ij} - \bar{\eta}_{ijk};$$

$$\Delta'_{ijk} = z'_{ij} - (-1)^k \frac{s}{2} \Phi'_{ij} - \bar{\eta}'_{ijk},$$

где $\bar{\eta}_{ijk}$ – вертикальное отклонение рельса от плоскости пути с учетом возвышения.

$$\bar{\eta}_{ijk} = \eta_{ijk} - |h_j| \frac{1 + (-1)^k \text{sign } h_j}{2},$$

где η_{ijk} – неровность поверхности катания рельса (положительная вниз); h_j – возвышение наружного рельса в кривой, положительное при возвышении левого рельса (в правой кривой).

Дифференциальное уравнение крена колёсной пары имеет вид:

$$V^2 J_x \Phi''_{ij} = b(\Delta N_{ij1} - \Delta N_{ij2}) - b(\Delta N_{ij1}^+ - \Delta N_{ij2}^+),$$

где J_x – момент инерции колесной пары, $2b$ – расстояние между рессорными комплектами.

Поворот колёсной пары в раме тележки

$$V^2 J_z \Psi_{ij}'' = X_{ij1} b - X_{ij2} b + \frac{1}{2} s (H_{x_{ij2}} - H_{x_{ij1}}),$$

где $J_z = J_x$ – моменты инерции колесной пары; Ψ_{ij} – угол поворота колесной пары в абсолютной системе координат:

$$\Psi_{ij}' = \gamma_{ij}' + \phi_j',$$

где γ_{ij}' – угловая скорость поворота колесной пары относительно касательной к средней линии пути; ϕ_j – угол расположения средней линией пути; $H_{x_{ijk}}$ – продольная сила, действующая на колесо со стороны рельса, являющаяся функцией относительного проскальзывания на поверхности контакта.

Боковой отход колёсной пары описывается уравнением

$$V^2 m y_{ij}'' = P \frac{\bar{\eta}_{1ij} - \bar{\eta}_{2ij}}{s} - \sum_k H_{P_{ijk}} - m V^2 \phi_j' + \sum_k F_{ijk},$$

где F_{ijk} – сила, действующая на пару со стороны k -го рельса:

$$F_{ijk} = \begin{cases} H_{y_{ijk}} - c_{py} (y_{ij} - \sigma_{ijk}) & \text{для } \sigma_{ij1} \leq y_{ij} \leq \sigma_{ij2}; \\ H_{y_{ijk}} & \text{для } \sigma_{ij1} > y_{ij} > \sigma_{ij2}, \end{cases}$$

где c_{py} – поперечная жесткость рельса по головке; $H_{y_{ijk}}$ – сила псевдоскольжения, действующая на колесо по поверхности катания при отсутствии набегания ребордой на рельс; σ_{ijk} – зазор в колее на сторону под колесной парой, рассчитываемый по формулам

$$\sigma_{ijk} = \Delta \sigma_{ijk} - (-1)^k \sigma_0 - \frac{H_{y_{ijk}}}{c_{py}},$$

где σ_0 – номинальный зазор в колее; $\Delta \sigma_{ijk}$ – ордината неровности k -го рельса (положительная при отклонении рельса вправо).

Продольное смещение колёсной пары в раме тележки описывается уравнением

$$V^2 m x_{ij}'' = \sum_k H_{x_{ijk}} - \sum_k X_{ijk},$$

где силы $H_{x_{ijk}}$ и $H_{y_{ijk}}$ являются проекциями силы псевдоскольжения, зависящей от величины общей скорости проскальзывания в соответствии с пропорциями

$$H_{x_{ijk}} = H_{ijk} \frac{\bar{U}_{x_{ijk}}}{\bar{U}_{ijk}};$$

$$H_{y_{ijk}} = H_{ijk} \frac{\bar{U}_{y_{ijk}}}{\bar{U}_{ijk}},$$

где H_{ijk} – полная величина силы псевдоскольжения (знак минус опущен, так как реакция рельса $\Delta N < 0$), определяемая по формулам:

$$H_{ijk} = \kappa_{ijk} \Delta N_{ijk} \bar{U}_{ijk},$$

где ΔN_{ijk} – нагрузка на колесо; κ_{ijk} – криповский коэффициент пропорциональности, описываемый зависимостью:

$$\kappa_{ijk} = \frac{0,25}{\sqrt{U_{x_{ijk}}^2 + U_{y_{ij}}^2 + \varepsilon^2}},$$

