

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**

№ 3 (96)

Нижний Новгород 2012

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, 2012. № 3 (96). – 347 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), В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор)
Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев, О.М. Власова,
В.В. Глебов, А.М. Грошев, А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, О.С. Кошелев, В.Ф. Кулепов,
А.А. Куркин, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов, В.П. Хранилов,
С.Н. Хрунков, Е.А. Чернышов, В.М. Галкин

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2012

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

№3 (96)

Nizhni Novgorod 2012

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2012. № 3 (96). – 347 p.

The journal is issued 4 times a year

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), T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor)
Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, O.M. Vlasova,
V.V. Glebov, A.M. Groshev, A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, O.S. Koshelev, V.F. Kulepov,
A.A. Kurkin, I.O. Leushin, M.G. Mikhalenko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,
S.V. Khvatov, Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

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

*Дорогие друзья!
Уважаемые коллеги!*

Поздравляю профессорско-преподавательский коллектив, сотрудников и студентов университета с большим событием в нашей жизни – 95-летием Нижегородского государственного технического университета им.Р.Е. Алексеева.

Становление нижегородской школы инженерных кадров началось в трудных условиях первой мировой войны, революционных потрясений и разрухи. За прошедшие десятилетия скромное наследие Варшавского политехнического преумножено поколениями ученых и инженеров нашего университета.

Нам есть чем гордиться! Научные школы и коллективы в содружестве с промышленными предприятиями и научными учреждениями решают серьезные проблемы по многим приоритетным направлениям. Атомная энергетика, эффективное энергопотребление и проблемы безопасной жизнедеятельности, радиофизика, новые материалы и нанотехнологии, транспортные системы, экономика, математика, информационные технологии – далеко не полный перечень научных инновационных направлений, по которым успешно продвигаются наши исследователи.

Сегодня перед нами стоят новые задачи:

- создание и обеспечение успешного функционирования инновационных центров и малых хозяйственных предприятий по приоритетным направлениям развития науки, техники и технологий;
- динамичное развитие материально-технической базы как потенциала успешного выполнения фундаментальных и прикладных инновационных, конкурентоспособных научных исследований, направленных на создание и реализацию наукоемких разработок в области техники и технологий;
- активной интеграции науки технического университета в мировое научное пространство.

Эти амбициозные планы по превращению Нижегородского технического университета в передовой образовательно-научный центр опираются на высокий потенциал и работоспособность коллектива университета.

Уверен, что с таким коллективом университет ждут новые успехи и достижения!

С юбилеем Вас, дорогие коллеги!



Ректор НГТУ

С. М. Дмитриев

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Белоусов Е.Л., Брянцев В.Ф., Войткевич К.Л., Кейстович А.В., Сайфетдинов Х.И. Перспективное бортовое оборудование сети авиационной радиосвязи.....	11
Козлов В.А., Сорокин А.В. Методика проектирования широкополосных ферритовых Y–циркуляторов на сосредоточенных элементах.....	19
Беляев А.И., Букварёв Е.А., Половинкина А.С., Ястребов А.В. Метод быстрого вычисления арифметической свертки специального вида.....	30
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	39
Рувинская Е.А. Свойства уединенных внутренних волн в трехслойной среде: сравнение моделей.....	39
Асеева Н.В., Громов Е.М., Тютин В.В. Динамика солитонов в средах с вынужденным пространственным рассеянием Рамана и неоднородностью дисперсии и внешнего потенциала.....	51
Авербух Е.Л. Поверхностные проявления экстремальных волновых режимов поля краевых волн.....	66
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	76
Ворон А.М., Ломакин Д.В. Диагностирование сложных систем с учетом ошибок контрольно-измерительной аппаратуры.....	76
Мартынюк М.В. Оценка границ областей метамерии для набора светочувствительных приёмников.....	81
Лазарев Е.А. О применении эвристик для метода ветвей и границ решения задачи оптимизации сети передачи данных.....	91
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	97
Савин И.А. Формирование базы данных вариантов материала режущей части инструмента и метода его поверхностного упрочнения.....	97
Котельников В.И., Краснов А.О., Кожемякин В.П., Миронов А.А. Экспериментальная проверка эффективности метода термодинамической обработки на строгальном станке.....	106
Беспалов В.В. Методика экспериментальной проверки влияния погрешностей, изменяющихся по синусоидальному закону по углу φ и 2φ на погрешность зацепления.....	113
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	118
Варенцов А.В., Зяблицев Д.В., Солнцев Д.Н., Пронин А.Н., Морозкин О.Н. Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока в тепловыделяющих сборках реакторной установки плавучей атомной электростанции.....	118
Бирюков В.В., Грачев В.А., Кольцов М.В., Малышев Г.С., Раевский А.С., Щербачков В.В. Исследование электромагнитной обстановки в лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ.....	126

Бахметьев А.М., Былов И.А., Звягин Е.А., Абрамов Л. Программно-методическое обеспечение для вероятностного анализа безопасности объектов энергетики при разработке и эксплуатации.....	136
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	143
Рябов Г.К., Леонтьева В.С., Федосеев Ю.В. О механизме передвижения бесколесной виброплиты.....	143
Орлов Л.Н., Рогов П.С., Вашурин А.С., Тумасов А.В., Феокистов Н.Ф. Оценка несущей способности каркаса кузова автобуса по результатам компьютерного моделирования.....	150
Грошев А.М., Костин С.Ю., Трусков Ю.П., Коникина Г.А., Серeda П.В. Исследование тормозных свойств автобуса по результатам компьютерного моделирования и данных дорожных испытаний.....	157
Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Галкин Д.А., Зайцев А.С., Зезюлин Д.В., Макаров В.С. Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин.....	162
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	171
Нгуен Дык Тхинь. Создание флота скоростных пассажирских судов для СРВ. Выбор оптимального типа пассажирских судов для СРВ.....	171
Семенов Д.А., Зуев В.А. Влияние изменения плотности воды и льда на сопротивление судов в битых льдах.....	178
Рудницкий А.В., Рудницкий В.И. Модели процесса функционирования системы технической эксплуатации судов.....	186
Князьков В.В. Влияние размеров области распределения нагрузки и воздушной полости на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова.....	194
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	202
Лежнюк П.Д., Комар В.А. Математическое моделирование показателя качества функционирования электрической сети при оптимизации ее схемы.....	202
Седов В.И. Применение информации расчетного учёта электроэнергии для целей почасового планирования.....	209
Соснина Е.Н., Шалухо А.В. Методика выбора оптимального сочетания возобновляемых источников энергии для локальных энергосистем.....	215
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	221
Гончар А.В., Мишакин В.В. Оценка величины пластической деформации в структурно-неоднородных материалах с помощью ультразвуковых и металлографических исследований.....	221
Скуднов В.А., Редькина Н.В., Харитонов С.В. Термоциклическая закалка сплава 44НХТЮ	228
Пачурин В.Г., Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Формирование структурно-механических свойств проката стали 38ХА для получения высокопрочного крепежа.....	237
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	246
Востоков В.М., Плохов С.В., Карташов В.Р. Особенности экоаналитического контроля промышленной биопродукции.....	246

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ	254
Корнилов Д.А., Беляев О.Г. Оценка инновационного потенциала региона.....	254
Узбекова А.С. Анализ современного российского корпоративного законодательства. Проблемы и их решение.....	262 269
Ратафьев С.В. Моделирование в инновационной деятельности.....	
Иванов А.А. Activity-Based Costing как информационно-аналитическая система принятия стратегических управленческих решений.....	278
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ	288
Смирнов Ю.В. К вопросу о реализме и его интерпретациях	288
Шестакова Л.А. Психологические аспекты управления социально-техническими образовательными системами.....	297
Казакова В.И., Худяков М.В. Современная российская молодёжь как объект стратификационного анализа.....	304
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ	310
Аниковский В.В., Журавлёв С.Г. Задача Эйлера и ее приложения в небесной механике и космодинамике.....	310 319
Игошин В.А. Построение клетки и клеточного псевдориманова пространства.....	
Кондратьев Г.В. О каноническом обогащении категории в категории предпучков множеств.....	331

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Belousov Ye.L., Bryantsev V.Ph., Voytkevich K.L., Keystovich A.V., Sayphetdinov Kh.I. Advanced airborne equipment for the aviation radio communication network.....	11
Kozlov V.A., Sorokin A.V. The methods of design wideband ferrite y–circulators on lumped elements.....	19
Belyaev A.I., Bukvarev E.A., Polovinkina A.S., Yastrebov A.V. The optimization of pn-matched digital filter for high length signals.....	30
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	39
Aseeva N.V., Gromov E.M., Tyutin V.V. Soliton dynamics in media with spatial stimulated raman scattering and inhomogeneous both dispersion and additional potential.....	39
Rouvinskaya E.A. Properties of internal solitary waves in a three-layer fluid: a comparison of models.....	51
Averbukh E.L. Surface manifestations of extreme wave regimes in the field of edge waves.....	66
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	76
Voron A., Lomakin D. diagnosis of complex systems considering instrumentation failures.....	76
Martinuk M.V. Metameric area estimation for the set of the light-sensitive elements.....	81
Lazarev E.A. On the application of heuristics for branch and bound method solving data transmission network optimization problem.....	91
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	97
Savin I.A. Formation of the database options for the material of the cutting tool and its method of surface hardening.....	97
Kotelnikov V. I., Krasnov S. A., Kozhemyakin V. P., Mironov A.A. Experimental verification of the effectiveness of the method of thermodynamic treatment in the planer.....	106
Bespalov V.V. Method of experimental verification of the effect of errors that vary sinusoidally in angle φ and 2φ on the transmission error.....	113
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	118
Varentsov A.V., Zyablitsev D.V., Solntsev D.N., Khrobostov A.E., Morozkin O.N. Experimental researches of flow hydrodynamics in fuel assemblies of floating nuclear powerplant reactor.....	118
Birukov V., Grachev V., Koltsov M., Malyshev G., Raevskii A., Sherbakov V. Research of the electromagnetic environments in ninstu microwave laboratory.....	126
Bahmetev A.M., Bylov I.A., Zvyagin E.A. Abramov L. Methods and software for power utilities probabilistic safety assessment under design and operating	136

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	143
Ryabov G.K., Leontieva V.S., Fedoseev Y.V. About the movement mechanism of wheel-less vibroplate.....	143
Orlov L.N., Rogov P.S., Vashurin A.S., Tumasov A.V., Feokistov N.F. The estimation of bus structure bearing capacity on basis of simulation results.....	150
Groshev A.M., Kostin S.Y., Trusov Y.P., Konikova G.A., Sereda P.V. Researching of bus braking characteristics on the basis of simulation and road vehicle test data.....	157
Barakhtanov L.V., Belyakov V.V., Galkin D.A., Zaytsev A.S., Zezyulin D.V., Makarov V.S. Experimental and theoretical investigations of passability multi-axis wheeled vehicles.....	162
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	171
Nguyen Duc Thinh. Development of high-speed passenger vessels in Vietnam. Choose the optimal type of high-speed passenger ship for Vietnam.....	171
Semenov D.A., Zuev V.A. The influence of change water and ice density on ships resistance in broken ice.....	178
Rudnitsky A.V., Rudnitsky V.I. Model of the system technical service vessels.....	186
Knyazkov V. Effect of size distribution of load and the air cavity on the stress-strain state of ice cover.....	194
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	202
Lezhnyuk P.D., Komar V.A. Mathematical modeling quality index of the power grid in optimization of its patterns.....	202
Sedov V.I. Application of information of electric power accounting for the purpose of hourly planning.....	209
Sosnina E., Shalukho A. Technique of a choice the optimal combination of renewable energy sources in the local power supply system.....	215
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	221
Gonchar A., Mishakin V. Evaluation of plastic deformation in the structural-inhomogeneous materials using ultrasonic and metallographic research.....	221
Skudnov V.A., Redkina N.V., Charitonov S.V. Thermocyclic hardening of alloy 44HXTIO.....	228
Pachurin V.G., Filippov A.A., Pachurin G.V. Formation of structural and mechanical properties of rolled steel for high-38XA fasteners.....	237
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	246
Vostokov V.M., Plochov S., Cartashov V.R. Industrial control features ecoanalytical bio... ..	246
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	254
Kornilov D.A., Belyaev O.G. Estimation of innovative potential of the region.....	254
Uzbekova A.S. Analysis of contemporary russian corporate law. Challenges and solutions.....	262
Ratafiyev S. Modelling in the innovational activity.....	269
Ivanov A.A. Activity-based costing as information storage and analyze system for strategic managerial decision making.....	278

SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	288
Smirnov Y. V. The notion of realism and its interpretation.....	288
Shestakova L.A. Psychological aspects of management social technical educational systems.....	297
Kazakhova V.I., Khydyakov M.V. Modern russian youth as stratification research object.....	304
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL AND SOCIAL SCIENCES.....	310
Anikovskiy V.V., Zuravlev S.G. Euler's problem and its applications in celestial mechanics and cosmodynamics	310
Igoshin V.A. Construction of the cage and cellular pseudoriemannian space.....	319
Kondratiev G.V. Canonical Enriched categories in the category of presheaves of sets	331

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.391.27

Е.Л. Белоусов, В.Ф. Брянцев, К.Л. Войткевич, А.В. Кейстович, Х.И. Сайфетдинов

ПЕРСПЕКТИВНОЕ БОРТОВОЕ ОБОРУДОВАНИЕ СЕТИ АВИАЦИОННОЙ РАДИОСВЯЗИ

ОАО «Научно-производственное предприятие «Полет»

Рассмотрены вопросы построения бортового оборудования авиационной радиосвязи по технологии SDR - «программируемое радио». Приведены структурные схемы бортового и наземного комплексов, используемых для обмена данными между наземными службами и воздушными судами гражданской авиации.

Ключевые слова: радиостанция, авиационная радиосвязь, программируемое радио, технология SDR, комплексы связи.

Средства сетевого взаимодействия в системе авиационной электросвязи могут быть представлены на основе многоуровневого подхода [1, 2]. При этом все множество модулей разбивается на уровни, образующие иерархию. Преимуществом многоуровневого подхода является возможность модификации отдельных модулей без изменения остальной части системы. Модули нижнего уровня могут, например, обеспечивать надежную передачу сигналов между двумя соседними узлами. Модули более высокого уровня организуют транспортировку сообщений в пределах всей сети, используя средства нижележащих уровней. На верхнем уровне функционируют модули, обеспечивающие пользователям доступ к различным службам.

В процессе обмена сообщениями между двумя участниками необходимо организовать согласованную работу соответствующих уровней иерархии и принять различные соглашения. Например, оба участника должны согласовать уровни и форму электрических сигналов, установить методы контроля достоверности и т. д. Соглашения должны быть приняты для всех уровней: от самого низкого - уровня передачи единичных элементов – до самого высокого, реализующего сервис для пользователей сети. Процедуру взаимодействия этих двух узлов можно описать в виде набора правил взаимодействия соответствующих уровней обеих участвующих сторон. Формализованные правила, определяющие последовательность и формат сообщений, которыми обмениваются сетевые компоненты одноименных уровней разных узлов (систем), называются *протоколами* [3]. Иерархически организованный набор протоколов, достаточный для организации взаимодействия узлов в сети, называется *стеком коммуникационных протоколов*. Коммуникационные протоколы могут быть реализованы аппаратно и программно. Протоколы нижних уровней реализуются комбинацией программных и аппаратных средств, а протоколы верхних уровней, как правило, чисто программными средствами.

В начале 80-х годов прошлого столетия ряд международных организаций по стандартизации ISO, ITU-T и другие разработали модель взаимодействия открытых систем (Open System Interconnection, OSI). Эта модель определяет различные уровни взаимодействия систем, присваивает им стандартные имена и определяет функции каждого уровня. В рамках данной модели под открытостью понимается готовность сетевых устройств взаимодейство-

вать между собой с использованием стандартных правил. Примером открытой системы является международная сеть Internet. Архитектура, протоколы обмена и форматы сообщений должны быть основаны на концепции Международной организации по стандартизации (ISO), известной как эталонная модель взаимодействия открытых систем (OSI), принятой для обеспечения услуг по телекоммуникации и обработке данных. Модель OSI была разработана непосредственно для организации передачи данных между конечными системами, которым ничего не известно о характеристиках системы передачи или о характеристиках каналов, связывающих их.

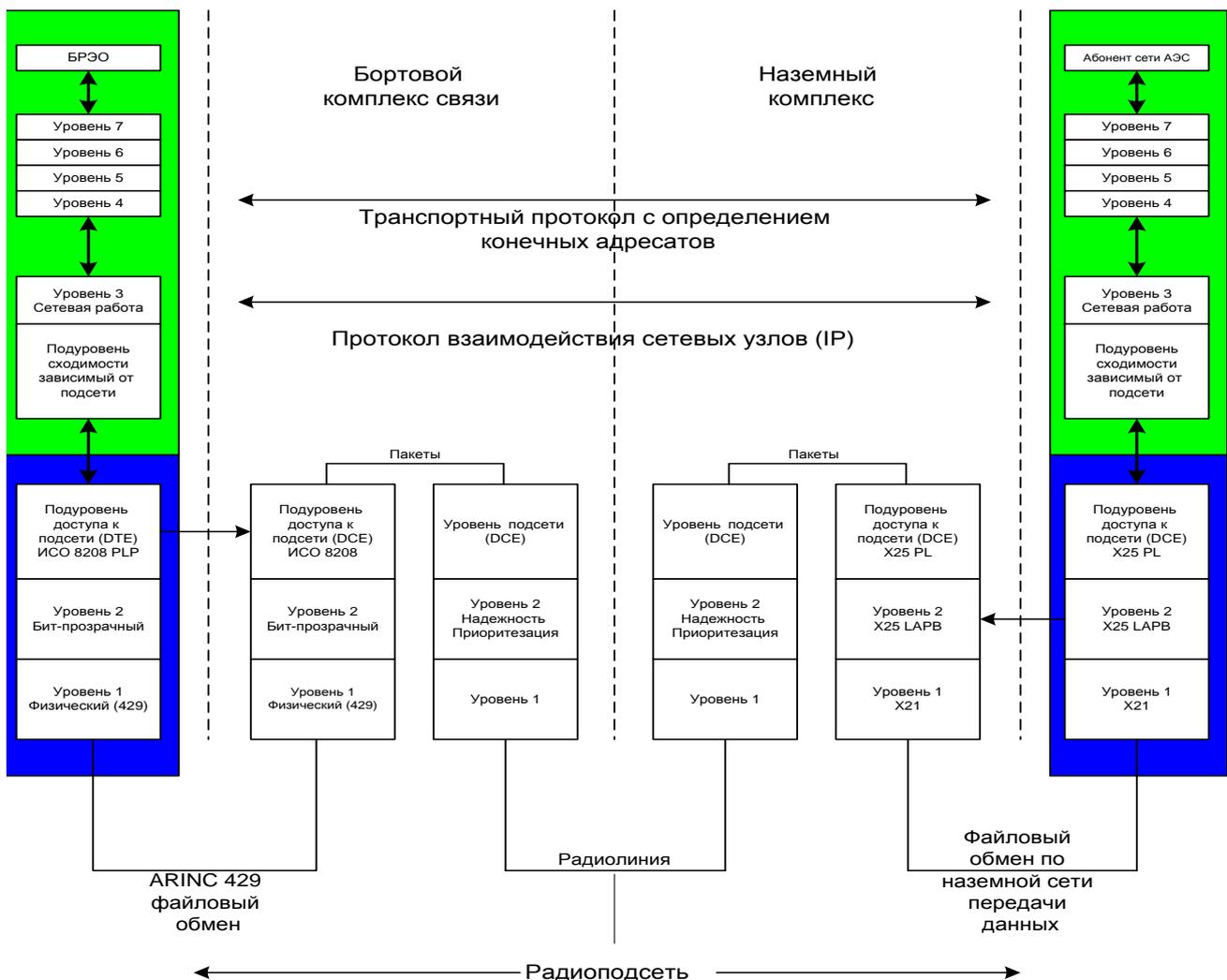


Рис. 1. Модель одной ветви радиосети передачи данных в системе ОрВД

Модель OSI использует метод разделения на уровни, который позволяет обеспечить логическую сбалансированность между структурой системы и протоколами. В модели OSI используются семь уровней, обеспечивающих выполнение функций, необходимых для перехода от прикладного процесса пользователя к передающей среде, например, к МВ-радиосреде. В результате проведенных исследований появляется семиуровневая архитектура эталонной модели взаимодействия открытых систем (ЭМВОС). Уровни модели OSI: 1 - физический уровень; 2 - канальный; 3 - сетевой; 4 - транспортный; 5 - сеансовый; 6 - представительный; 7 – прикладной. Рассмотрим назначение указанных уровней на примере системы радиосвязи с воздушными судами (ВС). Модель одной ветви радиосети передачи данных между объектами системы управления воздушным движением приведена на рис. 1.

Структурная схема системы радиосвязи с воздушными судами, в которой программируемая радиостанция, реализованная в соответствии с требованиями эталонной модели взаимодействия открытых систем, входит в состав бортового комплекса связи, представлена на рис. 2 введены обозначения [4, 5].

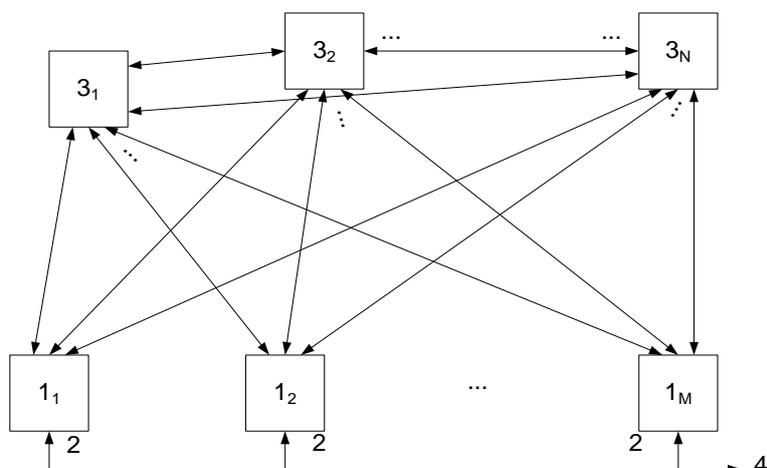


Рис. 2. Структурная схема системы радиосвязи с воздушными судами:

1 - наземный комплекс связи (НК); 2 - вход/выход НК для наземной сети передачи данных; 3 - воздушное судно, оснащенное новым бортовым комплексом связи; 4 - вход/выход наземной сети передачи данных (условно показана в виде линии)

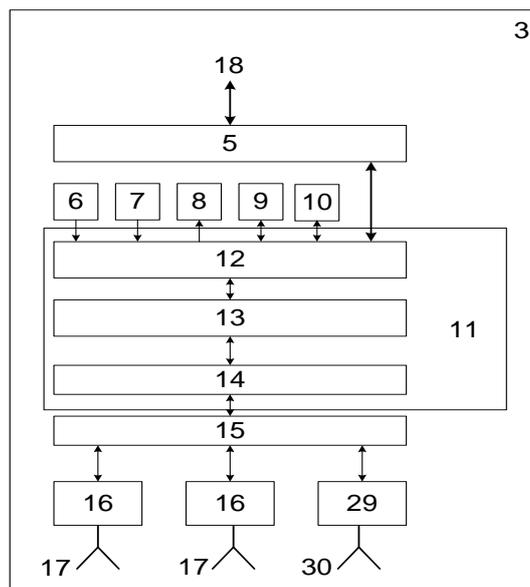


Рис. 3. Структурная схема бортового комплекса связи системы радиосвязи с ВС:

5 – бортовой вычислитель; 6 – бортовые датчики; 7 – бортовой приемник сигналов глобальной навигационной спутниковой системы ГЛОНАСС/GPS с антенной; 8 – блок регистрации данных; 9 – бортовой анализатор типа принимаемых сообщений; 10 – бортовой формирователь типа ретранслируемых сообщений; 11 – вычислительный модуль связи (ВМС); 12 – модуль интерфейсов с бортовым оборудованием (МИ); 13 – модуль маршрутизации (ММ); 14 – модуль канального уровня (МКУ); 15 – модуль физического уровня (МФУ) (цифровой обработки сигналов); 16 – бортовой широкодиапазонный радиочастотный модуль МВ-ДМВ диапазона (ШДМ РМ); 17 – бортовое широкодиапазонное антенно-фидерное устройство МВ-ДМВ диапазона (ШДМ АФУ); 18 – двунаправленная шина системы управления ВС; 29 – бортовой широкодиапазонный радиочастотный модуль ДМКВ диапазона (ШДК РМ); 30 – бортовое широкодиапазонное антенно-фидерное устройство ДМКВ диапазона (ШДК АФУ)

Структурная схема бортового оборудования воздушного судна, соответствующая эталонной модели взаимодействия открытых систем (OSI), принятой для обеспечения услуг по телекоммуникации и обработке данных, приведена на рис. 3.

Устройства 16 и 17 образуют модуль ближней связи, а устройства 29 и 30 - модуль дальней связи. Цифровая обработка сигналов обеспечивается с помощью аппаратно-программных модулей и узлов 9-15.

Структурная схема наземного комплекса связи системы радиосвязи с ВС представлена на рис. 4.

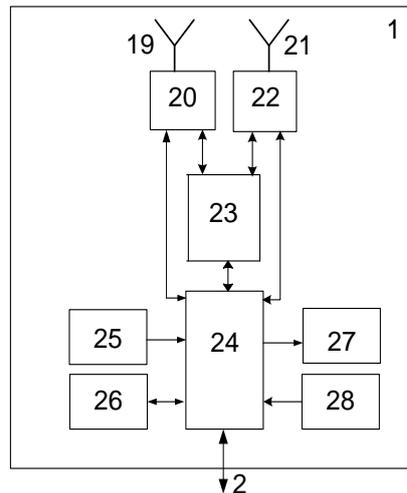


Рис. 4. Структурная схема наземного комплекса связи системы радиосвязи с ВС:

2 - вход/выход НК для наземной сети передачи данных; 19 – наземная антенна МВ диапазона; 20 – наземная радиостанция МВ диапазона; 21 – наземная антенна ДКМВ диапазона; 22 – наземная радиостанция ДКМВ диапазона; 23 – наземная аппаратура передачи данных; 24 – вычислитель автоматизированного рабочего места (АРМ); 25 – наземный приемник сигналов глобальных навигационных спутниковых систем с антенной; 26 – формирователь типа ретранслируемых сообщений; 27 – монитор АРМ; 28 – пульт управления АРМ

При передаче пакета сообщения в диапазоне ВЧ от конечных бортовых систем ВС к наземным потребителям пакетное сообщение, содержащее адрес получателя и адрес отправителя (адрес борта), формируют в бортовых конечных системах ВС (узлы 5, 18) и передают через модуль интерфейса в бортовой модуль маршрутизатора, где его упаковывают в виде пакета ISO 8208 и затем передают в модуль канального уровня, где его преобразуют в пакет канального уровня сети передачи данных, содержащий проверочные последовательности, вычисленные с помощью избыточного циклического кода (CRC).

Полученные сообщения передаются в модуль физического уровня, где осуществляют операции:

- сверточное кодирование данных для прямой коррекции ошибок;
- перемежение данных для борьбы с пакетированием ошибок из-за замираний и импульсных помех;
- преобразование последовательности из трёх, двух или одного бита в значения фазы сигнала поднесущей или ее частоты;
- скремблирование данных для выравнивания спектра передаваемого сигнала;
- формирование ключевой синхронизирующей последовательности и преамбулы, содержащей известную последовательность для обучения адаптивного демодулятора, и информацию о скорости передачи данных и глубине перемежителя;
- формирование коротких обучающих последовательностей, которые вставляют в поток передаваемых данных пользователя для реализации адаптивных методов приёма сообщения;

- формирование заданной формы огибающей каждого символа для обеспечения заданной спектральной маски излучаемого сигнала;
- формирование радиосигнала с верхней боковой полосой с подавленной несущей с соответствующим классом излучения.

Сформированный для передачи сигнал с выхода модуля физического уровня подают на вход широкодиапазонного радиочастотного модуля, где его усиливают до требуемого уровня мощности, подают на ШДК АФУ и по радиоканалу передают на наземный комплекс, на котором зарегистрировано воздушное судно. На НК радиосигнал с антенны подают на наземную радиостанцию, работающую в симплексном режиме, а с ее выхода - на вход аппаратуры передачи данных, где его демодулируют, дескремблируют, деперемежают, декодируют с прямой коррекцией ошибок, проверяют на наличие не исправленных декодером ошибок. В случае отсутствия ошибок сообщение упаковывают в пакет ISO 8208 и выдают на вход вычислителя АРМ, где формируется сообщение, предназначенное для передачи по протоколу X.25 по наземной сети передачи данных потребителям информации. При передаче данных от потребителя информации по протоколу X.25 по наземной сети передачи данных в обратном направлении через НК к ВС в начале сообщение обрабатывают в вычислителе АРМ наземного комплекса, где из него формируют пакет ISO 8208, необходимый для передачи по линии передачи данных «воздух-земля». С выхода вычислителя АРМ сообщение передается в аппаратуру передачи данных, где оно проходит обработку в соответствии с процедурами, рассмотренными выше в бортовом комплексе связи.

На ВС радиосигнал через соответствующее антенно-фидерное устройство поступает на ШДК РМ. Затем сообщение подают на вход МФУ, где его демодулируют, дескремблируют, деперемежают, декодируют и выдают в МКУ, в котором его проверяют на наличие не исправленных декодером ошибок, и в случае отсутствия ошибок упаковывают в пакет ISO 8208 и выдают на вход ММ для преобразования в пакет, предназначенный для передачи через МИ к бортовым пользователям (блокам 5, 8, 9 или 18).

Каждое из воздушных судов может выходить на связь на нескольких рабочих частотах, известных всем участникам движения. Транспортным системам, связанным с перевозкой пассажиров и стратегических грузов, международным регламентом связи отводится определённый набор рабочих частот, которые распределяются между НК. Списки выделенных частот меняются в зависимости от времени года, а рабочая частота для каждого НК из списка выделенных частот активизируется на каждый час или два часа времени суток. При движении ВС выходит на связь, выбирая для связи тот НК, условия распространения радиоволн для связи с которым в данный момент времени являются оптимальными. Составленный таким образом канал связи между ВС и наземным потребителем (источником) информации, как правило, будет включать бортовую и наземную сети передачи данных, связанные между собой радиолинией диапазона ВЧ. Как только качество канала связи деградирует ниже допустимого уровня, на борту с помощью модулей 14 и 15 ВС выбирают новую оптимальную рабочую частоту на основании анализа условий распространения радиоволн и новый НК, соответствующий ей. Таким образом, обеспечивают высокую (порядка 0,999) надежность связи при обмене данными с ВС, находящимися от НК на расстояниях от нескольких сотен до 4-6 тыс. км и более.

Система радиосвязи с ВС работает в автоматическом режиме без вмешательства оператора на выбранных частотах из списка частот, назначенного при планировании связи. Высший уровень конфигурируемости, реализуемый в оборудовании воздушного судна - это полностью гибкие виды модуляции, протоколы уровня линии, сети и пользовательские функции, возможность изменения ширины полосы сигнала и центральной частоты по программе в широких пределах [4, 5]. Благодаря такой системе, появляется возможность создания (с помощью бортового вычислителя и соответствующих модулей 15, 14 с широкодиапазонным радиочастотным модулем) широкодиапазонной программируемой радиостанции нового типа, работающей совместно с широкодиапазонным АФУ в диапазонах ВЧ и ОВЧ.

Модуль физического уровня ВС содержит высокоскоростные с большим динамическим диапазоном аналогово-цифровые и цифро-аналоговые преобразователи (АЦП и ЦАП) и базируется на высокопроизводительных сигнальных процессорах, которые в цифровом виде реализуют большинство функций физического уровня, например, операции частотного преобразования, фильтрации, синтеза частот. Он предназначен для формирования и обработки радиосигналов на физическом уровне (кодирования/декодирования, перемежения/деперемежения, скремблирования/дескремблирования данных, модуляции/демодуляции, реализации адаптивных методов передачи и приема сигналов, полосовой фильтрации, преобразования частоты и т.п.). Модуль канального уровня обеспечивает протоколы выбора частот связи, составления линии связи, обмена данными уровня линии и доступа к подсети «воздух-земля», обмена с модулем маршрутизации ВС, обеспечения отказоустойчивого режима работы и другие процедуры. Модуль маршрутизации осуществляет распределение сообщений «воздух-земля», принятых по МВ и ДКМВ каналам в виде пакетов ISO 8208 конечным потребителям на борту и в обратном направлении. Модуль интерфейсов обеспечивает все необходимые интерфейсы с бортовым оборудованием, например, по протоколам ARINC 429, ARINC 664, ARINC 646 и др.

ШДМ АФУ, ШДК АФУ и модули 16, 15, 14 интегрируют функции радиостанций диапазонов ОБЧ и ВЧ, аппаратуры передачи данных (кодека, модема) с программной реализацией режимов работы аппаратуры (видов модуляции, кодирования) с возможностью введения новых режимов работы модулей программным способом через шину 18, бортовой вычислитель и соответствующие последовательно соединенные модули 12 и 13, входящие в вычислительный модуль 11 связи. Широкодиапазонные радиочастотные модули содержат радиочастотное аналоговое оборудование. Вычислительный модуль связи, входящий в состав ВС, обеспечивает функциональное взаимодействие с бортовыми устройствами 5, 7, 8, 9, 10 и 15 и датчиками событий.

Модуль канального уровня предназначен для управления выбором частотных каналов, установлением линий связи и регистрацией на НК, для упаковки, распаковки сообщений, управления доступом к каналу, дополнительного кодирования/декодирования избыточным циклическим кодом CRC для обнаружения ошибок, не исправленных на физическом уровне, автоматического запроса повторения, криптозащиты на канальном уровне, управления изоляцией неисправностей и восстановлением работоспособности за счет реконфигурации бортовой системы и т.п.

Модуль маршрутизатора взаимодействует с модулем канального уровня на уровне доступа к подсети по протоколу ISO 8208 (в среде ATN) в соответствии с заданными режимами передачи данных.

Модуль интерфейсов обеспечивает взаимодействие вычислительного модуля связи с бортовой авионикой (устройствами 5, 6, 7, 8, 9, 10) по разным протоколам и стыкам, например, с помощью дискретного сигнала в соответствии с ARINC 429, ARINC 664, ARINC 646 или с помощью разовых команд и через бортовой вычислитель, двунаправленную шину 18 с системой управления ВС.

Модуль физического уровня обеспечивает параллельную обработку в реальном масштабе времени сигналов всех b широкодиапазонных радиочастотных модулей, необходимых совместно с модулями 17 для организации линий передачи данных в диапазонах ОБЧ и ВЧ. Причем при неисправности одного из модулей 16, соединенного с бортовым широкодиапазонным антенно-фидерным устройством, программно подключается взамен вышедшего из строя модуля другой исправный модуль 16 с помощью модуля канального уровня, выполненного, например, на универсальном вычислителе. В этом случае все функции обработки и формирования сигнала соответствующего радиоканала связи, обработки данных и закрытия информации (при необходимости) будут выполнены программным способом в виде законченных программных модулей. Взаимодействие программных модулей будет осуществляться по заранее определенным правилам взаимодействия (протоколам и процедурам взаимо-

действия, входным и выходным данным), что обеспечит их оперативное изменение (заменой программного кода) в процессе полета. Это дает возможность формирования и обработки любого сигнала и данных, закрытия информации, интерфейс с внешним оборудованием по различным алгоритмам и стандартам, даже в том случае, когда ВС находится на границах двух зон ответственности автоматизированных систем управления воздушным движением, в которых для обмена данными между НК и ВС используются различные режимы линии передачи данных, например, VDL-2 и VDL-4. Таким образом, на уровне каналов связи (физический, канальный уровни, включая криптозащиту канала доступа к сети) модуль 16, соединенный с бортовым ШДМ АФУ или ШДК АФУ, совместно с модулем физического уровня и модулем канального уровня обеспечивают совместимость с различными типами линий передачи данных «воздух-земля». Кроме этого, модуль 15 осуществляет установку частоты передачи, ширину полосы, и т.д.

Таким образом, перспективное бортовое оборудование ВС выполняет функции каналообразования (комплекта радиостанций), аппаратуры передачи данных (кодека, модема, контроллера протоколов канального уровня) с программной реализацией режимов работы аппаратуры (видов модуляции, кодирования, протоколов обмена) с возможностью введения новых режимов работы программным способом через внешний интерфейс (шину 18). Бортовое оборудование ВС представляет собой конструктивное и функциональное техническое решение с максимальным использованием цифровой обработки сигналов в отдельных устройствах, выполняющих функции фильтрации, частотного преобразования, усиления, формирования и обработки сигналов (кодирования, декодирования, модуляции, демодуляции, выбора частоты и т.д.), управления протоколами обмена данными «воздух-земля», менеджмента связью (маршрутизации сообщений), обмена с авионикой борта, слежения за технической исправностью не только для обнаружения отказов, но и для изоляции отказов и реконфигурации аппаратуры для обеспечения высокой аппаратурной надежности. Эта способность позволяет обеспечить близкую к единице вероятность работы оборудования без отказов во время полета, даже при наличии неисправностей некоторых модулей, без внеурочного обслуживания (только регламентное обслуживание по расписанию), упростить замену и ремонт отказавших модулей. Резервирование ресурсов обеспечивается как на уровне электронных компонентов, так и на уровне модулей.

Система радиосвязи, в которой бортовая аппаратура создана по принципу «программируемое радио», имеет следующие преимущества:

- повышается аппаратурная надежность бортового оборудования за счет автоматического резервирования и реконфигурации, что особенно важно во время полета;
- упрощается эксплуатация бортового комплекса связи ВС - остается только регламентное обслуживание по событию с заменой и ремонтом отказавших модулей;
- повышается надежность связи между НК и ВС, находящимся на границах двух зон ответственности автоматизированных систем управления воздушным движением, в которых для обмена данными между НК и ВС используются различные режимы линии передачи данных, и разные приложения CNS/ATM. Это обеспечивается за счет автоматического выполнения процедур поддержки связи, идентификации наземной станции, начальной установки линии, модификации параметров линии, процедур «хэндофф», автонастройки и программного выбора требуемого режима работы бортового комплекса. Например, в одной зоне приложение CPDLC реализуется наземным комплексом в режиме передачи данных ACARS сигналами AM-MSK со скоростью 2400 бит/с, в другой зоне это же приложение реализуется в режиме передачи данных VDL-2 сигналами D8PSK со скоростью 31500 бит/с, а в третьей зоне - в режиме передачи данных VDL-4 сигналами GFSK со скоростью 19200 бит/с и т.п.;
- повышаются дальность, надежность, оперативность, достоверность ДКМВ связи, эффективность использования частотного спектра за счет использования адаптивных методов приема, адаптации по частоте, скорости передачи данных, видам модуляции и кодирования, протокола множественного доступа к каналу с частотным и временным разделением;

- алгоритмы обработки сигналов с датчиков и других периферийных устройств остаются прежними, что снижает вероятность ошибок при программировании вычислительного модуля связи;
- предложенной структурой могут быть решены задачи перехода от разработок бортовых комплексов связи, изменение характеристик которых определяется изменением аппаратной части, к устройствам, легко модернизируемым на базе программного обеспечения при неизменной аппаратной части. Достоинства такой структуры очевидны:
 - увеличивается срок службы - жизненный цикл оборудования в условиях непрерывного совершенствования протоколов обмена данными «воздух-земля»;
 - сокращается число и номенклатура запасного имущества и принадлежностей из-за использования однотипных узлов в бортовом оборудовании;
 - упрощается процесс эксплуатации - замена неисправного радиочастотного модуля в полёте осуществляется автоматически однотипным модулем для всех диапазонов с соответствующим введенным программным обеспечением;
 - уменьшается стоимость модернизации оборудования за счет коррекции только программного обеспечения.