где $\varepsilon^2 = 2 \cdot 10^{-6}$ – коэффициент, который соответствует тангенсу угла наклона, равному 176 при бесконечно малых относительных скоростях проскальзывания. Это согласуется с фор-

мулой Картера при осевых нагрузках порядка 20 т.

Скорость относительного проскальзывания колеса

$$\bar{U}_{ijk} = \sqrt{\bar{U}_{xijk}^2 + \bar{U}_{yij}^2},$$

где \bar{U}_{xijk} – относительная скорость продольного проскальзывания

$$\bar{U}_{xijk} = (-1)^k \left[\frac{s}{2} \Psi'_{ij} + \frac{1}{r_0} f_k(y_{ij}) \right],$$

где $f_k(y_{ij})$ – превышение радиуса расположения площадки контакта над номинальной величиной у k -го колеса

$$f_k(y_{ij}) = \begin{cases} \mu(y_{ij} - \Delta\sigma_{ijk}) & , \text{при } \sigma_{ij1} > y_{ij} > \sigma_{ij2}; \\ 2\mu(y_{ij} - \Delta\sigma_{ijk}) & , \text{при } \sigma_{ij1} \leq y_{ij} \leq \sigma_{ij2}, \end{cases}$$

где μ – коничность поверхности катания.

Относительная скорость поперечного проскальзывания колеса \bar{U}_{yij} :

$$\bar{U}_{yij} = \frac{1}{V} (\dot{y}_{ij} - Vy_{ij}).$$

Поскольку в модели процессы рассматривают в функции пути, то для каждого из колес:

$$\bar{U}_{yij} = y'_{ij} - y_{ij}.$$

Изложенные зависимости являются частью общей системы дифференциальных уравнений движения многомассовой системы, описывающей колебания железнодорожного экипажа.

Теперь рассмотрим, как учитывается поведение колёсных пар при описании поведения движения тележки.

Вертикальное перемещение центра k -й боковины j -й тележки (z_{jk}^+):

$$z_{jk}^+ = 0,5 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 z_{ij} - (-1)^k b \cdot \sum_{i=1}^2 \Phi_{ij} \right);$$

$$z_{jk}^{+'} = 0,5 \cdot \left(\sum_{i=1}^2 z'_{ij} - (-1)^k b \cdot \sum_{i=1}^2 \Phi'_{ij} \right),$$

где z_{ij} – подпрыгивание центра i -й колесной пары j -й тележки; Φ_{ij} – угол крена i -й колесной пары j -й тележки; b – половина расстояния между рессорными комплектами.

Продольная сила, действующая на надрессорную балку со стороны k -й боковины j -й тележки (X_{jk}^+):

$$X_{jk}^+ = \sum_{i=1}^2 X_{ijk},$$

где X_{ijk} – продольная сила, действующая на боковую раму j -й тележки от i -й колесной пары со стороны k -й буксы:

$$X_{ijk} = \begin{cases} c_x [x_{ij} + b(-1)^k (\gamma_{ij} - \gamma_j^+) + (-1)^l [\Delta_{xl}]_{ijk}] - f_{\delta} \Delta N^+_{ijk} F_X (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) + \\ + k_x^+ V [x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})] \quad \text{при} \quad |x_{ij} + b(-1)^k (\gamma_{ij} - \gamma_j^+)| \geq [\Delta_{xl}]_{ijk}; \\ - f_{\delta} \Delta N^+_{ijk} F_X (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) + \\ + k_x^+ V [x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})] \quad \text{при} \quad |x_{ij} + b(-1)^k (\gamma_{ij} - \gamma_j^+)| < [\Delta_{xl}]_{ijk}; \end{cases},$$

$$F_X (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) = F \cdot (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) \text{при} (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) < 1/A,$$

$$F_X (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) = 1 \text{при} (x'_{ij} + b(-1)^k (\psi'_{ij} - \psi_j^{+'})) \geq 1/A,$$