Библиографический список

1. Кузьмин, Б.И. Авиационная цифровая электросвязь в условиях реализации "Концепции ИКАО-ИАТА CNS/АТМ" в Российской Федерации: монография / Б.И. Кузьмин; под ред. Е.Л. Белоусова. – СПб. – Н. Новгород: Агентство ВиТ-принт, 2007. – 496 с.
2. Кузьмин, Б.И. Сети и системы авиационной цифровой электросвязи: учеб. пособие / Б.И. Кузьмин; под ред. В.А. Сарычева. Ч. 111. Авиационная электросвязь в условиях реализации концепция ИКАО – ИАТА CNS/АТМ в Российской Федерации. – СПб.: Агентство ВиТ-принт, 2003. – 480 с.
3. Цифровые системы передачи / В.В. Крухмалев [и др.]. – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 350 с.
4. Авиационная радиосвязь: справочник / П.В. Олянюк [и др.]; под ред. П.В. Олянюка. – М.: Транспорт, 1990. – 208 с.
5. Пат. 68 211 U1 РФ (полезная модель), МПК² Н 04В 7/26. Система радиосвязи с подвижными объектами / А.В. Кейстович, Т.И. Горячева. №2007118071/22; заявл. 14.05.2007; опубл. 10.11.2007, Бюл. № 31. – 1 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2012*

Ye.L. Belousov, V.Ph. Bryantsev, K.L. Voytkovich, A.V. Keystovich, Kh.I. Sayphetdinov

ADVANCED AIRBORNE EQUIPMENT FOR THE AVIATION RADIO COMMUNICATION NETWORK

Joint Stock Company “POLYOT Research & Production Company”

Purpose: Assessing the possibility of aviation radio communication equipment development on the basis of SDR technology.

Design/methodology/approach: The article deals with network interaction in the airborne system of aviation telecommunications on the basis of multilevel OSI approach.

Findings: Operation of multichannel radio communication equipment on the basis of SDR technology is presented in detail.

Research limitations/implications: Aviation radio communication networks.

Originality/value: Use of new technology improves communication reliability between ground complexes and aircraft, which are located at the boundary of two areas of responsibility of ATC receive-transmit centers using different data link modes.

Key words: radio, aircraft radio communication, software-defined radio, SDR technology, communication complexes.

УДК 621.372.832.8

В.А. Козлов, А.В. Сорокин

**МЕТОДИКА ПРОЕКТИРОВАНИЯ ШИРОКОПОЛОСНЫХ ФЕРРИТОВЫХ
Y-ЦИРКУЛЯТОРОВ НА СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ЭЛЕМЕНТАХ**

ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова»

Показана возможность создания широкополосных СВЧ ферритовых циркуляторов на сосредоточенных элементах с расширенной полосой рабочих частот, которая достигается за счёт оптимизированного режима работы. Предложен метод расчёта таких циркуляторов.

Ключевые слова: Y-циркулятор, собственное значение матрицы рассеяния, согласующая цепь, сосредоточенный элемент.

Введение

Циркуляторы и вентили с Y-сочленением в виде переплетенных индуктивных рамок в течение многих лет привлекают внимание разработчиков СВЧ приборов. Этот тип невзаимных устройств имеет существенные преимущества перед другими ферритовыми устройствами аналогичного назначения как по возможности достижения минимальных вносимых потерь и расширения полосы рабочих частот, так и по минимизации габаритов и массы [1]. Практика показывает, что такие устройства могут быть реализованы в приемлемых габаритах в длинноволновой части дециметрового диапазона длин волн и даже в коротковолновой части метрового диапазона [2].

Возможности совершенствования технических характеристик невзаимных устройств с переплетенными рамками посредством поиска новых схемных решений весьма ограничены, поскольку фактически любые изменения эквивалентной схемы циркуляторов и вентилях этого типа сводятся к введению дополнительных реактивных элементов либо между общей точкой индуктивных рамок и корпусом, либо в каждое из трех плеч. Таким образом, создание новых невзаимных ферритовых устройств с улучшенными характеристиками сводится к выбору оптимального режима их работы и расчету параметров соответствующих реактивных элементов, при использовании которых требуемый режим возможно реализовать. В предыдущих работах [3, 4] авторами настоящей статьи обоснована возможность реализации двухчастотных режимов работы циркуляторов с переплетенными рамками (в том числе и с изменением направления циркуляции при изменении частоты [4]) и предложена методика расчета параметров реактивных элементов при проектировании таких циркуляторов. В данной работе предлагается методика проектирования широкополосных циркуляторов и вентилях, основанная на переходе от двухчастотных устройств к широкополосным за счет оптимизации режима работы и соответствующего выбора реактивностей полоснорасширяющих цепей.

1. Качественная модель широкополосного Y-циркулятора

Будем полагать, что Y-циркулятор является широкополосным, если в заданной полосе частот от $\omega_1 - \Delta\omega$ до $\omega_2 + \Delta\omega$ ($\Delta\omega \ll \omega_1, \omega_2$) численные значения его характеристик ограничены с одной стороны. Например, вносимые потери должны быть не более заданного уровня или обратные потери должны быть не менее заданного уровня. При таком определении широкополосного циркулятора логично предполагать, что построение его модели возможно на основе использования модели двухчастотного циркулятора с рабочими частотами ω_1 и ω_2 , которую следует дополнить условием ограничения величины отклонения условий циркуляции от идеальных на всех частотах, лежащих в интервале от ω_1 до ω_2 . То-

гда и численные значения характеристик циркулятора в этой полосе частот будут ограничены с одной стороны.

Решение задачи построения модели двухчастотного циркулятора в общем виде приведено в работе [3]. Двухчастотный режим работы осуществляется за счёт включения между общей точкой индуктивных рамок и корпусом реактивного сопротивления Z_c , состоящего из соединённых параллельно последовательного и параллельного контуров. При включении реактивных согласующих цепей Z_1 в каждое плечо циркулятора возможно осуществление идеальных условий циркуляции на третьей частоте ω_3 , лежащей в интервале между ω_1 и ω_2 [5, 6]. Это не означает автоматического обеспечения широкополосности. Однако, можно полагать, что при соответствующем выбое величины магнитного поля и параметров цепей Z_1 и Z_c циркулятор может быть широкополосным.

Рассмотрим эквивалентную схему широкополосного «трёхчастотного» Y-циркулятора с переплетёнными рамками, представленную на рис. 1 (L_0 – индуктивность рамок, C – согласующая ёмкость, включённая параллельно L_0).

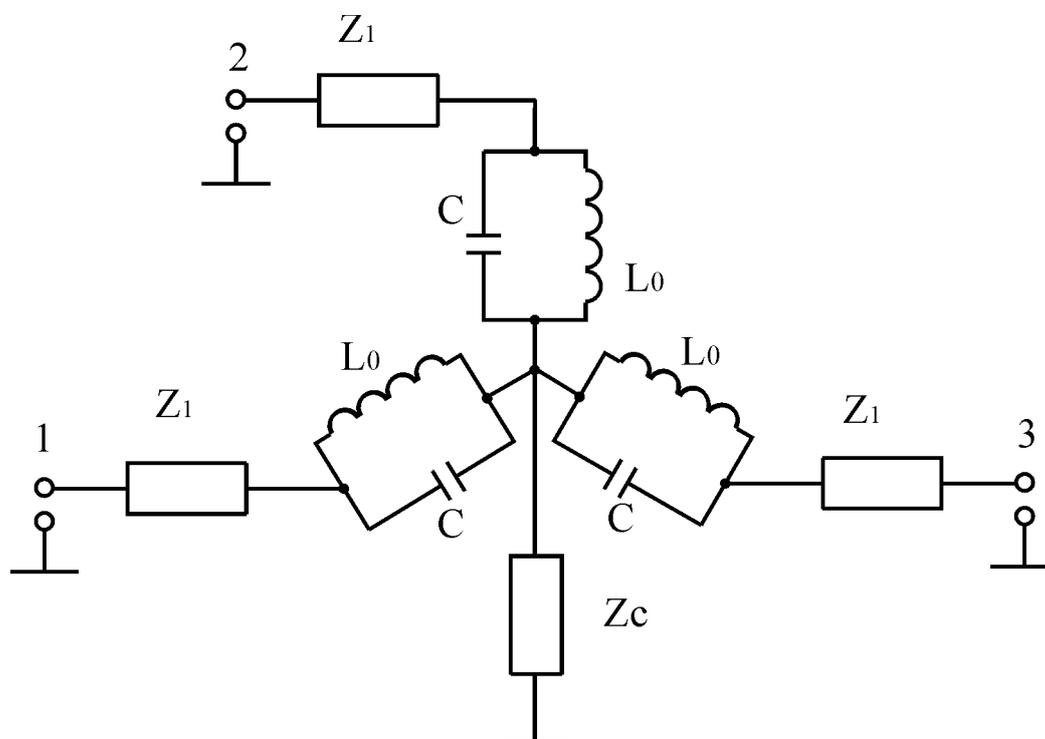


Рис. 1. Эквивалентная схема широкополосного «трёхчастотного» Y-циркулятора

На рис. 1 согласующая цепь, позволяющая получить «двухчастотную» характеристику циркулятора, обозначена Z_c , а согласующая цепь в каждом плече, дающая возможность получения «трёхчастотной» характеристики устройства, обозначена Z_1 .

При построении модели будем пренебрегать диссипативными потерями в феррите и согласующих реактивных элементах.

Для произвольного идеального Y-циркулятора собственные значения матрицы импеданса Y-сочленения $Z_{0,+/-}$ связаны с собственными значениями его матрицы рассеяния $S_{0,+/-}$ [7] соотношением (1)

$$Z_{0,+/-} = j\rho_0 \frac{1 + S_{0,+/-}}{1 - S_{0,+/-}} = -j\rho_0 \operatorname{ctg} \left(\frac{\varphi}{2} + \frac{2\pi n}{3} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – волновое сопротивление подводящих линий передачи, φ – фаза коэффициента прохождения сигнала со входа на выход; $n=0,+/-1$. Отметим, что $Z_{0,+/-}$, а также Z_c , Z_1 и все импе-

дансы, о которых говорится в тексте статьи, чисто мнимые. Поэтому далее на графиках рис. 2 и рис. 3 будут представлены именно $JmZ_{0,+/-}$.

В соответствии с (1), зависимости мнимой части собственных значений матрицы импеданса идеального циркулятора $Z_{0,+/-}$ от φ в диапазоне $0 \leq \varphi \leq 2\pi$ имеют вид, приведенный на рис. 2.

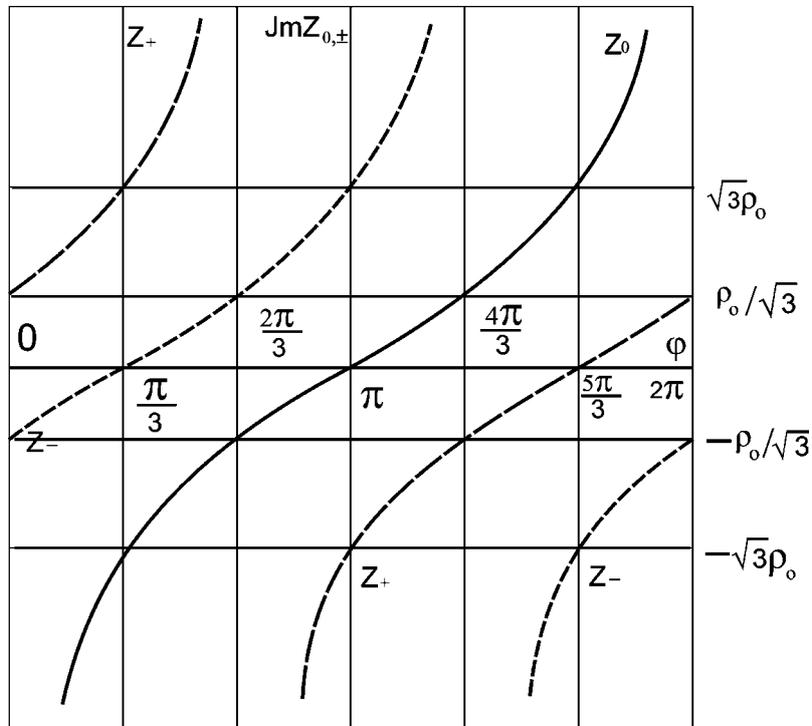


Рис. 2. Зависимость мнимой части собственных значений $Z_{0,+/-}$ матрицы импеданса Z от фазы коэффициента прохождения φ

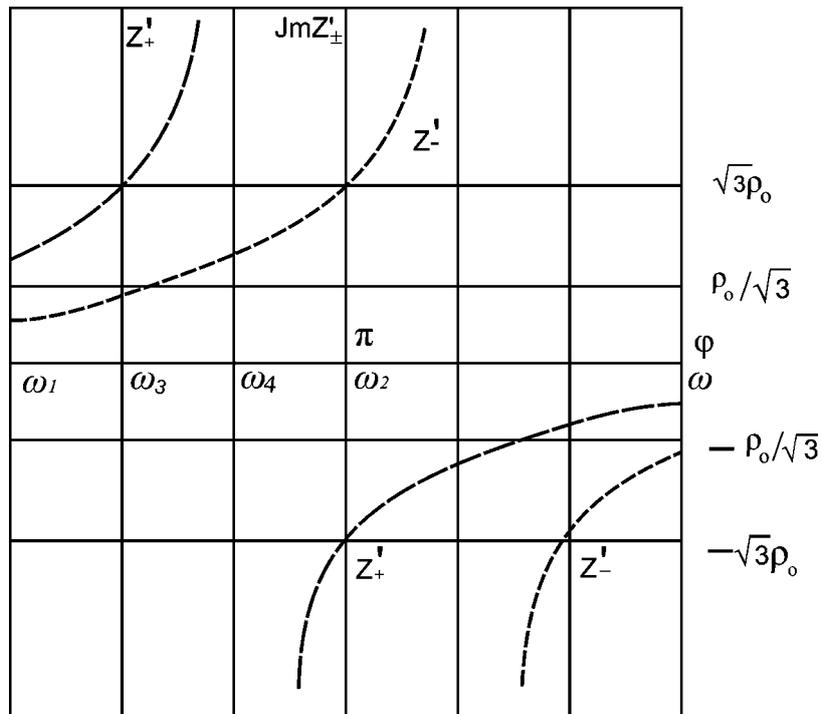


Рис. 3. Зависимость мнимой части собственных значений $Z'_{+/-}$ матрицы импеданса Z узкополосного циркулятора от частоты ω

Ограничимся рассмотрением зарезонансного режима работы, поскольку он наиболее интересен в плане практического применения из-за отсутствия нелинейных эффектов при высоком уровне мощности сигналов в феррите.

Узкополосный циркулятор, из которого получена эквивалентная электрическая схема «трёхчастотного» циркулятора (рис. 1) путём включения дополнительных цепей Z_1 и Z_c , работает при $\varphi = \pi$. Это объясняется следующими причинами: при $\varphi = \pi$ схема узкополосного циркулятора имеет минимум элементов по сравнению с другими схемами узкополосных циркуляторов при $\varphi \neq \pi$, так как при $\varphi \neq \pi$ собственное значение матрицы импеданса $Z_0 \neq 0$. Следовательно, для реализации требуемого значения Z_0 необходимо введение дополнительных элементов. Зависимости мнимой части собственных значений матрицы импеданса узкополосного циркулятора $Z'_{+/-}$ от ω имеют вид [7], представленный на рис. 3 ($\varphi = \pi$ соответствует частоте ω_2). Можно также использовать как основу построения схемы широкополосного циркулятора схему узкополосного циркулятора, работающего при $\varphi = 2\pi$, но тогда для обеспечения возможности работы в широкополосном варианте в качестве общей цепи Z_c для получения возможности реализации любого значения импеданса общей цепи необходимо будет использовать последовательное включение параллельного и последовательного контуров, что вызывает значительные конструктивные сложности. При работе узкополосного циркулятора с $\varphi = \pi$, общая цепь широкополосного циркулятора Z_c будет иметь вид параллельно включённых последовательного и параллельного контуров, что более удобно по сравнению с рассмотренным выше вариантом.

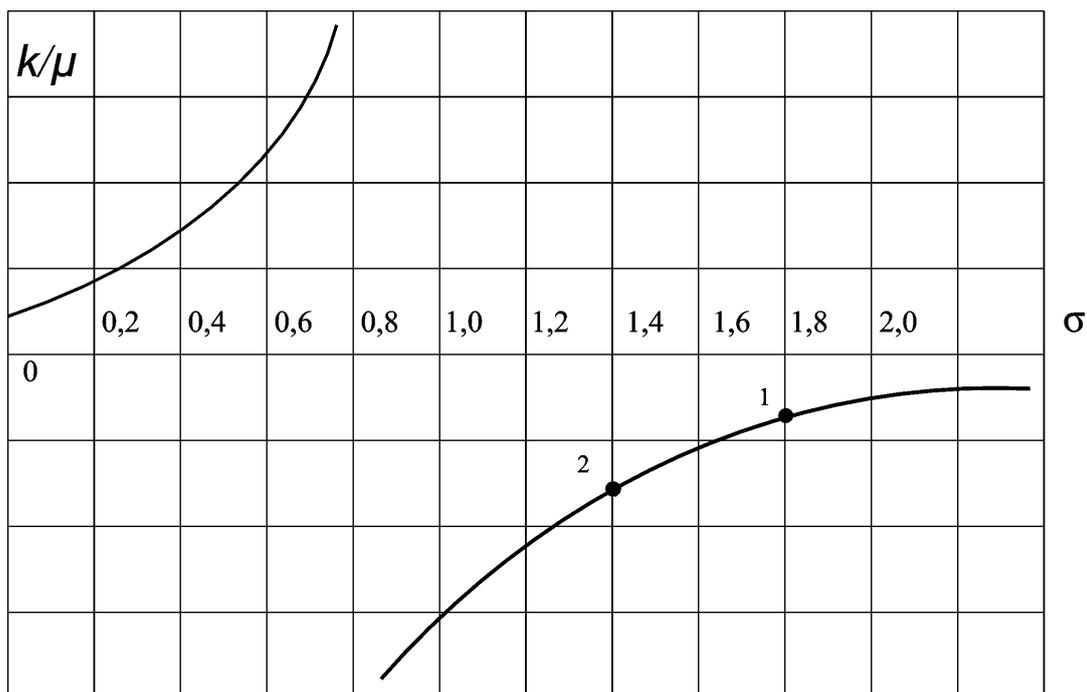


Рис. 4. Зависимость K/μ от σ

Согласно [7], условия циркуляции для узкополосных циркуляторов с $\varphi = \pi$ и для $\varphi = 2\pi$ можно представить выражениями (2) и (3) соответственно:

$$\omega L = -\sqrt{3}\rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1, \quad (2)$$

$$\omega L = -\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0 \frac{\kappa}{\mu}, \quad \omega^2 LC = 1, \quad (3)$$

где $L = \frac{3}{2} L_0 \mu_{\perp}$, $\mu_{\perp} = \frac{\mu^2 - \kappa^2}{\mu}$, κ и μ – недиагональная и диагональная составляющие тензора магнитной проницаемости феррита $\|\mu\|$.