где параметры A и F зависят от условий решения конкретной задачи; c_x – продольная жесткость рамы тележки при ее деформации после выбора зазора в буксовом проеме; k_x^+ – демпфирование при продольных перемещениях буксы; $[\Delta_{xl}]_{ijk}$ – зазор на сторону в буксовом проеме относительно его оси; индекс $l=1$ для величины зазора впереди от его оси и $l=2$ при направлении в сторону, противоположную движению экипажа соответственно:

$$l = \begin{cases} 1 \text{ при } x_{ij} + b(-1)^k (\gamma_{ij} - \gamma_{\delta jk}) \geq 0, \\ 2 \text{ при } x_{ij} + b(-1)^k (\gamma_{ij} - \gamma_{\delta jk}) < 0, \end{cases}$$

где x_{ij} – продольное перемещение центра i -й колесной пары относительно шкворневой точки тележки; γ_{ij} – угол поворота колесной пары относительно касательной к средней линии колеи в центре тележки.

Поворот боковой рамы тележки

$$V^2 J_{zp}^+ \psi''_{\delta jk} = (H_{P1jk} - H_{P2jk})a - M_{jk}^+,$$

где H_{Pijk} – поперечная сила, действующая на боковую раму тележки от i -й колесной пары; J_{zp}^+ – момент инерции боковой рамы тележки относительно вертикальной оси; a – расстояние между колёсными парами; M_{jk}^+ – момент, действующий на надрессорную балку со стороны боковины при её повороте

$$H_{Pijk} = \begin{cases} c_{yijk} (y_{ij} - y_{ijk}^+ - [\Delta_y]_{ij} \text{sign}(y_{ij} - y_{ijk}^+)) - f_{\delta} \Delta N^+_{ijk} F_{H_p} (y'_{ij} - y'_{ijk}) + \\ + k_y^+ V (y'_{ij} - y'_{ijk}) \quad \text{при} \quad |y_{ij} - y_{ijk}^+| \geq [\Delta_y]_{ij}, \\ - f_{\delta} \Delta N^+_{ijk} F_{H_p} (y'_{ij} - y'_{ijk}) + k_y^+ V (y'_{ij} - y'_{ijk}) \quad \text{при} \quad |y_{ij} - y_{ijk}^+| < [\Delta_y]_{ij} \end{cases},$$

$$M_{jk}^+ = M_{Tj}^+ F_{M^+} (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) + c_{\psi jk}^+ (\gamma_{\delta jk} - \gamma_j^+) + k_x^+ V (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}),$$

$$M_{Tj}^+ = B - C \cdot \Delta N_{jk}^*,$$

где параметры B и C зависят от условий решения конкретной задачи, M_{Tj}^+ – момент трения при депланации тележки:

$$F_{M^+} (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) = H \cdot (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) \text{при} (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) < \frac{1}{D},$$

$$F_{M^+} (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) = 1 \text{при} (\psi'_{\delta jk} - \psi_j^{+'}) \geq \frac{1}{D},$$

где $c_{\psi jk}^+$ – жесткость при депланации тележки:

$$c_{\psi jk}^+ = E - G \cdot \Delta N_{jk}^*,$$

параметры H , D , E и G зависят от условий решения конкретной задачи.