Анализируя (2) и (3), можно сделать следующий вывод: при одинаковых ω индуктивность рамок L_0 при $\varphi = \pi$ в три раза больше, чем при $\varphi = 2\pi$, а ёмкости C при $\varphi = 2\pi$ в три раза больше, чем при $\varphi = \pi$. Для остальных значений фазы коэффициента прохождения сигнала со входа на выход φ значения индуктивности и ёмкости принимают промежуточные значения. В зарезонансном режиме, при котором нормированное внутреннее поле подмагничивания $\sigma = \gamma H_1 / \omega > 1$, величина κ / μ является отрицательной. Зависимость κ / μ от σ качественно представлена на рис. 4 [1]. Для оптимального режима работы циркулятора, то есть режима, обеспечивающего наибольшую полосу рабочих частот при минимальном уровне прямых потерь, с учётом зависимости κ / μ от частоты [1] и соотношений (2) и (3), необходимо, чтобы циркулятор работал на верхней рабочей частоте при $\varphi = \pi$, а на нижней при $\varphi = 0, 2\pi$ (рис. 4). Двухчастотный режим работы циркулятора может быть реализован при $\varphi = \pi$ на частоте ω_2 (точка 2), и $\varphi = 0, 2\pi$ на частоте ω_1 (рис. 4, точка 1), когда $\omega_2 > \omega_1$ и $\kappa / \mu(\omega_2) < \kappa / \mu(\omega_1)$.

Анализируя графики, приведённые на рис. 2 и 3, можно определить вид корректирующих цепей Z_1 и Z_c эквивалентной схемы циркулятора, представленной на рис. 1. В качестве Z_1 необходимо использовать последовательный контур с резонансной частотой настолько близкой к ω_2 , чтобы на частоте ω_2 отклонение от идеальных условий циркуляции, соответствующих $\varphi = \pi$, можно было не учитывать. В качестве общей цепи Z_c необходимо использовать параллельно включённые последовательный и параллельный контуры, так как для частоты ω_2 с $\varphi = \pi$ необходимо сопротивление общей цепи $Z_c = 0$, а для ω_1 с $\varphi = 2\pi$ необходимо $Z_c = \infty$. Предлагаемая общая цепь Z_c позволяет получить любое значение импеданса в полосе частот от ω_1 до ω_2 . Окончательно эквивалентная схема широкополосного циркулятора будет иметь вид, представленный на рис. 5.

Таким образом, предлагаемая модель широкополосного Y-циркулятора обеспечивает соблюдение условий циркуляции, близких к идеальным, на двух частотах ω_1 и ω_2 по краям рабочего диапазона. Для приближения условий циркуляции к идеальным во всём диапазоне рабочих частот необходимо соответствующим образом выбрать значения элементов цепей Z_c и Z_1 . Предлагаемая общая цепь Z_c позволяет получить практически любое значение импеданса без изменения условий циркуляции на частотах ω_1 и ω_2 , в то же время при использовании в качестве Z_1 последовательного контура значения элементов согласующей цепи Z_1 не могут варьироваться без изменения условий циркуляции на частотах ω_1 и ω_2 .

Анализ графика рис. 3 показывает, что при включении последовательного контура Z_1 , подобранного как предложено выше, в каждое плечо циркулятора на некоторой частоте ω_3 , которая находится в интервале $\omega_1 < \omega_3 < \omega_2$, величина Z_- будет равна 0. В то же время на частоте ω_4 , на которой $Z_+ = \infty$, можно получить условия циркуляции, соответствующие идеальным при $\varphi = 2\pi/3$ и определенной величине Z_1 , за счёт уменьшения Z_- до уровня $j\sqrt{3}/3\rho_0$ согласно (1).

При таких параметрах контура Z_1 его величина на частоте ω_2 может не быть равной 0, вследствие чего на частоте ω_2 будет наблюдаться отклонение собственных значений матрицы импеданса широкополосного циркулятора $Z_{0,+/-}$ от соответствующих идеальным условиям циркуляции при $\varphi = \pi$. Отклонение собственного значения матрицы импеданса Z_0 на частоте ω_2 возможно компенсировать за счёт выбора сопротивления общей цепи Z_c . Отклонения от идеальных условий циркуляции на частоте ω_2 за счёт несоответствия собственных значений матрицы импеданса $Z_{+/-}$ рассчитанным по формуле (1) при $\varphi = \pi$ будет небольшим, так как отрицательное сопротивление цепи Z_1 с ростом частоты возрастает и приближается к нулю.

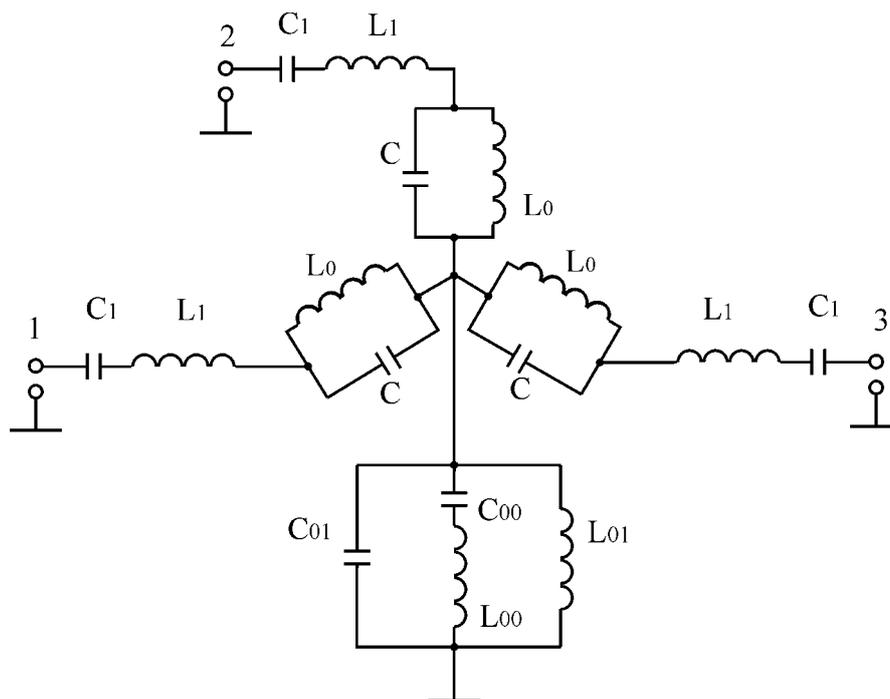


Рис. 5. Эквивалентная схема широкополосного Y-циркулятора

Таким образом, для собственных значений матрицы импеданса широкополосного циркулятора $Z_{+/-}$ могут быть достигнуты условия циркуляции, близкие к идеальным на частоте ω_1 при $\varphi=0(2\pi)$, на частоте ω_4 при $\varphi=2\pi/3$. На частоте ω_2 при $\varphi=\pi$ значения $Z_{+/-}$ будут обеспечивать условия циркуляции, близкие к идеальным. На частоте ω_3 при $\varphi=\pi/3$ значение Z_- будет соответствовать идеальным условиям циркуляции. За счёт соответствующего подбора величин элементов общей цепи можно реализовать значения Z_c таким образом, что на частотах $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ значения Z_0 будут близки к значениям, соответствующим идеальным условиям циркуляции.

На частоте ω_3 при параметрах последовательного контура Z_1 , выбранных как указано выше, значение Z_+ может не соответствовать идеальным условиям циркуляции. В соответствии с (1) на частоте ω_3 для получения идеальных условий циркуляции разница между Z'_+ и Z'_- должна быть равна $j\sqrt{3}\rho_0$. Для одновременного получения идеальных условий циркуляции на частотах $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ необходимо усложнить цепь Z_1 включением, как минимум, параллельной индуктивности, так как в диапазоне частот $\omega_1 \div \omega_2$ используется ёмкостная часть амплитудно-частотной характеристики последовательного контура. Однако усложнение входной цепи Z_1 недопустимо, так как при этом резко возрастает сложность конструкции и настройки входной цепи. При несоответствии условий циркуляции на частоте ω_3 идеальным необходимо изменить в небольших пределах величины элементов цепи Z_1 таким образом, чтобы достичь близких к идеальным условий циркуляции, при этом допустимы небольшие отклонения от идеальных условий циркуляции на других частотах ($\omega_1, \omega_2, \omega_4$).

2. Расчёт элементов эквивалентной схемы широкополосного Y-циркулятора

Основываясь на качественной модели широкополосного Y-циркулятора, приведённой в параграфе 1, полагаем, что эквивалентные схемы для возбуждений циркулятора собственными векторами \vec{U}_0 и $\vec{U}_{+/-}$ имеют вид, показанный на рис. 6. Импеданс общей цепи Z_c реализуется параллельным соединением последовательного контура $L_{00}C_{00}$ и параллельного контура $L_{01}C_{01}$, импеданс согласующих цепей Z_1 реализуется в виде последовательного контура L_1C_1 .

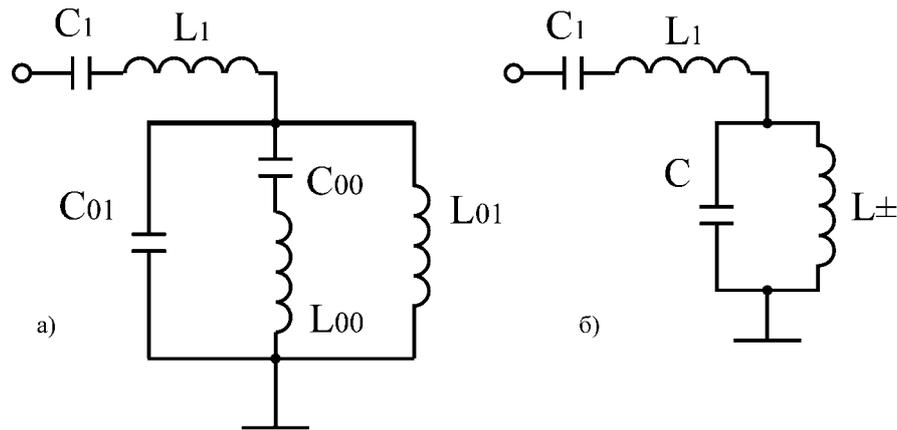


Рис. 6. Эквивалентные схемы широкополосного Y -циркулятора для синфазного возбуждения плеч циркулятора собственным вектором \vec{U}_0 (а) и для возбуждений циркулятора с правым и левым вращением электромагнитного поля собственными векторами \vec{U}_+ и \vec{U}_- (б)

С учётом (1) запишем условия циркуляции для произвольного циркулятора на частотах ω_1 (4) и ω_2 (5):

$$\begin{cases} Z_+ = j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0; \\ Z_- = -j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0; \\ Z_0 = \infty. \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} Z_+ = -j\sqrt{3}\rho_0; \\ Z_- = j\sqrt{3}\rho_0; \\ Z_0 = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Собственные значения матрицы импедансов Z_+' и Z_-' для узкополосного Y -циркулятора с параллельным соединением ёмкостей C и индуктивностей рамок L_0 определяются [7] соотношением

$$Z_{\pm}' = j \frac{1}{\omega C - \left(\frac{3}{2}\omega L_0(\mu \mp \kappa)\right)^{-1}}. \quad (6)$$

Собственные значения матрицы импедансов Z_0 для широкополосного Y -циркулятора определяются [8] по формуле

$$Z_0 = Z_1 + 3Z_c. \quad (7)$$

Входящие в (7) Z_1 и Z_c выражаются через реактивности $L, C, L_1, C_1, L_{00}, C_{00}, L_{01}, C_{01}$:

$$Z_c = j \frac{1}{\left(\omega L_{00} - \frac{1}{\omega C_{00}}\right)^{-1} + \frac{1}{\omega L_{01}} - \omega C_{01}}, \quad (8)$$

$$Z_1 = j\omega L - j\frac{1}{\omega C}. \quad (9)$$

Из соотношений (4), (5) с учётом эквивалентных схем рис. 1 и рис. 6 можно записать условия циркуляции для широкополосного Y -циркулятора на крайних частотах рабочего диапазона ω_1 и ω_2 , на которых осуществляется близкий к идеальному режим циркуляции:

$$\begin{cases} Z_1 + Z_+ = j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0 \\ Z_1 + Z_- = -j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0 \\ Z_c = \infty \end{cases} \quad (10)$$

$$\begin{cases} Z_1 + Z_+ = -j\sqrt{3}\rho_0 \\ Z_1 + Z_- = j\sqrt{3}\rho_0 \\ Z_1 + 3Z_c = 0 \end{cases} \quad (11)$$

Численное значение ω_1 определяется следующим образом: по формуле (6) рассчитываются зависимости $Z_+(\omega)$ и $Z_-(\omega)$, и определяется частота ω_1 , на которой исходя из условий циркуляции (4) для $\varphi=0,2\pi$ разница между Z_+ и Z_- составляет $j\frac{2\sqrt{3}}{3}\rho_0$. Следовательно, из второго уравнения системы (10) требуемая величина Z_1 на частоте ω_1 определяется по формуле

$$Z_1 = -\left(Z_- + j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0\right). \quad (12)$$

На частоте ω_4 , на которой $Z_+=\infty$, требуемая величина Z_1 определяется как разница между Z_+ и Z_- , которое, согласно (1), равно $j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0$, следовательно,

$$Z_1 = \left(Z_- - j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0\right). \quad (13)$$

Далее по известным значениям Z_1 на частотах ω_1 и ω_4 по формулам определяются величины L_1 и C_1 :

$$L_1 = j\left(\omega_4\left(Z_-(\omega_4) - j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0\right) - \omega_1\left(Z_-(\omega_1) + j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0\right)\right)(\omega_4^2 - \omega_1^2)^{-1}, \quad (14)$$

$$C_1 = \left(\omega_1^2 L_1 - j\omega_1\left(Z_-(\omega_1) + j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0\right)\right)^{-1}. \quad (15)$$

После определения величин L_1 и C_1 определяются остальные значения элементов эквивалентной схемы, представленной на рис. 6(а), которые должны обеспечивать величину сопротивления Z_0 в соответствии с (1), т.е. $Z_0=\infty$ на ω_1 , $Z_0=0$ на ω_2 , $Z_0=-j\sqrt{3}\rho_0$ на ω_3 , $Z_0=-j\sqrt{3}/3\rho_0$ на ω_4 . На частотах ω_2 и ω_4 сопротивление цепи Z_c мало, так как частоты ω_2 и ω_4 близки к резонансной частоте последовательного контура $L_{00}C_{00}$, следовательно, её сопротивление определяется в основном сопротивлением последовательного контура $L_{00}C_{00}$. Пренебрегая сопротивлением параллельного контура $L_{01}C_{01}$, расчёт элементов последовательного контура можно произвести с достаточной для реализации точностью, аналогично расчёту элементов контура Z_1 . В соответствии с (7) и (1), величины L_{00} и C_{00} определяются по формулам

$$L_{00} = j\left(\omega_4\left(\frac{-j\frac{\sqrt{3}}{3}\rho_0 - Z_1(\omega_4)}{3}\right) - \omega_2\left(\frac{-Z_1(\omega_2)}{3}\right)\right)(\omega_2^2 - \omega_4^2)^{-1}, \quad (16)$$

$$C_{00} = \left(\omega_4^2 L_{00} + j\omega_4 \left(\frac{-j\sqrt{3}\rho_0 - Z_1(\omega_4)}{3} \right) \right)^{-1}. \quad (17)$$

Тогда при условии, что L_{00} и C_{00} известны, из выражения (8) для Z_c находим величины элементов L_{01} и C_{01} , решив систему из двух уравнений для частот ω_1 и ω_3 , на которых $Z_c = \infty$, $Z_c = (-j\sqrt{3}\rho_0 - Z_1(\omega_3))/3$ соответственно. Решения системы уравнений имеют вид

$$L_{01} = j \left(\frac{\omega_3}{\omega_1} - \frac{1}{\omega_3} \right) \left(\frac{3}{-j\sqrt{3}\rho_0 - Z_1(\omega_3)} + j \frac{1}{\omega_3 L_{00} - \frac{1}{\omega_3 C_{00}}} - j \frac{\omega_3}{\omega_1 L_{00} - \frac{1}{\omega_1 C_{00}}} \right)^{-1}, \quad (18)$$

$$C_{01} = \frac{1}{\omega_1} \left(\frac{1}{\omega_1 L_{00} - \frac{1}{\omega_1 C_{00}}} + \frac{1}{\omega_1 L_{01}} \right).$$

Выражение для собственных значений матрицы рассеяния имеют вид [3]

$$S_{0,+/-} = \frac{Z_{0,+/-} - 1}{Z_{0,+/-}^2 + 1} - j \frac{2Z_{0,+/-}}{Z_{0,+/-}^2 + 1}. \quad (20)$$

Коэффициент отражения S_{11} матрицы рассеяния выражается через собственные значения матрицы рассеяния [7]:

$$S_{11} = \frac{1}{3} (S_0 + S_+ + S_-). \quad (21)$$

Приведенный расчёт позволяет приближённо определить значения элементов эквивалентной схемы циркулятора обеспечивающие условия циркуляции, близкие к идеальным на трёх частотах. Для получения условий циркуляции, при которых величина S_{11} не превышает заданной величины в рабочем диапазоне частот, может потребоваться оптимизация параметров согласующих цепей Z_1 и Z_c . Исходными данными для оптимизации являются численные значения реактивных элементов импедансов Z_1 и Z_c , рассчитанные по приведённым формулам, исходя из обеспечения близких к идеальным условий циркуляции на трёх частотах ω_1 , ω_2 и ω_4 . Задача оптимизации заключается в минимизации величины S_{11} в диапазоне частот ω_1 и ω_2 посредством поиска оптимальных значений величин элементов эквивалентной схемы циркулятора (рис. 5). С учётом того, что цепь Z_c позволяет получить любое значение импеданса на четырёх частотах, ω_1 – ω_4 , наиболее значимым процессом при оптимизации будет поиск уточнённых значений L_1 и C_1 . За счёт отклонения от начальных значений элементов цепи Z_1 , рассчитанных по формулам (14), (15), можно уменьшить отклонения от идеальных условий циркуляции в полосе рабочих частот. При уточнении рассчитанных значений $L_1 C_1$ необходимо учитывать, что при их изменении потребуется коррекция элементов цепи Z_c .

Оптимизацию следует проводить в два этапа. На первом этапе осуществляется уточнение значений $L_1 C_1$, при этом уменьшается величина S_{11} на частоте ω_3 , а на остальных частотах рабочего диапазона она увеличивается. На втором этапе осуществляется коррекция значений $L_{00} C_{00}$, $L_{01} C_{01}$, при этом осуществляется уменьшение величины S_{11} во всём рабочем диапазоне частот. Необходимость второго этапа оптимизации вызвана тем, что в результате первого этапа собственные значения матрицы импедансов широкополосного циркулятора $Z_{+/-}$ на частотах ω_1 – ω_4 не будут соответствовать определяемым по формуле (1) для соответствующих этим частотам значений φ , то есть реальные значения φ на этих частотах будут отличаться от выбранных. Следовательно, рассчитанные, как показано ранее, значения $L_{00} C_{00} L_{01} C_{01}$ потребуется скорректировать для уменьшения величины S_{11} . Оптимизацию в

данном случае целесообразно осуществить с помощью методов прямого поиска [9], основанных на вариации значений L_1C_1 и $L_{00}C_{00}$, $L_{01}C_{01}$ и оценке соответствующих им значений S_{11} в полосе частот ($\omega_1 - \Delta\omega$, $\omega_2 + \Delta\omega$).

В результате процедуры оптимизации осуществляется поиск оптимальных величин элементов эквивалентной схемы циркулятора, то есть таких значений, которые за счёт отклонения от реализации идеальных условий циркуляции на некоторых частотах рабочего диапазона позволяют получить более широкую полосу рабочих частот циркулятора.