Рамная сила

$$H_{Pij} = \sum_k H_{Pijk},$$

$$F_{Hp}(y'_{ij} - y_{ijk}^{+'}) = K \cdot (y'_{ij} - y_{ijk}^{+'}) \text{ при } (y'_{ij} - y_{ijk}^{+'}) < \frac{1}{J},$$

$$F_{Hp}(y'_{ij} - y_{ijk}^{+'}) = 1 \text{ при } (y'_{ij} - y_{ijk}^{+'}) \geq \frac{1}{J},$$

где параметры K и J зависят от условий решения конкретной задачи; c_{yijk} – жесткость связей, ограничивающих поперечное перемещение колесной пары относительно рамы тележки; y_{ij} – перемещение колесной пары относительно оси пути; $y_{ijk}^{+'}$ – перемещение сечения k -й боковой рамы j -й тележки над i -й колесной парой относительно оси колеи:

$$y_{ijk}^{+'} = y_{jk}^{+'} - (-1)^i a \gamma_{\delta jk} - \frac{a^2}{2} \phi_j',$$

$$y_{ijk}^{+'} = y_{jk}^{+'} - (-1)^i a \gamma_{\delta jk}',$$

Углы поворота наддрессорной балки $\gamma_j^{+'}$ и боковой рамы $\gamma_{\delta jk}$ j -й тележки в колее:

$$\gamma_j^{+'} = \psi_j^{+'} - \phi_j',$$

$$\gamma_{\delta jk}' = \psi_{\delta jk}' - \phi_j',$$

$[\Delta_y]_{ij}$ – поперечный зазор в буксовых челюстях на сторону относительно среднего положения i -й колесной пары по отношению к продольной оси j -й тележки; f_{δ} – коэффициент трения по буксе; $k_y^{+'}$ – демпфирование при поперечных перемещениях колесной пары.

Библиографический список

1. **Вериго, М.Ф.** Взаимодействие пути и подвижного состава / М.Ф. Вериго, А.Я.Коган. – М.: Транспорт, 1986. – 559 с.
2. **Вершинский, С.В.** Динамика экипажа / С.В. Вершинский, В.Н. Данилов, В.Д. Хусидов. – М.: Транспорт, 1991. – 360 с.
3. **Wickens, A.H.** Fundamentals of rail vehicle dynamics: guidance and stability / A.H. Wickens. – Lisse: Swets and Zeitlinger, 2003. – 287 p.
4. **Wickens, A. H.** A History of Railway Vehicle Dynamics. Handbook of Railway Vehicle Dynamics. – Boca Raton: Taylor & Francis, 2006. – P.5 – 38.
5. **Ромен, Ю.С.** Моделирование колебаний кузова железнодорожного вагона / Ю.С. Ромен, Я.М. Клебанов, Е.А. Солдусова // Вестник Самарского государственного технического университета. Сер. технические науки / СамГТУ. – Самара, 2013. №3(39). С. 141–147.

Дата поступления
в редакцию 29.04.2014

Yu.S. Romen¹, I. M. Klebanov², E.A. Soldusova²

WHEELSET MOTION DYNAMICS OF RAILWAY VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT THE CHARACTERISTICS OF THE TRACK

All-Russian Scientific Research Institute of Railway Transport¹,
Samara state technical university²

The construction of the equations of motion dynamics of railway vehicle wheelsets taking into account the characteristics of the track is considered. The composed system of equations fully covers all degrees of freedom of motion of the wheelset and interacting with it elements of carts model ЦНИИ-ХЗ type ХЗ 18-100.

Key words: differential equations of motion, computer simulation, the center of mass, oscillations, railway car.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Ким Ынсу (Южная Корея) – Институт прикладной физики РАН, аспирант; (831)4164635

Кисиленко Кирилл Игоревич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистрант; 436-82-33, physics@nntu.nnov.ru.

Ковалев Николай Федорович – Институт прикладной физики РАН, зав. лабораторией, профессор, д-р.ф.-м.наук; (831)4367810

Ковалев Федор Николаевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент; kovalev@nntu.nnov.ru, 89200137333

Ковалев Александр Николаевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент kovalev@nntu.nnov.ru, 89200145703

Раевский Алексей Сергеевич -, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой «Физика и техника оптической связи», д-р.ф.-м.наук, профессор; 436-82-33, raevsky@nntu.nnov.ru.

Раевский Сергей Борисович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р.техн.наук, профессор; 436-82-33, physics@nntu.nnov.ru.

Фильченков Сергей Евгеньевич - Институт прикладной физики РАН, научный сотрудник, канд.ф.-м.наук; (831)4164901, fil@appl.sci-nnov.ru

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Jorge Ramirez Fernandez – Engineering Center for Natural Disaster Mitigation CIMCN, Faculty of Engineering. University of Antofagasta, Chile, professor; jbramirez@vtr.net

Баранова Наталья Анатольевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант; (8312)436-63-93, natalia.baranova@inbox.ru

Козелков Андрей Сергеевич – ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», начальник научно-исследовательской лаборатории, канд. ф.-м.наук, докторант кафедры «Прикладная математика» НГТУ им. Р.Е. Алексеева; A.S.Kozelkov@vniief.ru

Куркин Андрей Александрович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, гл. науч. сотрудник

УНИИИР, зав. кафедрой «Прикладная математика», науч. руководитель лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф», д-р ф.-м.наук, профессор; 436-04-89, aakurkin@gmail.com

Кузнецов Константин Игоревич - Сахалинский государственный университет, науч. сотрудник лаборатории моделирования природных и социальных процессов, канд.ф.-м.наук; +79081542050, kost.kuznetsov@gmail.com

Мазова Раиса Хаимовна - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р ф.-м. наук, доцент; (8312) 436-63-93, raissamazova@yandex.ru

Пелиновский Ефим Наумович – Институт прикладной физики РАН, глав. науч. сотрудник, вед. науч. сотрудник лаборатории «Моделирования природных и техногенных катастроф» НГТУ, д-р.ф.-м.наук, профессор; pelinovsky@gmail.com

Рассадин Александр Георгиевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, студент; (8312) 436-63-93, mail@arassadin.com

Шамин Роман Вячеславович - РУДН, зав. кафедрой «Математическое моделирование в космических системах», Сахалинский государственный университет, д-р.ф.-м.наук, профессор; +79163728842, roman@shamin.ru

Юдин Александр Викторович - Сахалинский государственный университет, науч. сотрудник лаборатории моделирования природных и социальных процессов, канд.ф.-м.наук; +79653432561, yudinorel@gmail.com

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Богачева Екатерина Олеговна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистрант; katebogacheva@gmail.com

Дмитриев Дмитрий Валерьевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, доцент, канд.техн. наук; +79027809518

Жучков Роман Николаевич – АПИ (филиал НГТУ им. Р.Е.Алексеева), аспирант; 8-910-872-76-77, 8(83130)-2-75-06(1109), roman_jkv@mail.ru

Корелин Олег Николаевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент; o_korelin@mail.ru

Никулин Евгений Александрович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, профессор кафедры «Вычислительные системы и технологии», канд.техн.наук, доцент;
+7 910 875 63 80, nea@mail.nnov.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Власов Евгений Евгеньевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ассистент;
(831) 436-57-10, kpmis@nntu.nnov.ru

Кабалдин Юрий Георгиевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
(831) 436-5 10, 8-920-020-52-59, kpmis@nntu.nnov.ru

Кретинин Олег Васильевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
(831) 436-82-40, 8-951-913-78-75, kretinin@list.ru

Серый Сергей Владимирович - Комсомольский-на-Амуре технический университет, канд. техн. наук, доцент;
(4217) 20-10-79, 8-909-847-31-28, ktm@knastu.ru

Кузьмишина Анастасия Михайловна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ассистент;
(831) 436-57-10, kpmis@nntu.nnov.ru

Лаптев Игорь Леонидович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой «Технология и оборудование машиностроения», д-р техн. наук; (831) 436-57-10, kpmis@nntu.nnov.ru

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Баринов Александр Александрович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистрант;
(831) 436-80-23, lxbarinov92@mail.ru

Бородина Вера Евгеньевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистрант;
(831) 436-80-23, veb91@mail.ru