3. Методика проектирования широкополосных Y-циркуляторов

Будем полагать, что исходными данными для проектирования циркулятора являются: диапазон рабочих частот, величина обратных потерь в диапазоне рабочих частот, габариты циркулятора. При проектировании следует учитывать, что циркулятор должен работать при такой величине магнитного поля, которая обеспечивала бы достаточное удаление от области ферромагнитного резонанса для минимизации величины вносимых потерь в верхней части рабочего диапазона частот. Таким образом, проектирование включает в себя следующие этапы:

- 1) выбор марки феррита по заданному диапазону рабочих частот;
- 2) выбор частоты ω_2 вблизи верхней границы диапазона рабочих частот, задание значения величины $\sigma = \gamma H_i / \omega > 1$ на частоте ω_2 и допустимой величины коэффициента отражения S_{11} во всём диапазоне рабочих частот;

3) расчет величин L , C :

- расчет μ и k в диапазоне рабочих частот;
- расчет L_0 и C из условий циркуляции (2) при $\varphi = \pi$ на частоте ω_2 ;
- расчет $Z'_{+/-}(\omega)$ по формуле (6) и известным μ и k , L_0 и C в полосе рабочих частот;

4) расчет частот ω_1 , ω_3 и ω_4 :

- определение частоты ω_1 , на которой $Z'_+ - Z'_- = j \frac{2\sqrt{3}}{3} \rho_0$, и по известным ω_1 и ω_2 проверка на соответствие полосе рабочих частот. При полосе меньше требуемой, необходимо уменьшить величину σ и провести расчёт по п. 1;
- определение частоты ω_4 , на которой $Z'_+ = \infty$;
- определение величин реактивностей L_1 , C_1 последовательного контура по формулам (14), (15);
- определение частоты ω_3 , на которой $Z_- = Z'_- - Z_1 = 0$;

5) расчёт элементов согласующей цепи общего контура Z_C по формулам (16)–(19);

6) расчёт коэффициента отражения S_{11} в диапазоне рабочих частот по формуле (21) и проверка на соответствие заданным техническим требованиям;

7) оптимизация параметров согласующих цепей Z_C и Z_1 :

- поиск оптимальных значений величин элементов последовательного контура в каждом плече L_1 , C_1 .
- поиск оптимальных значений величин элементов цепи общего контура $L_{00}C_{00}L_{01}C_{01}$.

8) разработка ТЗ на конструирование.

Необходимо отметить, что расчёт значений величин элементов эквивалентной схемы при проектировании должен проводиться с учётом возможности физической реализации этих элементов.

Заключение

В результате выполненных исследований разработана методика проектирования широкополосных Y-циркуляторов с использованием методов теории цепей. Методика основывается на представлении эквивалентной схемы широкополосного циркулятора на сосредоточенных элементах в виде Y-соединения индуктивностей переплетённых рамок L_{\pm} с параллельно включёнными ёмкостями C , в каждое плечо которого включён последовательный контур $Z_1(L_1C_1)$,

а между общей точкой индуктивностей и корпусом включена цепь Z_c , состоящая из соединённых параллельно последовательного контура $L_{00}C_{00}$ и параллельного контура $L_{01}C_{01}$. Предлагаемая методика включает два основных этапа: на первом этапе приближённо рассчитываются все численные значения параметров реактивностей цепей Z_1 и Z_c исходя из обеспечения близких к идеальным условий циркуляции на трёх частотах заданного диапазона рабочих частот, на втором этапе эти значения параметров уточняются с помощью оптимизации.

Предложенная методика расчёта была опробована авторами при разработке широкополосных Y -циркуляторов и вентилях дециметрового и метрового диапазонов длин волн. В метровом диапазоне длин волн макет развязывающего узла с размерами $45 \times 50 \times 20$ мм³ обеспечивал обратные потери не менее 18 дБ при вносимых потерях не более 1,0 дБ в полосе рабочих частот не менее 45%.

Библиографический список

1. **Вамберский, М.Ю.** Конструирование ферритовых развязывающих приборов СВЧ / М.Ю. Вамберский, В.П. Абрамов, В.И. Казанцев. – М.: Радио и связь, 1982.
2. **Козлов, В.А.** Широкополосный ферритовый СВЧ циркулятор на сосредоточенных элементах / В.А. Козлов, А.В. Сорокин // Материалы XVII междунар. научно-технич. конф. «ИСТ-2011» / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 96–97.
3. **Бородин, В.Н.** Двухчастотные Y -циркуляторы и вентили на сосредоточенных элементах / В.Н. Бородин, В.А. Козлов, А.В. Сорокин // Антенны, 2007. Вып. 12 (127). С. 6–8.
4. **Бородин, В.Н.** Двухчастотные ферритовые СВЧ циркуляторы с изменяющимся направлением циркуляции / В.Н. Бородин, В.А. Козлов, А.В. Сорокин // Антенны, 2009. Вып. 10 (149). С. 67–68.
5. **Katoh, H.** Temperature-stabilized 1.7-GHz Broad-Band Lumped-Element Circulator // IEEE Transactions, 1975. V. MTT–23. N 8. P. 685–696.
6. **Konishi, Y.** Design of a New Broad-Band Isolator / Y. Konishi, N. Hoshino // IEEE Transactions, 1971, V. MTT–19. N 3. P. 260–269.
7. **Хелзайн, Дж.** Пассивные и активные цепи СВЧ: [пер. с англ.] / Дж. Хелзайн. – М.: Радио и связь, 1981.
8. Основы теории цепей: учебник для вузов / Г.В. Зевеке [и др.]. – М.: Энергия, 1975.
9. **Гупта, К.** Машинное проектирование СВЧ устройств: [пер. с англ.] / К. Гупта, Р. Гардж, Р. Чадха. – М.: Радио и связь, 1987.

Дата поступления
в редакцию 22.06.2012

V.A. Kozlov, A.V. Sorokin

THE METHODS OF DESIGN WIDEBAND FERRITE Y -CIRCULATORS ON LUMPED ELEMENTS

Research Institute of Measuring Systems n.a. U.E. Sedakova

Purpose: The purpose of the paper is to construct a methods of designing broadband Y -circulators on the lumped elements with the smallest possible sizes.

Design/methodology/approach: The article proposes a qualitative model of the Y -circulator that allows to justify the choice of the type matching circuits, witch give wide band of operations. Calculation of the lumped elements based on the use of the eigenvalue of impedance matrix Y -circulator.

Findings: The essence of the established methods of design is to optimize the operating mode Y -circulator and determining the parameters of lumped elements corresponding to this regime.

Research limitations/implications: The proposed equivalent circuits in the article do not account for the dissipative losses. These results provide a basis for developing methods of engineering calculation of Y -circulators on the lumped elements.

Originality/value: The value of the results, presented in this work, is the physical visibility of gradual transition from the narrow-band Y -circulator to broadband by optimizing the operating mode and the appropriate choice of parameters of matching circuits.

Key words: Y -circulator, eigenvalue of scattering matrix, matching circuit, lumped element.

УДК 621.396

А. И. Беляев, Е. А. Букварёв, А. С. Половинкина, А. В. Ястребов

МЕТОД БЫСТРОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ АРИФМЕТИЧЕСКОЙ СВЕРТКИ СПЕЦИАЛЬНОГО ВИДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Предложен метод сокращения сложности согласованного фильтра для сигналов большой длительности с применением многоканально согласованного фильтра бинарных последовательностей [1]. Произведено сравнение сложностей построения согласованного фильтра с применением метода и без его использования.

Ключевые слова: согласованный фильтр, бинарная последовательность, оптимизация, сигналы большой длительности, сегмент опорного сигнала.

Введение

Построение согласованных фильтров для сигналов большой длительности требует значительных ресурсов микросхем FPGA, и использование бинарных последовательностей в ряде случаев не обеспечивает желаемого результата минимизации числа логических ячеек. В данной статье предлагаются способы применения согласованного фильтра бинарных последовательностей, с помощью которого удаётся значительно сократить число необходимых для построения согласованного фильтра логических ячеек FPGA.

Постановка задачи

Рассмотрим классическую структуру согласованного фильтра (СФ) для одного опорного сигнала a . СФ выполняет операцию дискретной свёртки, сигнал на выходе фильтра описывается выражением

$$Y[k] = \sum_{n=0}^{N-1} X[k-n] \cdot a[n], \quad (1)$$

где N – число отводов линии задержки; k – отсчёт выходного сигнала; n – номер отвода линии задержки; $a[n]$ – коэффициенты СФ. Общая схема такого СФ изображена на рис. 1.

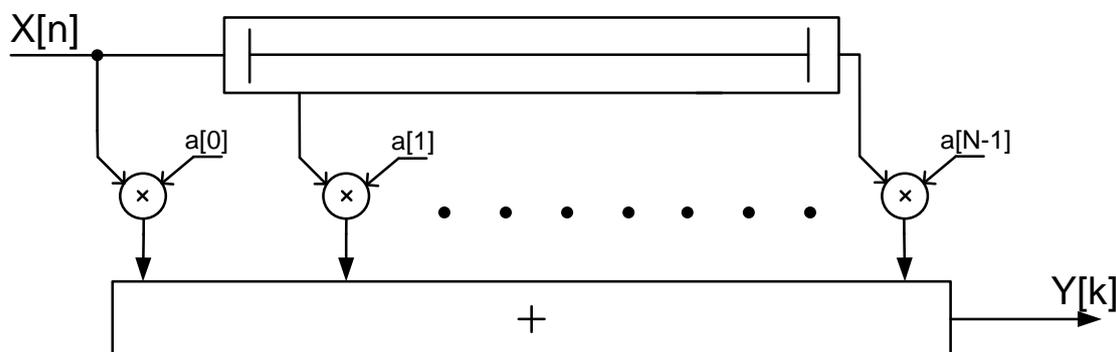


Рис. 1. Общая схема согласованного фильтра

Воспользуемся следующей формулой [1] для оценки сложности фильтра (рис. 1):

$$C = N \sum_{i=1}^{\log_2 N} 0,5^i (c + i), \quad (2)$$

где c – разрядность отсчётов. Тогда для сигнала длительностью $2^{14}=16\,384$ отсчёта единичной разрядности требуется 49 135 логических ячеек. При длительности $2^{16}=65\,536$ отсчётов единичной разрядности – 196 589 логических ячеек. Такие требования превышают число имеющихся логических ячеек быстродействующих схем FPGA с миниатюрным корпусом в несколько раз. Требуется минимизировать объем используемых ресурсов.

Оптимизация схемы фильтра

Основная идея сокращения числа ячеек, используемых при построении СФ для сигналов большой длительности, состоит в изменении схемы фильтра путём включения в неё блока многоканального согласованного фильтра бинарных последовательностей (СФБП), который выполняет параллельную свёртку с несколькими опорными сигналами, причем сложность СФБП будет мало отличаться от сложности фильтра для одного сигнала при соблюдении ограничений на фильтруемые сигналы [1]. Как и ранее мы рассматриваем сигналы, представляющие собой бинарные псевдослучайные последовательности. Постоянная составляющая любого из сигналов близка или равна нулю, длительность сигнала на входе фильтра достаточно большая и кратна степени двойки. Число сигналов, которые подаются на вход фильтра, также целесообразно определить кратным степени двойки. Это обеспечит оптимальный режим работы конвейерного сумматора с логарифмическим приближением [2]:

$$a \in \{-1,+1\}; \quad \sum_{i=0}^{N-1} a_i \approx 0; \quad N \gg 2^M; \quad M = 2^I; \quad W(a) = 0,5(\delta(1) + \delta(-1)), \quad (3)$$

где W – плотность вероятности распределения значений a ; M – число входных сигналов; I – показатель степени, определяющий число входных сигналов; N – длина сигнала на входе СФБП. При этом сложность СФ для нескольких сигналов мало отличается от сложности СФ для одного сигнала.

Подадим одновременно на вход СФБП смесь $X[n]$ из M шумоподобных сигналов длиной $N_1 = \frac{N}{M}$, на выходе будем иметь M откликов с максимальными уровнями напряжения в характерной точке. Просуммировав последние, получим сигнал, уровень напряжения которого в момент времени максимального отклика будет равен $N_1 \cdot M = \frac{N}{M} \cdot M = N$. Структура такого фильтра изображена на рис. 2.

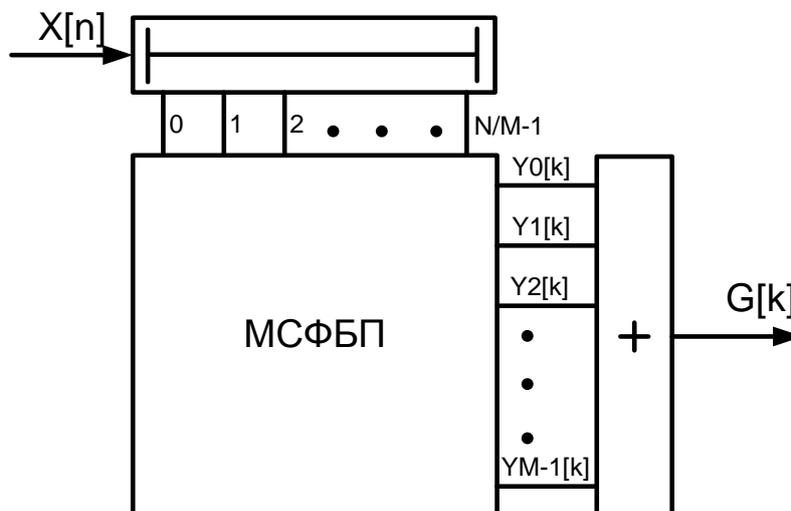


Рис. 2. СФ для смеси сигналов

Для обработки сигнала большой длительности представим его в виде последовательности M сегментов, как показано на рис. 3.

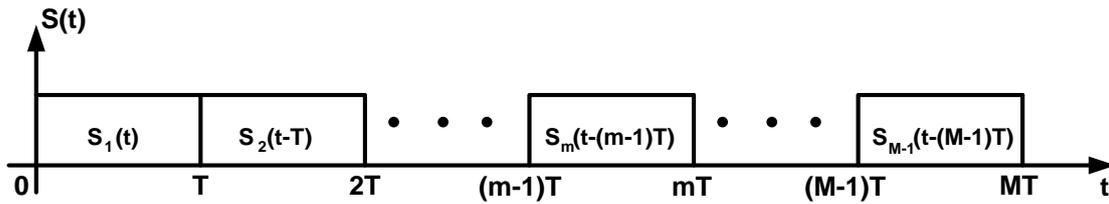


Рис. 3. Входной сигнал, разбитый на M сегментов

Длительность одного сегмента определяется выражением:

$$T = \tau \cdot N_m, \tag{4}$$

где τ - длительность одного отсчёта сегмента. Тогда обрабатываемый входной сигнал запишется в общем виде

$$S(t) = \sum_{m=0}^{M-1} S_m(t - mT). \tag{5}$$

Необходимо, чтобы сегменты, последовательно поступающие с СФБП, присутствовали на входе сумматора одновременно. Для этого поставим линии задержки на выходе фильтра, длительность которых в общем случае можно определить как mT . Для первого пришедшего на вход сегмента требуется максимальная задержка, которая составит $(M-1)T$, для второго сегмента – $(M-2)T$, для предпоследнего – T , в то время как последний вообще не задерживается. Структура такого согласованного фильтра изображена на рис. 4.

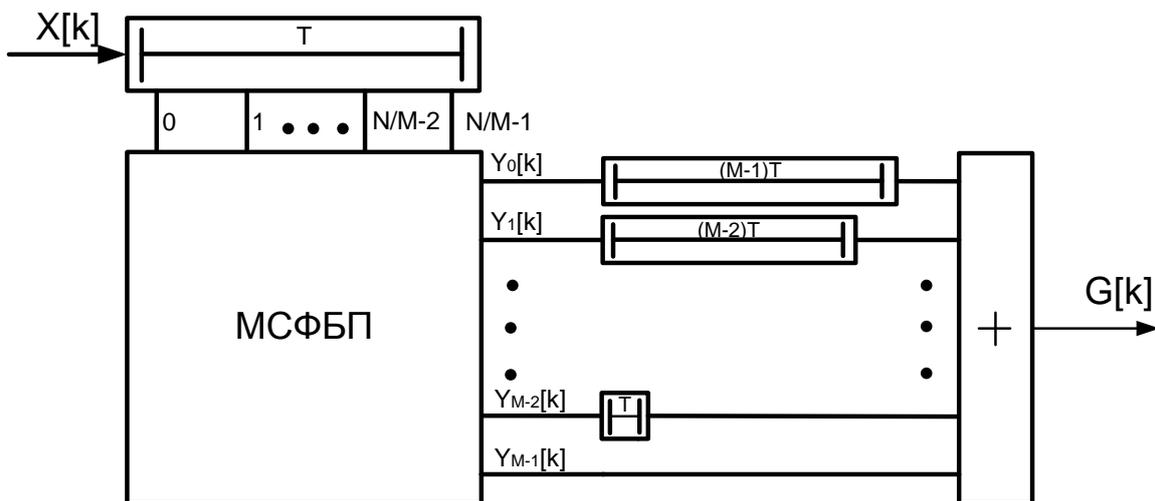


Рис. 4. СФ для последовательности сигналов

Оценим сложность структуры, изображённой на рис. 4 [1]. Сложность аппаратной реализации СФБП без учета линии задержки определяется выражением:

$$C_{СФ} = C_{S_{pre}} + C_{S_{post}} = N \sum_{i=1}^{\log_2 N - M} 0,5^i (c + i) + \sum_{i=0}^{M-1} 2^i (M - i) \cdot (c + \log_2 N - i). \tag{6}$$

С учётом сложности конвейерного сумматора логарифмического приближения и того, что используются сегменты длиной N_i , окончательная формула вычисления числа требуемых логических ячеек запишется в виде

$$C_{C\Phi} = C_{S_{pre}} + C_{S_{post}} + C_{LogSum} = N_1 \sum_{i=1}^{\log_2 N_1 - M} 0,5^i (c + i) + \sum_{i=0}^{M-1} 2^i (M - i) \cdot (c + \log_2 N_1 - i) + M \sum_{i=1}^{\log_2 M} 0,5^i (c + \log_2 N_1 + M + i). \quad (7)$$

На рис. 5 показаны зависимость сложности аппаратной реализации неоптимизированных и оптимизированных фильтров от числа сегментов фильтра для значений $N=2^{15}=32768$, $c=1$ и $N=2^{14}=16384$, $c=1$ опорных сигналов, вычисленных по формулам (2) и (7) соответственно.

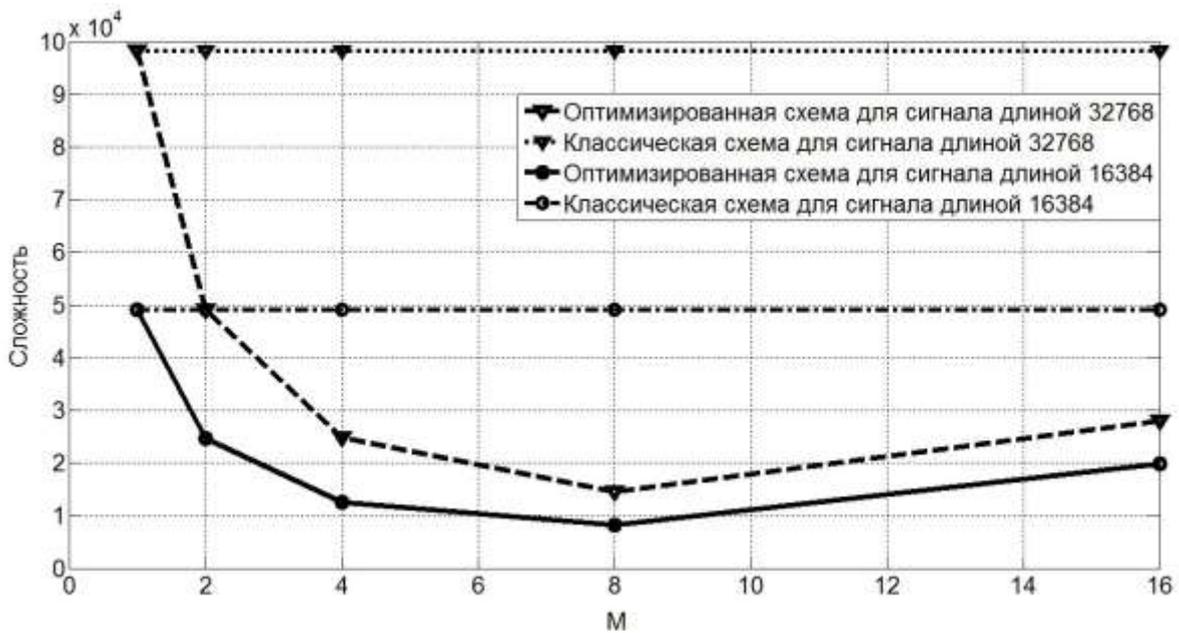


Рис. 5. Оценка выигрыша СФ в зависимости от длины исходного сигнала

Видно, что эффективность алгоритма возрастает при увеличении числа M сигналов, разбивающих сигнал большой длительности на M сегментов, до определённого значения, при котором еще выполняется условие $N_i \gg 2^M$. Дальнейшее увеличение числа сегментов приводит к нарушению этого условия, вследствие чего увеличивается сложность. Сложность фильтра при его реализации для большего сигнала возрастает относительно фильтра, реализованного для сигнала меньшей длины, но это увеличение незначительно относительно исходной сложности для длинного сигнала. Оценим этот выигрыш с помощью табл. 1.

Таблица 1

Оценка выигрыша при увеличении длины сигнала

Длительность исходного сигнала N	16384				32768			
	1	2	4	8	1	2	4	8
Число сигналов M	1	2	4	8	1	2	4	8
Классическая схема (сложность)	49140	49140	49140	49140	98280	98280	98280	98280
Оптимизированная схема (сложность)	49140	24590	12460	8201	98280	49140	24760	14600
Выигрыш (разы)	1	1,99	3,94	5,99	1	2	3,97	6,73

Из табл. 1 видно, что с увеличением длины сигнала N растет выигрыш отношения сложности классической схемы к оптимизированной. Необходимо отметить, что пользоваться данным подходом хорошо тогда и только тогда, когда M сигналов идут в смеси одновременно. Тогда и M максимальных откликов появятся на выходе фильтра одновременно. Пройдя через сумматор, они дадут на его выходе отклик, равный длине исходного сигнала N . В остальных случаях для получения максимального отклика необходимо использовать линии задержки, значительно повышающие сложность фильтра. Тогда чем больше мы разбиваем исходный сигнал, тем больше становится линий задержек для каждого из сегментов на входе фильтра, что может привести к неприемлемой сложности фильтра. Как будет показано далее, чем меньше сигналов для разбиения используется, тем меньше будет линий задержек. Несмотря на то, что они будут достаточно длинными, это не повлияет на значительное увеличение сложности.

Реализация СФ для длинного сигнала

В системе автоматизированного проектирования (САПР) QUARTUS II американской фирмы ALTERA было реализовано два вида СФ. Первый - по классической схеме (рис. 1) для восьми сегментов длиной по 2 048 отсчётов; второй - с использованием предложенного метода оптимизации. Структуры последнего фильтра и обрабатываемых им сигналов представлены на рис. 6.

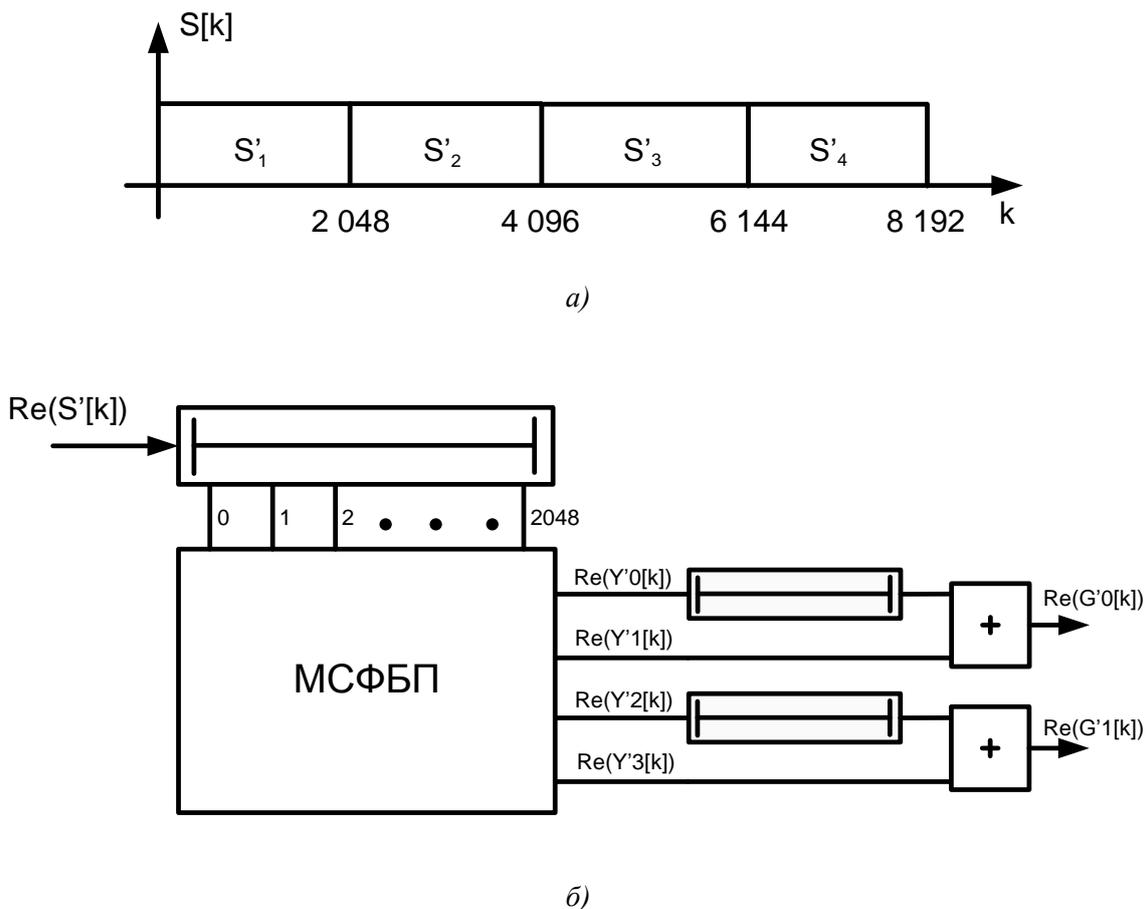
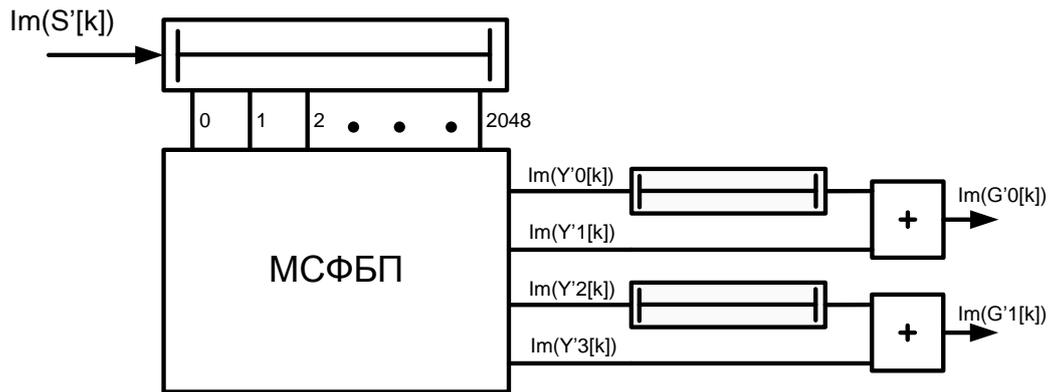
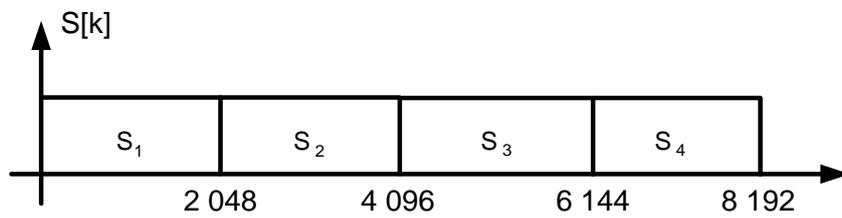


Рис. 6. Структура оптимизированного СФ:

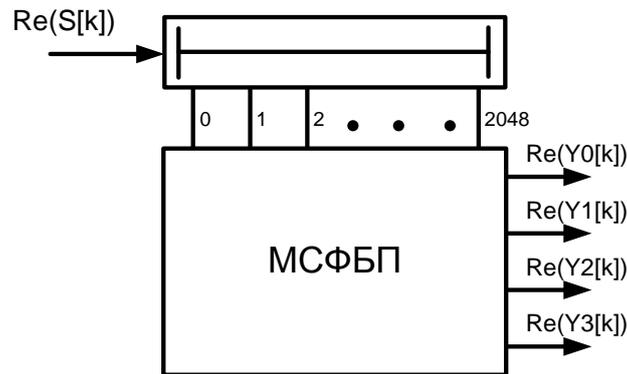
a – синхропоследовательность; b – фильтр для реальной части синхропоследовательности;



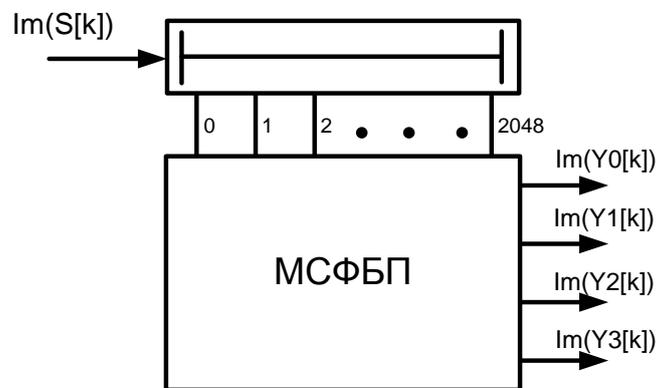
в)



г)



д)



е)

Рис. 6. Структура оптимизированного СФ (окончание):

в – фильтр для мнимой части синхропоследовательности; г – полезный сигнал;
 д – фильтр для реальной части полезного сигнала; е – фильтр для мнимой части полезного сигнала

На рис. 6 представлена синхропоследовательность, которая разбита на две части – первые два сигнала используются для осуществления синхронизации приемника, другие два осуществляют подстройку кварца, S - определяемый сигнал.

В САПР QUARTUS II так же была произведена оценка сложности СФ с использованием возможностей оптимизации (упаковка регистров, оптимизация размещения на кристалле и др.) и без.

Результаты вычислений сложности фильтров даны в табл. 2. В ней имеются столбцы, обозначающие включение и отключение возможности оптимизации проекта. Полностью отключить оптимизацию не представляется возможным из-за характерной структуры логических ячеек и алгоритма их использования. Для сравнения теоретических и практических результатов необходимо учесть сложность линий задержек в теоретических расчётах (линии задержки можно реализовать либо на базе встроенной оперативной памяти, либо на логических ячейках). С точки зрения используемых ресурсов первый способ является самым эффективным и предпочтительным для применения, второй – весьма затратным, определяющим максимальную границу сложности реализации устройства.

Рассмотрим наихудший случай. Для классической схемы сложность конвейерного сумматора с логарифмическим приближением, определяемого по формуле (2), составит 6 130 ячеек, линия задержки для сигнала длительностью 2 048 отсчетов составит 2 048 ячеек. Сложность фильтра для сигнала S определится с учетом реальной и мнимой части как $4 \cdot (6130 + 2048) \cdot 2 = 65424$ ячеек. Для синхропоследовательности сумматор займет 12 273 ячеек, линия задержки – 4 096. Тогда сложность фильтра для реальной и мнимой частей синхропоследовательности определится как $4 \cdot (12273 + 4096) = 65476$ ячеек. Общая сложность составит 130 900 ячеек.

Таблица 2

Сравнение сложностей фильтра для различных систем

Сложность	Классическая схема (логических ячеек)		Оптимизированная схема (логических ячеек)		Выигрыш (разы)	
Теоретически	130900		41592		3,14	
	с оптимизацией	без оптимизации	с оптимизацией	без оптимизации	опт.	неопт.
Практически	73552	130040	14925	28431	4,92	4,57

В силу того, что в практической реализации используются линии задержки для увеличения величины отклика на выходе сумматора, необходимо внести коррекцию в формулу для определения сложности, которая соответствует ситуации, изображенной на рис. 4. Так как сигнал большой длительности N был разделен на M сегментов, то величина линии задержки для фильтра составит N/M логических ячеек. Самый первый пришедший сигнал S_1 будет задержан после выхода из СФ на величину $(M-1) \cdot \frac{N}{M} = (M-1) \cdot N_1$ отсчетов, что займет аналогичное число ячеек для $S_2 - (M-2) \cdot N_1$, для $S_7 (M-7) \cdot N_1$ и т. д. Таким образом, формула оценки сложности фильтра с учетом линий задержек определится

$$C_{C\Phi} = C_{S_{pre}} + C_{S_{post}} + C_{LogSum} + C_{DL} = N_1 \sum_{i=1}^{\log_2 N_1 - M} 0,5^i (c + i) +$$

$$+ \sum_{i=0}^{M-1} 2^i (M - i) \cdot (c + \log_2 N_1 - i) + M \sum_{i=1}^{\log_2 M} 0,5^i (c + \log_2 N_1 + M + i) + N_1 + \sum_{i=1}^{M-1} i \cdot N_1. \quad (8)$$

Построим график (рис. 7), на котором будет отражена сложность фильтра с учетом сложности, вносимой линиями задержек C_{DL} , и без. Возьмем сигнал длительностью $N=16\ 384$ отсчета. Сложность фильтра, собранного по классической схеме (2), составит $C + N = 65\ 519$.

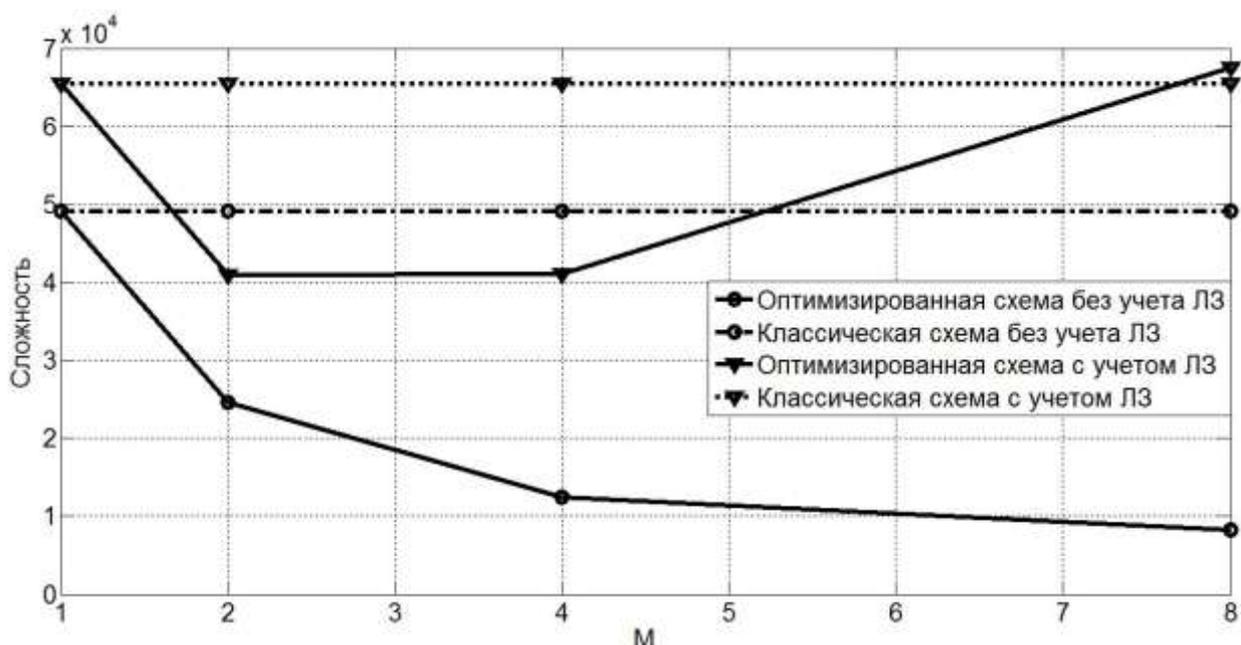


Рис 7. Учет сложности, вносимой линиями задержек

В табл. 3 показаны числовые значения графиков.

Таблица 3

Оценка сложности фильтра с учетом линий задержек и без

Схема	Число сигналов			
	1	2	4	8
Оптимизированная без учета ЛЗ	49140	24590	12460	8201
Оптимизированная с учетом ЛЗ	65519	40980	41130	67590

Из рис. 7 и табл. 3 видно, что, несмотря на уменьшение сложности фильтра с увеличением числа сигналов при фиксированной длине исходного сигнала, происходит рост сложности фильтра, где была учтена сложность линий задержек. Оптимальный режим работы фильтра наблюдается при использовании двух сигналов. При этом сложность самого фильтра без линий задержек составляет 24 590 ячеек, две линии задержки займут по 8 192 ячейки. Выигрыш составит $65\ 519/40\ 980 = 1,6$ раз.

Выводы

1. Предложен способ уменьшения числа используемых логических ячеек FPGA для сигналов большой длительности
2. При использовании линий задержек на базе встроенной памяти выигрыш отношения сложности классической схемы к оптимизированной возрастает с увеличением длительности опорного сигнала и числа сегментов разбиения.
3. При использовании линий задержек на базе логических элементов оптимальным является разбиение опорного сигнала на 2–7 сегментов.

Библиографический список

1. **Беляев, А.И.** Оптимизация многоканального согласованного фильтра бинарных последовательностей / А.И. Беляев, Е.А. Букварев, А.В. Ястребов // Цифровая обработка сигналов. 2011. №1. С. 15-17.
2. **Угрюмов, Е. П.** Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. – СПб.: БХВ-Петербург, 2001. – 528 с.

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2012*

A.I. Belyaev, E.A. Bukvarev, A.S. Polovinkina, A.V. Yastrebov

THE OPTIMIZATION OF PN-MATCHED DIGITAL FILTER FOR HIGH LENGTH SIGNALS

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

Purpose: The problem of development of binary digital PN-matched filter for high length signals exists. To solve the mentioned problem the optimal structure of PN-matched filter was developed. The formula of estimation of filter complexity was shown.

Design/methodology/approach: This filter provides the processing of several signals at the same time. Thus a high length signal can be cut on segments. These segments pass through multichannel binary PN-matched digital filter one after another and the first segment gets the longest time delay and the latest segment is passed straight to summator. Sum of delay line outputs provides the same value of autocorrelation function which provides classical scheme of PN-matched filter.

Findings: Optimized scheme requires considerably less logic cells than classical scheme.

Research limitations/implications: The optimized scheme provides matched filtering of high base signals using much less hardware resources.

Originality/value: The present study provides the optimized scheme for receiving pseudo-noise binary high length signals.

Key words: matched filter, binary sequence, optimization, high-length signals, segment.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 532.5

Е.А. Рувинская

СВОЙСТВА УЕДИНЕННЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН В ТРЕХСЛОЙНОЙ СРЕДЕ: СРАВНЕНИЕ МОДЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Работа посвящена исследованию свойств локализованных структурно устойчивых внутренних гравитационных волн в жидкости с симметричной трехслойной стратификацией.

Метод: Используется прямое численное интегрирование двумерной по пространству полнонелинейной системы уравнений Эйлера для несжимаемой стратифицированной жидкости в приближении Буссинеска и модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза.

Результаты: Проанализирована зависимость количества уединенных внутренних волн, генерируемых из одинакового импульса начального возмущения, от соотношения толщин слоев для рассматриваемых моделей. Найдены величины предельных амплитуд солитонов для разных сочетаний условий в среде. Построены зависимости скорости, ширины, массы, энергии от амплитуды при фиксированных параметрах плотностной стратификации.

Выводы: Слабонелинейная теория может использоваться для определения волнового режима (существования солитонных решений для конкретных параметров среды), хорошо описывает форму и свойства уединенных внутренних волн при малых амплитудах, но переоценивает количество генерируемых солитонов.

Ключевые слова: модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза, численное моделирование, система уравнений Эйлера.