Дмитриев Сергей Михайлович – ректор НГТУ, зав. кафедрой «АТС», д-р.техн.наук, профессор;
(831) 436-63-34, rectorat@nntu.ru

Новоселова Наталия Анатольевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.техн.наук, доцент;
(831) 436-82-33, physics@nntu.nnov.ru

Рудоясова Людмила Григорьевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.техн.наук, доцент;
(831) 436-82-33, physics@nntu.nnov.ru

Хробостов Александр Евгеньевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, директор ИЯЭиТФ, канд.техн.наук, доцент;
(831) 436-80-23, khrobostov@nntu.nnov.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Бекетов Сергей Анатольевич – МГТУ им. Н.Э.Баумана, д-р.техн.наук, профессор;
8(499)263-64-04, sergeyab@rm.ru

Котровский Александр Александрович - Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации», канд.техн.наук, доцент;
8(499) 175-82-45, kotrovskiy@rambler.ru

Котиев Георгий Олегович – МГТУ им. Н.Э.Баумана, зав. кафедрой, д-р техн.наук, профессор;
8(499)263-61-40, kotievgo@yandex.ru

Морозов Александр Владимирович – МГТУ им. Н.Э.Баумана, ассистент;
8(499)263-64-04, avmorozoff@yandex.ru

Наумов Евгений Александрович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, инженер; +7 920-299-11-09

Огороднов Сергей Михайлович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
(831) 436-03-08

Сарач Евгений Борисович – МГТУ им. Н.Э.Баумана, д-р техн. наук, профессор;
8(499)263-64-04, sarach@yandex.ru

Смирнов Игорь Артурович - Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации», канд.техн.наук, начальник кафедры;
8(499) 175-82-45, kotrovskiy@rambler.ru

Тихомиров Александр Николаевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
(831) 436-03-08

Шаров Дмитрий Владимирович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ведущий инженер;
+7-903-043-33-39, (831) 436-03-08, (831) 436-23-56, cte@mail.ru

Филев Александр Владимирович - Военный учебно-научный центр Сухопутных войск «Общевойсковая академия Вооруженных Сил Российской Федерации», канд.техн.наук, доцент; 8(499) 175-82-45 kotrovskiy@rambler.ru

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Дегтярев Александр Владимирович – ОАО «ЦКБ по СПК им. Р.Е. Алексеева», инженер-конструктор;
+7(915)-941-12-61, alexandr_dvs@mail.ru

Захаров Лев Анатольевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
8-(831)-436-78-79, tseu@nntu.nnov.ru

Захаров Илья Львович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук,
докторант;
+7(916)-755-20-12, zakharov_oi@mail.ru
Тарасов Алексей Николаевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
+7(904)-054-49-41, tarasov_alexey@list.ru
Сандаков Михаил Юрьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель;
2578677, 89108712583, m_sandakov@mail.ru
Сеземин Алексей Валерьевич – ОАО «РУ-
МО», ведущий конструктор;
+7(908)-167-92-91, sezemin@gmail.com
Локтев Александр Васильевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, профессор;
436-78-79, prof.loktev@yandex.ru
Малахов Алексей Валентинович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
436-78-79, alex19590612@yandex.ru

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Алтунин Борис Юрьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
8(831)4364338; toe@nntu.nnov.ru
Бурмакин Олег Анатольевич – Волжская
государственная академия водного транспорта,
канд. техн. наук, доцент;
89030539997, boa_71@mail.ru
Варечкин Юрий Венеаминович – Волжская
государственная академия водного транспорта,
канд. техн. наук, доцент; 4197866
Гуляев Владимир Викторович – Волжская
государственная академия водного транс-
порта, канд. техн. наук, доцент;
8(831)4193513, eovt@mail.ru
Зырин Дмитрий Владимирович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
89873982350
Кралин Алексей Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой,
канд. техн. наук;
8(831)4364338, toe@nntu.nnov.ru
Карнавский Иван Александрович –
начальник сектора схемотехники ООО "ЛЮ-
ТЕС ТМ", канд. техн. наук, ivan650@mail.ru
Ларионов Леонид Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
89108794868
Лоскутов Алексей Борисович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой, д-р техн.
наук, профессор;
+7 (831)436-23-04, es@nntu.nnov.ru
Лоскутов Антон Алексеевич - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант; 89081586366