Введение

Изучение внутренних гравитационных волновых движений – актуальная задача механики жидкости, интерес к которой остается высоким в течение нескольких десятилетий. Теория внутренних гравитационных волн благодаря развитию гидродинамики, вычислительной математики и теории колебаний и волн постоянно совершенствуется, что обусловлено практическими нуждами человечества. Сложно переоценить роль интенсивных внутренних волн в динамических процессах, происходящих во всех природных стратифицированных водоемах от озер и водохранилищ до морей и океанов. Особый интерес для современной науки представляют солитоны внутренних волн, которые часто проявляются как весьма значительные, энергонесущие образования и играют ведущую роль в процессах, происходящих в окружающей их среде.

Для описания генерации и распространения солитонов внутренних волн часто используются упрощенные слоистые модели жидкости с кусочно-постоянным распределением плотности. Наиболее хорошо изучена волновая динамика в двухслойной жидкости (для большинства водоемов характерно наличие приповерхностного (прогретого) слоя более легкой жидкости и остальной (более холодной) толщи воды), однако возрастает и количество работ посвященных трехслойной среде [1-6], которая не только обладает существенно более сложной волновой динамикой, но и встречается в некоторых природных акваториях, таких как Балтийское или Южно-Китайское море [7, 8].

Стремительное развитие вычислительной математики и ЭВМ позволило мировому научному сообществу создать ряд вычислительных программных комплексов [9-14], позволяющих решать задачу о генерации и распространении внутренних волн путем прямого численного интегрирования полной системы уравнений гидродинамики невязкой идеальной или вязкой жидкости. Такие модели достаточно универсальны, поскольку позволяют исследовать динамику внутренних волн в бассейне с произвольными параметрами, но к их недостаткам можно отнести неочевидность связей между параметрами численного решения и, как правило, большие затраты вычислительных ресурсов.

Наряду с численными продолжают развиваться приближенно-аналитические методы, позволяющие с помощью асимптотических процедур сводить исходную систему уравнений гидродинамики к нелинейному эволюционному уравнению, позволяющему определить особенности волнового режима стратифицированной среды и применить весь арсенал теории возмущений к анализу данного класса задач.

Таким образом, если численные модели для исследователя являются основным техническим инструментом расчета внутренних волновых полей в исследуемом бассейне, то эволюционные уравнения предоставляют широкие возможности для анализа волновых режимов в зависимости от условий исследуемой среды и обобщения результатов на близкие по соотношению параметров модельные случаи без необходимости проведения дополнительных вычислительных экспериментов.

Целью настоящей работы является исследование свойств уединенных внутренних волн в симметричной трехслойной жидкости. Для их более детального изучения будет проведено сравнение параметров уединенных внутренних волн, а также особенностей их генерации как в рамках полнонелинейной численной модели, так и с помощью слабонелинейной теории.

Постановка задачи. Описание моделей

Рассматривается задача о генерации уединенных внутренних волн из начального возмущения в виде импульса прямоугольной формы в бассейне глубины H с ровным плоским дном и поверхностью с симметричной устойчиво стратифицированной трехслойной жидкостью (рис. 1).

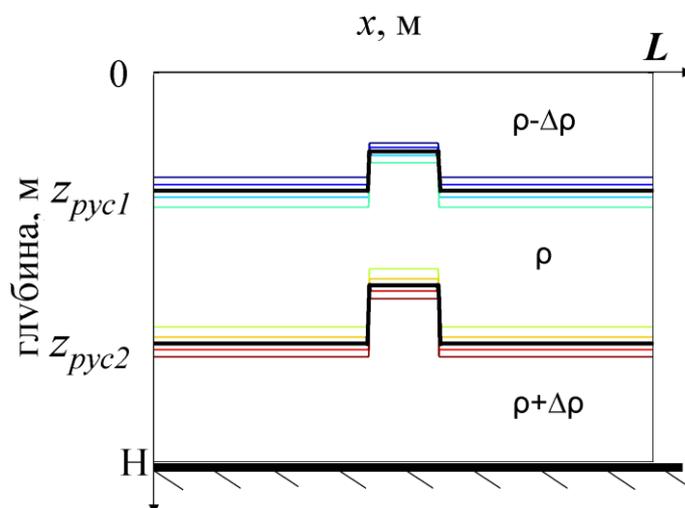


Рис. 1. Схема задачи

Границы между слоями разной плотности резкие (для слабонелинейной модели) или представляющие собой тонкий переходный слой (для полнонелинейной модели). На рис. 1 изображены возмущенные линии одинаковой плотности (изопикны) внутри верхнего и нижнего переходного слоя для полнонелинейной модели в начальный момент времени, жирной

черной линией обозначены резкие границы между слоями (толщины симметричных верхнего и нижнего слоев обозначим $h = z_{\text{пл1}} \equiv H - z_{\text{пл2}}$).

Наиболее простой моделью для описания динамики внутренних волн в симметричной трехслойной жидкости в предположении малой амплитуды является модифицированное уравнение Кортевега-де Вриза (мКдВ) [15], поскольку для такой среды в силу симметрии коэффициент квадратичной нелинейности в слабонелинейных эволюционных уравнениях обращается в нуль:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + c \frac{\partial A}{\partial x} + \alpha_1 A^2 \frac{\partial A}{\partial x} + \beta \frac{\partial^3 A}{\partial x^3} = 0, \quad (1)$$

A – смещение волнового интерфейса в точке максимума линейной моды; c – фазовая скорость распространения волны; α_1 – коэффициент кубической нелинейности; β – коэффициент дисперсии. Физический смысл и выражения коэффициентов уравнения (1) для трехслойной среды содержатся в [15, 16].

Исследование эволюции начального возмущения в рамках уравнения (1) проводилось с помощью численного интегрирования на основе неявной псевдоспектральной схемы с контролем сохранения интегралов массы и энергии.

Так как коэффициент кубической нелинейности может менять знак в зависимости от соотношения толщин слоев в симметричной трехслойной жидкости, в работах [5, 17, 18] были получены уточнения мКдВ, позволяющее корректно описывать особенности солитонов внутренних волн в бассейнах со стратификациями плотности, соответствующими вырождению коэффициента кубической нелинейности.

Для численного моделирования уединенных внутренних волн использован программный комплекс, разработанный профессором университета Ватерлоо (Канада) К. Лэмбом, решающий систему уравнений, описывающих движение невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости в вертикальной плоскости в приближении Буссинеска, путем прямого численного интегрирования:

$$\begin{aligned} \vec{U}_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \vec{U} - f \vec{v} \vec{i} &= -\vec{\nabla} p - \rho g \vec{k}, \\ v_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} v + f u &= 0, \end{aligned} \quad (2)$$

$$\rho_t + \vec{U} \cdot \vec{\nabla} \rho = 0,$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{U} = 0.$$

$$\rho = \frac{\rho_f - \rho_0}{\rho_0}. \quad (3)$$

Эти уравнения решаются в пространстве размерности 2+1, т.е. все физические величины являются функциями x , z и t . Здесь $\vec{U} = (u, w)$ – вектор скорости в вертикальной плоскости (x, z) ; u – скорость вдоль горизонтальной оси x ; w – скорость вдоль вертикальной оси z , v – компонента скорости в поперечном направлении y ; $\vec{\nabla} = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$ – оператор градиента; t – время; ρ_f – плотность морской воды; ρ_0 – постоянная характерная плотность (возникает в силу предположения, что плотность воды в исследуемом бассейне меняется незначительно, т. е. в силу приближения Буссинеска: $\rho_f = \rho_0(1 + \rho)$), ρ – безразмерная величина (аномалия плотности); g – гравитационное ускорение; f – параметр Кориолиса; \vec{i} и \vec{k} – единичные орты по осям x и z .

Пространственная расчетная область имеет горизонтальный размер L , вертикальный – H . Задача решается в области $\{-L/2 \leq x \leq L/2, -H \leq z \leq 0\}$. На поверхности океана используется приближение «твердой крышки» $w = 0$ при $z = 0$. Граничное условие на дне ставится как условие непротекания $w = 0$ при $z = -H$. Правая и левая границы являются открытыми.

Процедура численного решения системы основана на неявной предиктор-корректорной двухшаговой конечно-разностной схеме.

Верификация модели была проведена ранее в работах [9, 19, 20].

Для инициализации модели необходимо задать горизонтально-однородное невозмущенное поле плотности морской воды $\rho_{mean}(z)$, а также начальное возмущение поля плотности в форме $\rho(x, z, t = 0) = \rho_{mean}(z - \eta(x))$ и начальное распределение скоростей, которое выбирается исходя из линейной теории длинных волн в соответствии с возмущением плотности.

При проведении численных экспериментов полная глубина жидкости принималась равной 100 м.

Сглаженная почти трехслойная стратификация задавалась функцией вида

$$\rho_{mean}(z) = -0.005 \tanh\left(\frac{z - z_{pvc1}}{4.0}\right) - 0.005 \tanh\left(\frac{z - z_{pvc2}}{4.0}\right). \quad (4)$$

Параметры используемых стратификаций и соответствующие им коэффициенты уравнения мКдВ представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры стратификаций плотности, используемые для постановки начальной задачи и соответствующие им значения коэффициентов уравнения мКдВ

Коэффициенты	Параметры			
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
$z_{pvc1}, \text{ м}$	- 25	- 26	- 27	- 28
$z_{pvc2}, \text{ м}$	-75	- 74	-73	- 72
$c, \text{ м/с}$	1.4930	1.5246	1.5557	1.5861
$\beta, \text{ м}^3/\text{с}$	668.1055	692.8752	716.8003	739.8218
$\alpha, \text{ с}^{-1}$	0	0	0	0
$\alpha_1, (\text{м}\cdot\text{с})^{-1}$	$6.68 \cdot 10^{-3}$	$5.55 \cdot 10^{-3}$	$4.46 \cdot 10^{-3}$	$3.52 \cdot 10^{-3}$
	№ 5	№ 6	№ 7	№ 8
$z_{pvc1}, \text{ м}$	- 29	- 30	- 31	- 32
$z_{pvc2}, \text{ м}$	-71	- 70	- 69	- 68
$c, \text{ м/с}$	1.6159	1.6453	1.6741	1.702
$\beta, \text{ м}^3/\text{с}$	761.8882	782.9382	802.9169	821.776
$\alpha, \text{ с}^{-1}$	0	0	0	0
$\alpha_1, (\text{м}\cdot\text{с})^{-1}$	$2.71 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$1.39 \cdot 10^{-3}$	$8.59 \cdot 10^{-4}$

Начальное возмущение поля плотности задавалось в виде

$$\eta(x, z, t = 0) = F(x)\Phi(z), \quad (5)$$

где $\Phi(z)$ – решение краевой задачи для вертикальной структуры моды:

$$\begin{cases} \Phi'' + \frac{N^2(z)}{c^2} \Phi = 0, \\ \Phi(0) = \Phi(H) = 0 \end{cases} \quad (6)$$

здесь c – фазовая скорость длинных линейных внутренних волн; $N(z)$ – частота Вэйсяля-Брента.

$$F(x) = \frac{a}{2} \left(1 + \text{th} \left(\frac{(x - x_0)}{d} \right) \right) - \frac{a}{2} \left(1 + \text{th} \left(\frac{(x - x_2)}{d} \right) \right). \quad (7)$$

Горизонтальная и вертикальная составляющие скорости задавались в линейном приближении:

$$u(x, z, t = 0) = cF(x) \frac{d\Phi}{dz}, \quad (8)$$

$$w(x, z, t = 0) = -c\Phi(z) \frac{dF}{dx}. \tag{9}$$

Шаг по пространству между узлами сетки, а также шаг по времени выбирались исходя из критерия устойчивости Куранта -Фридрихса -Леви.

Численные эксперименты проводились как для волн понижения, так и повышения уровня. В процессе нелинейной эволюции начальная волна трансформировалась в распространяющийся волновой пакет, причем со временем происходило разделение головной УВВ и осциллирующего следа. Критерием формирования УВВ служили оценки изменения параметров, описанные в работе [21]. Сравнение вертикальной структуры волновых полей проводилось аналогично [22].

Особенности генерации уединенных внутренних волн в симметричной трехслойной жидкости в зависимости от соотношения толщин слоев

Как отмечалось ранее, анализ коэффициентов слабонелинейных эволюционных уравнений позволяет предсказывать возможные волновые режимы для выбранного сочетания начальных условий в жидкости, в том числе делать прогноз относительно генерации солитонов внутренних волн в бассейне с заданной стратификацией.

В трехслойной симметричной жидкости коэффициент квадратичной нелинейности вырождается, а коэффициент кубической нелинейности может быть положительным ($\alpha_1 > 0$), что свидетельствует о возможности существования уединенных волн (соответствующих в слабонелинейном пределе солитонам уравнения мКдВ), отрицательным ($\alpha_1 < 0$) – характеризующим жидкость, в которой не могут генерироваться солитоны (возможно существование уединенных волн только на ненулевом пьедестале, а также стационарных решений в виде бездиссипативных ударных волн [15]), и равным нулю.

Смена знака кубической нелинейности для трехслойной симметричной жидкости происходит при $h/H = 9/26$ ($\alpha_1 > 0$ при $h/H < 9/26$), где h – толщина верхнего и нижнего слоев; H – полная глубина [15]. Так как мы рассматриваем стратификацию плотности со сглаженным пикноклином, значение h/H , при котором $\alpha_1 = 0$, немного отличается от указанного для слоистой модели: оно сдвигается влево по числовой оси (рис. 2).

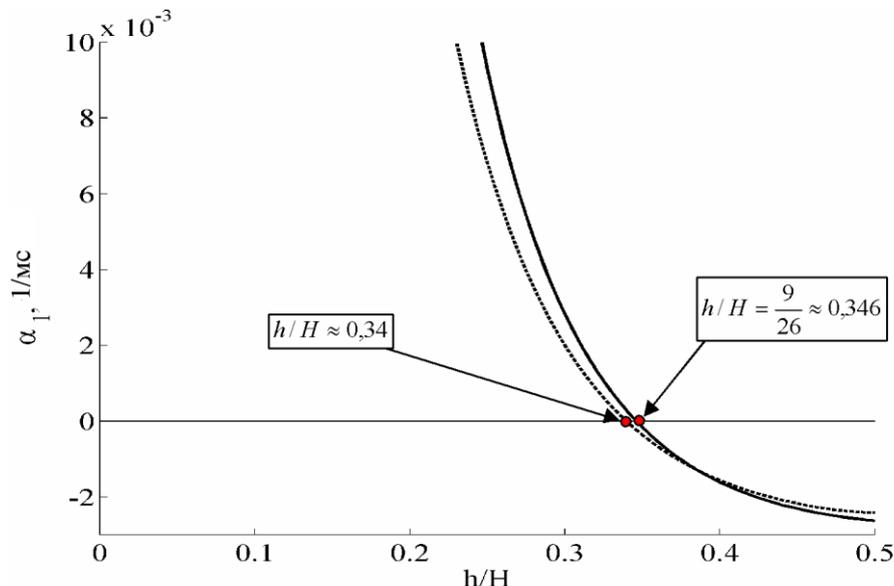


Рис. 2. Коэффициент кубической нелинейности при различных соотношениях толщин слоев для трехслойной симметричной жидкости с резкими границами между слоями разной плотности и сглаженными (пунктир)

В работе [3] для моделирования стационарных внутренних волн в симметричной трехслойной среде использовалось полнонелинейное уравнение DJL (Dubreil-Jacotin-Long) (аналог системы уравнений Эйлера) и было установлено, что солитоны не генерируются из начального возмущения уже при $h/H = 0.3$.

В рамках прямого численного интегрирования системы уравнений Эйлера с использованием программного комплекса Лэмба был проведен ряд численных экспериментов (табл. 1 № 1-8) и установлено, что точка смены волновых режимов находится между $h/H = 0.31$ и $h/H = 0.32$, что несколько меньше значения, предсказанного для слабонелинейной теории, но превышает прогнозируемую в работе [3] величину.

В трехслойных жидкостях с симметричными стратификациями плотности, удовлетворяющими условию $h/H < 9/26$, из прямоугольного импульса могут появляться сразу несколько солитонов. Исследуем зависимость от соотношения толщин слоев количества генерируемых уединенных волн при эволюции прямоугольного импульса фиксированной массы в рамках полнонелинейной модели и уравнения мКдВ.

В работе [23] для определения числа солитонов, появляющихся при эволюции начального возмущения в рамках уравнения мКдВ, применяется ассоциированная задача рассеяния и определяется дискретный спектр, в котором действительные собственные значения соответствуют солитонам, а комплексные собственные значения – бризерам. При этом однополярные возмущения (положительные или отрицательные) могут генерировать только солитоны, их число зависит от массы начального импульса. Для прямоугольного импульса число дискретных собственных значений (генерируемых солитонов) определяется формулой

$$N = \left[\frac{UL}{\pi} + \frac{1}{2} \right], \quad (10)$$

где U – безразмерная амплитуда; L – безразмерная ширина; квадратные скобки обозначают целую часть числа.

В размерном виде выражение (10) запишется следующим образом:

$$N = \left[\frac{al \sqrt{\frac{\alpha_1}{6\beta}}}{\pi} + \frac{1}{2} \right], \quad (11)$$

где a – амплитуда импульса, м; l – ширина импульса, м; α_1 и β – коэффициенты уравнения мКдВ при заданной стратификации плотности.

Для сравнения количества генерируемых уединенных внутренних волн в рамках уравнения мКдВ и полнонелинейной численной модели (рис. 3) проводились численные эксперименты с параметрами плотностных стратификаций № 1-8 табл. 1, начальное возмущение задавалось в виде прямоугольного импульса (7) с $a = 15$ м, $l = 2500$ м.

Согласно рис. 3, слабонелинейная теория переоценивает число возможных солитонов внутренних волн. Это происходит, потому что большая часть энергии начального импульса в полнонелинейной модели уходит на формирование солитона предельной амплитуды, тогда как в рамках уравнения мКдВ уединенные волны не имеют амплитудных ограничений (рис. 4). Солитон, достигающий предельной амплитуды, может сосредотачивать в себе фактически неограниченное количество энергии, поскольку способен уширяться, приобретая столбовую форму. Классическим примером уединенных волн с уплощенной вершиной является солитон уравнения Гарднера. Для трехслойной симметричной жидкости существование таких волн было продемонстрировано в работах [1, 3], где проводилось численное моделирование динамики внутренних волн в рамках полнонелинейных моделей DJL и теории сопряженных потоков, а также в [22]. Использование слабонелинейной теории для обоснования возможности существования солитонов предельной амплитуды в симметричной трехслойной среде описано в [5, 18].