Мочалин Дмитрий Сергеевич – ОАО "Ги-
прогазцентр", инженер 1 категории;
dmitriy.mochalin@mail.ru
Малышев Юрий Сергеевич - Волжская гос-
ударственная академия водного транспорта, ст.
преподаватель, канд. техн. наук;
89049095590, elektrikasp@mail.ru
Садиков Дмитрий Геннадьевич – ОАО "Ги-
прогазцентр", инженер 2 категории;
Dima_sd5@mail.ru
Сычушкин Иван Вячеславович – Волжская
государственная академия водного транспорта,
канд. техн. наук, доцент; 89202513701
Титов Владимир Георгиевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р. техн. наук, профессор;
+7 (831) 436-17-68, eos@nntu.nnov.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Закирова Мария Германовна – Пермский
национальный исследовательский политехни-
ческий университет, канд. техн. наук, доцент;
83422198034, marusia-art@mail.ru
Коровин Валерий Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
8(831) 436-43-95
Курилина Татьяна Дмитриевна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель;
kurilinatd@yandex.ru
Макаренко Константин Васильевич – Брян-
ский государственный технический универси-
тет, зав. кафедрой «Машиностроение и мате-
риаловедение», канд. техн. наук, доцент;
8(4832)588218, 89102961190,
makkon1@yandex.ru
Романов Илья Дмитриевич - Пермский
национальный исследовательский политехни-
ческий университет, ведущий технолог;
89223392907, i-romanov@ro.ru
Степанов Павел Петрович – ИТЦ ОАО
«ВМЗ», директор, канд. техн. наук;
607060 Нижегородская обл., г. Выкса,
ул. Братьев Баташевых
Сенопальников Валерий Михайлович –
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук,
доцент; 436-34-78, mlp@nntu.nnov.ru
Сивков Владимир Лаврентьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, директор АВШ, д-р
техн. наук, профессор;
436-34-78, mlp@nntu.nnov.ru
Титов Андрей Вячеславович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель;
436-34-78, mlp@nntu.nnov.ru
Шацов Александр Аронович – Пермский
национальный исследовательский политехни-
ческий университет, д-р техн. наук, профессор;
83422198034, shatsov@pstu.ru

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

Бакаев Вячеслав Васильевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. хим. наук, доцент; (831)468-72-64, (831)436-93-58

Водзинский Владимир Юрьевич – НГТУ им. Алексеева, канд. физ.-мат. наук, доцент; 8-951-906-36-38

Дородницына Анастасия Александровна - ООО «Химсинтез», ст. лаборант; (8313) 25-23-46, 25-45-23, 26-02-33

Исаев Александр Валерьевич – НИИИС им. Ю. Е. Седакова, начальник сектора антикоррозионных покрытий, канд. техн. наук; (831) 469-51-35

Исаев Валерий Васильевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент (831)468-88-11, (831)436-93-58

Жирнова Тамара Александровна – НИИИС им. Ю. Е. Седакова, ведущий инженер-технолог сектора антикоррозионных покрытий; (831) 469-51-35

Михаленко Михаил Григорьевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, директор ИФХТиМ, д-р техн. наук, профессор; (831) 437-69-87, (831)436-93-58.

Наумов Владимир Иванович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой «Производственная безопасность, экология и химия», д-р.хим.наук, профессор; (831)258-31-63, (831) 4-36-43-21, obchim@nntu.nnov.ru

Самсонова Альбина Дмитриевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.хим.наук, доцент; (831)428-87-32, (831) 4-36-43-21, samsonova AD@yandex.ru

Чумаков Владимир Игоревич - ООО «Химсинтез», руководитель проекта «Защитные покрытия»; +79519196718, (8313) 252346, (8313) 25-23-46, 25-45-23, 26-02-33, vladimir@chimsn.ru

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Вдовина Светлана Борисовна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель; 436-73-74, vdovinasb@yandex.ru, vdovinasb@mail.ru

Морозова Галина Алексеевна – Нижегородский институт управления филиала ФГБОУ ВПО РАНХиГС, зав. кафедрой управления и маркетинга, д-р эконом. наук, профессор; 8(831) 412-41-64, k-market@vvpaa.vvags.ru

Лапаев Дмитрий Николаевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р эконом. наук, профессор; 8(831)367374, dnlapaev@mail.ru

Поташник Ярослав Семенович – НГПУ им. К. Минина, канд. эконом. наук, доцент 436-01-94, keo.vgipu@mail.ru

Труфанова Инна Сергеевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель; 436-73-74

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

Багаев Алексей Владимирович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. фил. наук, доцент; 8(312)257-86-51

Ефимов Александр Васильевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. ист. наук, доцент; kpt@nntu.nnov.ru

Скобелева Екатерина Ивановна - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, доцент, канд. соц. наук; ekskobeleva@mail.ru

Прохорова Марина Вячеславовна - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. соц. наук, доцент; prochus83@rambler.ru

МАКРОМИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

Былинкин Сергей Федорович – ОАО Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА», начальник отдела НПО 100; (83147) 7-83-69, 8 831 477 83 96

Вавилов Владимир Дмитриевич – Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева), д-р. техн. наук, профессор; 89101242345, apu@apingtu.edu.ru

Волков Валерий Леонидович – Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева), доцент; 8-83147-44052, vvl_arzamas@mail.ru

Грязев Алексей Александрович – Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева), аспирант; 83142) 4-52-56, 8-908 234 93 44, alekseygryazev@mail.ru

Гайнов Сергей Иванович – Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева), ассистент; (83147) 4-40-52, 8 906 350–88–97; serazhsoft@gmail.com

Жидкова Наталья Валерьевна – Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ им. Р.Е. Алексеева), канд. техн. наук, доцент; 8-9036000416, natazh80@yandex.ru

Жидков Алексей Альбертович – ООО Арзамасский электромеханический завод, зам. генерального директора; zh.a@aemp.ru

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ
И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ**

Галкин Владимир Михайлович – НГТУ им. Р.Е.Алексеева, д-р ф.-м.наук, профессор; 257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

Громов Евгений Михайлович – Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, д-р ф.-м.наук, профессор, зав. кафедрой; (831) 4 16 95 40, egromov@hse.ru

Ерофеева Лариса Николаевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.ф.-м.наук, доцент; 257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

Клебанов Яков Мордухович – Самарский государственный технический университет, проректор по учебной работе, д-р техн. наук, профессор; 8(846)278-43-03, jklebanov@mail.ru

Лещева Светлана Викторовна – НГТУ им. Р.Е.Алексеева, канд.ф.-м. наук, доцент; 257-86-91, vm@nntu.nnov.ru

Наседкина Татьяна Владимировна – Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, студент; (831) 4 16 95 36, 16_14-94-mail.ru@mail.ru

Тютин Виктор Владимирович – Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики, канд.ф.-м.наук, доцент, зам. зав. кафедрой математики; (831) 4 16 95 40, vtyutin@hse.ru

Ромен Юрий Семёнович – ОАО «Всероссийский научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта», глав. науч. сотрудник, д-р. техн. наук, профессор; 8(495) 180-86-24, uromen@mail.ru

Солдусова Екатерина Александровна – Самарский государственный технический университет, канд. техн. наук, доцент; 8(846)332-28-91, soldusova@gmail.com

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы, таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным, могут использоваться слова: «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
E-mail: rsl@nntu.nnov.ru*

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

ТРУДЫ
НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

№ 2 (104)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@ntu.nnov.ru

Подписано в печать 09.06.2014. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 42,25. Уч.-изд. л. 39,0. Тираж 300 экз. Заказ ...

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013