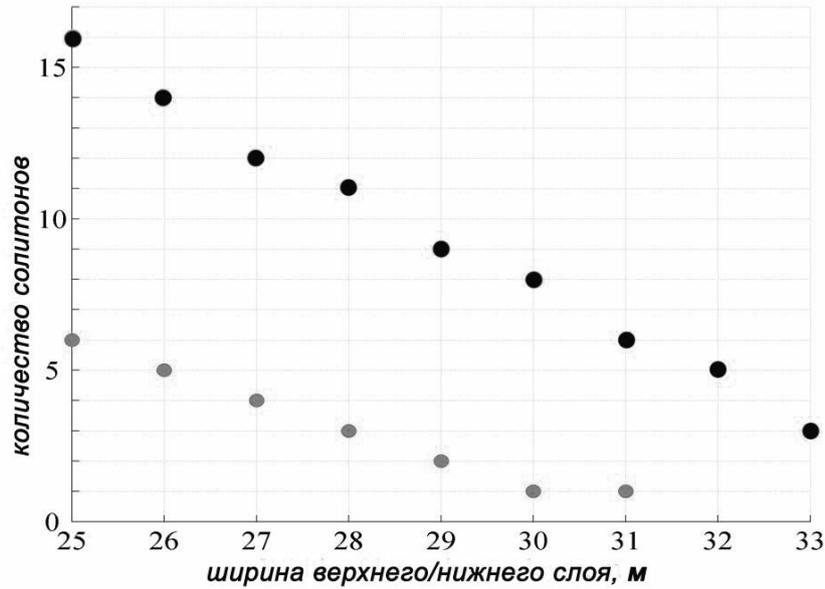


Рис. 3. Количество генерируемых из прямоугольного импульса ($a = 15$ м, $l = 2500$ м) солитонов в зависимости от соотношения толщин слоев в рамках полнонелинейной (серые точки) и слабонелинейной (черные точки) модели

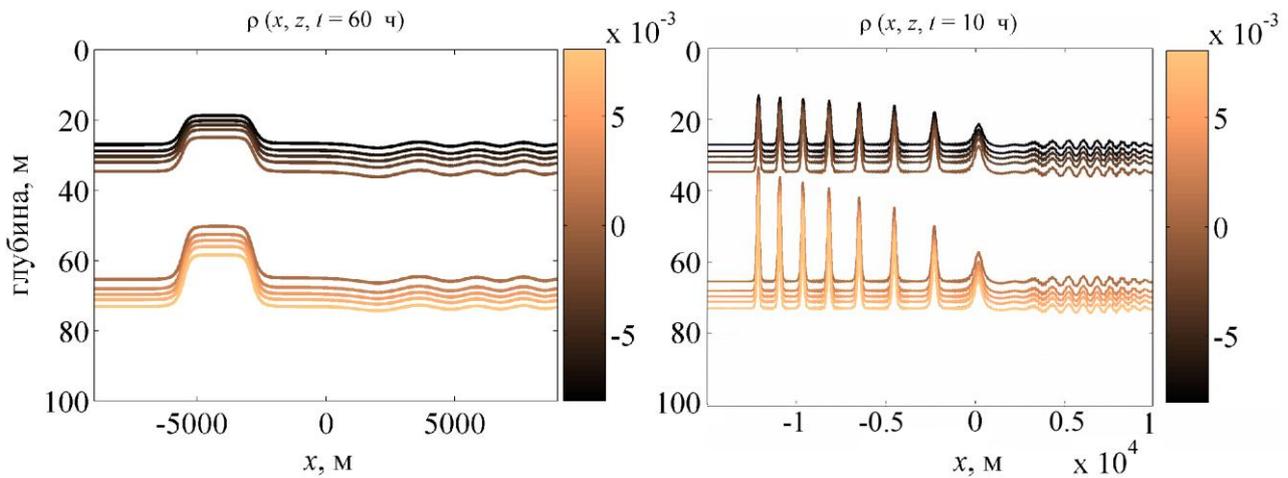


Рис. 4. Эволюция прямоугольного импульса ($a = 15$ м, $l = 2500$ м) в жидкости с параметрами стратификации № 6 (табл. 1): генерация солитона предельной амплитуды в рамках полнонелинейной (слева) и многосолитонного решения в рамках слабонелинейной (справа) модели

В соответствии с рис. 4, время формирования солитонов для одинаковых начальных задач в рамках рассматриваемых моделей существенно отличается: если слабонелинейное решение формируется за время порядка 10 ч, то для завершения формирования уединенной волны в рассматриваемой численной модели требуется существенно больший временной промежуток.

На рис. 5 представлена зависимость величины предельных амплитуд уединенных волн, генерируемых в полнонелинейной численной модели, от соотношения толщин слоев в симметричной трехслойной жидкости. Хорошей аппроксимацией для описания этой зависимости служит дуга параболы, обозначенная пунктирной линией на рис. 5 (R^2 – точность аппроксимации).

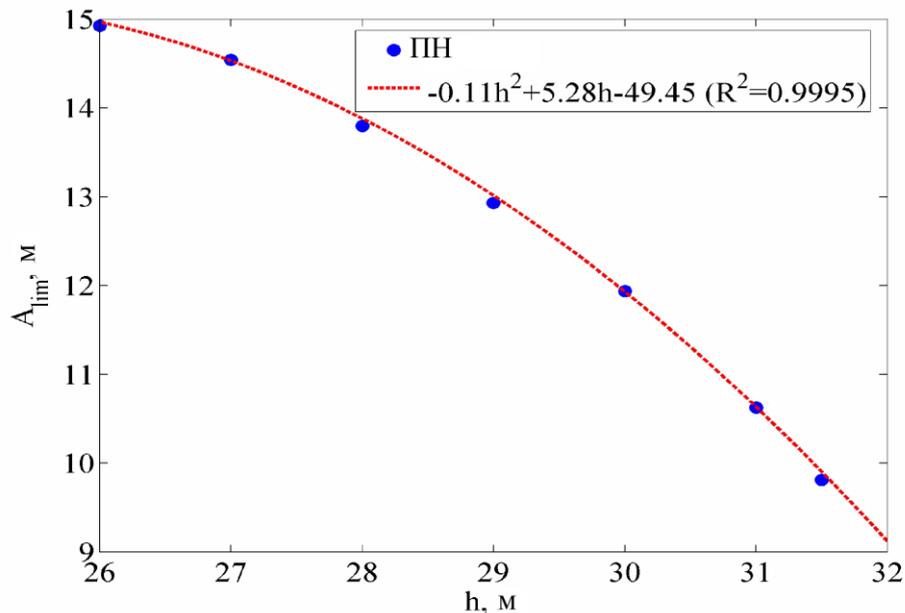


Рис. 5. Зависимость величины предельной амплитуды полнонелинейных уединенных волн от соотношения толщин слоев в симметричной трехслойной жидкости

Свойства уединенных внутренних волн при фиксированном соотношении толщин слоев в симметричной трехслойной жидкости

Величины основных характеристик генерируемых уединенных внутренних волн, таких как скорость, масса, энергия, предельная амплитуда, зависят не только от сочетания условий в жидкости, но и от формы, массы, энергии импульса начального возмущения. В предыдущем параграфе варьировалось соотношение толщин слоев в симметричной трехслойной среде, в настоящем параграфе будут исследованы уединенные внутренние волны, обладающие разными амплитудами (от малых до предельной) и распространяющиеся в жидкости с единой стратификацией плотности (соответствующей № 6 из табл. 1). Солитоны разных амплитуд были получены варьированием массы начального возмущения, определяемого формулой (7).

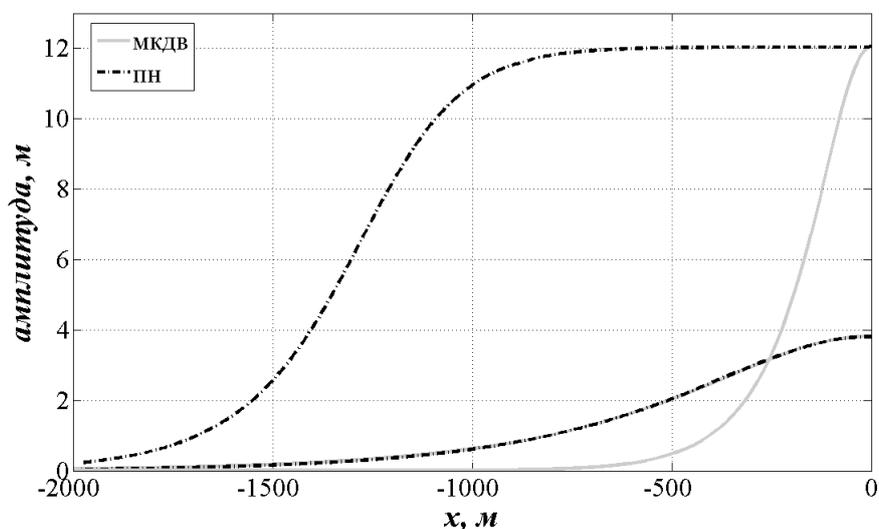


Рис. 6. Сравнение формы полнонелинейных (ПН) уединенных внутренних волн и солитонов уравнения мКдВ одинаковых амплитуд (для солитонов умеренной амплитуды кривые практически совпадают)

Закономерным результатом проведенной серии численных экспериментов стал вывод о том, что при малых амплитудах форма полнонелинейных уединенные внутренних волн хорошо описывается солитонами уравнения мКдВ, тогда как при приближении к предельной амплитуде их вид существенно отличается (рис. 6).

Перейдем от качественной демонстрации формы решения к количественным оценкам параметров уединенных волн и их сравнению с солитонами уравнения мКдВ. На рис. 7 видно, что хорошая согласованность результатов при малых амплитудах в рамках рассматриваемых моделей проявляется также и в близости зависимостей скорости и ширины от амплитуды для уединенных волн. Ширина уединенной волны определялась на уровне полуамплитуды.

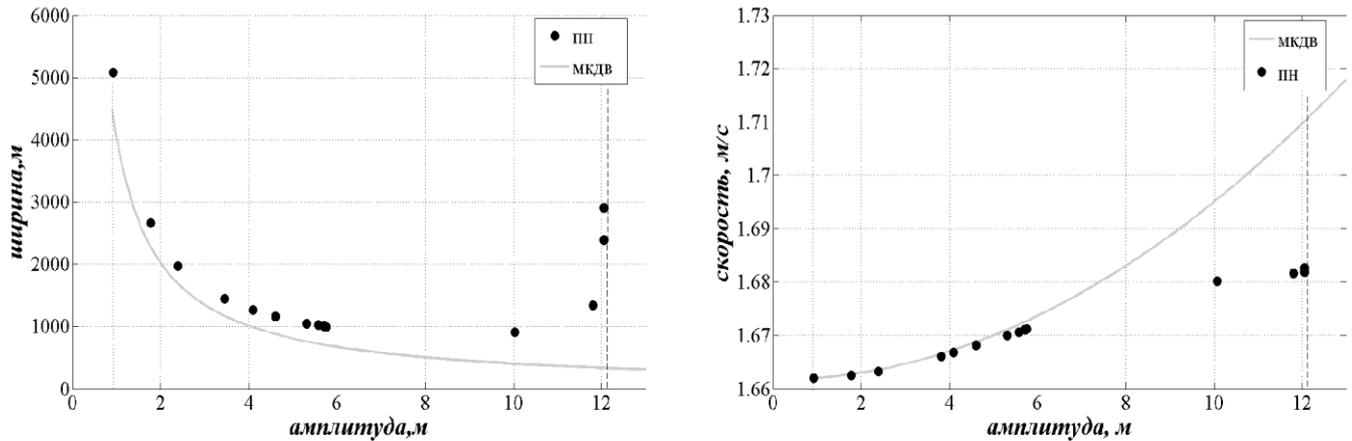


Рис. 7. Сравнение ширины (слева) и скорости (справа) полнонелинейных (ПН) уединенных внутренних волн и солитонов уравнения мКдВ одинаковых амплитуд

Масса солитона понимается как

$$M_{sol} = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta(X, T) dx, \tag{12}$$

а энергия выражается формулой

$$E_{sol} = \int_{-\infty}^{+\infty} \eta^2(X, T) dx. \tag{13}$$

Для односолитонных решений уравнения мКдВ выражения (12)-(13) примут вид

$$M_{sol} = \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}} \pi, E_{sol} = 2a \sqrt{\frac{6\beta}{\alpha_1}}. \tag{14}$$

Поскольку по определению солитон существует в бесконечной области, а в случае численного интегрирования расчетная область ограничена, оценим относительную погрешность интегральных величин (12) и (13), связанную с заменой бесконечной области интегрирования конечным отрезком. Было экспериментально установлено, что профиль полнонелинейной уединенной волны убывает быстрее, чем у солитона уравнения мКдВ. Поскольку для солитона уравнения мКдВ погрешность, связанная с ограничением расчетной области, вычисляется точно, то можно говорить о верхней оценке такой погрешности для уединенных волн, полученных в ходе численных экспериментов.

Верхняя оценка относительной погрешности вычисления массы уединенной волны, ограниченной областью $[-l_1; l_1]$ (центр масс солитона считается находящимся в точке $x = 0$), определяется выражением

$$\delta_{xM} = 2 - \frac{4}{\pi} \operatorname{arctg} \left(e^{\left(\sqrt{\frac{\alpha_1 a^2}{6\beta}} l_1 \right)} \right). \quad (15)$$

Верхняя оценка относительной погрешности вычисления энергии уединенной волны имеет вид

$$\delta_{xE} = 1 - \operatorname{th} \left(\sqrt{\frac{\alpha_1 a^2}{6\beta}} l_1 \right). \quad (16)$$

Вычисление величин (15) и (16) показало, что для генерируемых в ходе численных экспериментов уединенных волн относительные погрешности вычисления массы и энергии (рис. 8) составляют менее 1%.

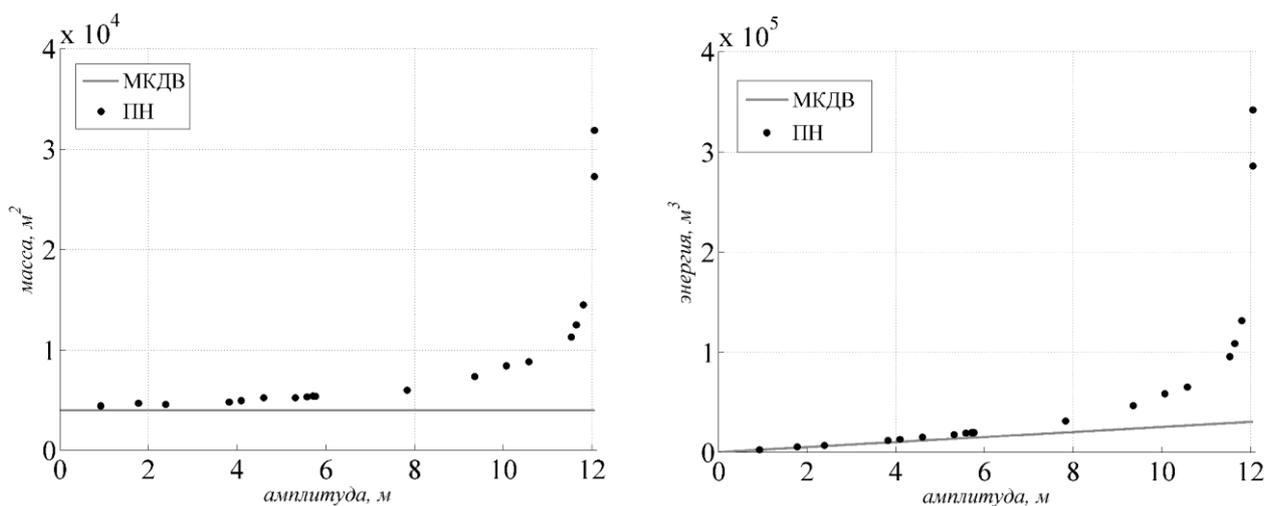


Рис. 8. Сравнение массы (слева) и энергии (справа) ПН уединенных внутренних волн и солитонов уравнения мКдВ одинаковых амплитуд

Заключение

В настоящей работе методом численного интегрирования примитивных уравнений гидродинамики невязкой несжимаемой стратифицированной жидкости продемонстрировано существование широких солитоноподобных волн в среде с нулевой квадратичной нелинейностью, исследованы свойства уединенных волн в такой среде, определена предельная амплитуда. Сравнение результатов моделирования с решениями уравнения мКдВ показывает, что область применимости последнего для количественных оценок характеристик уединенных волн узка (в симметричной трехслойной жидкости с параметрами стратификации плотности № 6 из табл. 1 хорошая согласованность результатов наблюдается только для волн с амплитудами менее 5 м). Однако предсказания слабнонелинейной теории относительно возможности существования солитонов оказываются достаточно точными. Прогнозирование количества солитонов в составе решения начальной задачи с помощью уравнения мКдВ приводит к переоценке числа уединенных волн. Время генерации солитонов из начального импульса в рамках слабнонелинейной теории оказывается существенно меньшим по сравнению со временем генерации уединенных волн в рамках аналогичной начальной задачи для рассматриваемой полнонелинейной модели.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы» и гранта РФФИ 10-05-00199.

Библиографический список

1. **Lamb, K.G.** Conjugate flows for a three-layer fluid // *Phys. Fluids*. 2000. V. 12. No. 9. P. 2169–2185.
2. **Rusas, P.-O.** Solitary waves and conjugate flows in three-layer fluid / P.-O. Rusas, J. Grue // *Eur.J. Mech.B-Fluids*. 2002. V. 21. P. 185–206.
3. **Lamb, K.G.** Extreme internal solitary waves in the ocean: Theoretical considerations // Preprint University of Waterloo. 2006. P. 109–117.
4. Stability properties and nonlinear mappings of two and three-layer stratified flows / L. Chumakova [at al.] // *Studies in Applied Mathematics*. 2009. V. 122 (2). P. 123-137//
5. Higher-order (2+4) Korteweg-de Vries - like equation for interfacial waves in a symmetric three-layer fluid / O.E. Kurkina [at al.] // *Phys. Fluids*. 2011. 23. 116602.
6. **Mercier, M.J.** Resurrecting dead-water phenomenon / M.J. Mercier, R. Vasseur, T. Dauxois // *Nonlin. Processes Geophys.* 2011. V. 18. P. 193–208.
7. **Leppäranta, M.** *Physical Oceanography of the Baltic Sea/ M. Leppäranta, K. Myrberg / Springer Praxis, Berlin Heidelberg New York, 2009. – 378 p.*
8. Convex and concave types of second baroclinic mode internal solitary waves / Y.J. Yang [at al.] // *Nonlin. Process. Geophys.* 2010. 17. 605.
9. **Lamb, K.** Numerical experiments of internal wave generation by strong tidal flow across a finite amplitude bank edge // *J. Geoph. Res.*, 1994. V. 99 C1. P. 843-864.
10. A method for computing unsteady fully nonlinear interfacial waves/ J. Grue [at al.] // *J. Fluid Mech.*, 1997. V. 351. P. 223.
11. Hydrostatic, quasi-hydrostatic, and nonhydrostatic ocean modeling / J. Marshall [at al.] // *J. Geophysical Res.* 1997. V. 102(C3). No. 37. P. 5753–5766.
12. **Brown, D. J.** Fully Nonlinear Solitary Waves in Continuously Stratified Incompressible Boussinesq Fluids / D. J. Brown, D.R. Christie // *Phys.Fluids*, 1998. V. 10. P. 2569–2586.
13. Nonlinear internal waves forced by tides near the critical latitude/ V. Vlasenko [at al.] // *Deep-Sea Research I*, 2003. V. 50. P. 317–338.
14. **Канарская, Ю. В.** Негидростатическая модель стратифицированных течений со свободной поверхностью: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. - Киев. 2004.
15. **Grimshaw, R.** The modified Korteweg – de Vries equation in the theory of large –amplitude internal waves / R. Grimshaw, E. Pelinovsky, T. Talipova // *Nonlin. Processes Geophys.* 1997. V. 4. P. 237–250. doi:10.5194/npg-4-237-1997.
16. **Полухина, О.Е.** Обобщенное уравнение Кортевега-де Вриза в теории нелинейных внутренних волн в стратифицированных потоках: дисс. ... канд. физ.-мат. наук. - Н.Новгород. 2002.
17. **Рувинская, Е.А.** Уточненное нелинейное эволюционное уравнение для внутренних гравитационных волн в трехслойной симметричной жидкости / Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева*. 2010. № 4(83). С. 30-39.
18. Динамика солитонов неинтегрируемой версии модифицированного уравнения Кортевега - де Вриза / О.Е. Куркина [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. 2012. Т. 95. № 2. С. 98-103.
19. **Lamb, K.** Numerical simulations of stratified inviscid flow over a smooth obstacle // *J. Fluid Mech*, 1994. V. 260. P. 1–22.
20. **Lamb, K.** The evolution of internal wave undular bores: comparisons of a fully nonlinear numerical model with weakly nonlinear theory / K.Lamb, L. Yan // *J. Phys. Oceanography*. 1996. V. 26. P. 2712–2734.
21. **Власенко, В. И.** Исследование структуры уединенных внутренних волн большой амплитуды / В. И. Власенко, П. Брандт, А. Рубино // *Морской гидрофиз. журнал*, 2000. Т. 5. С. 15–31.
22. **Рувинская, Е.А.** Исследование структуры уединенных внутренних волн большой амплитуды в трехслойной жидкости / Е.А. Рувинская, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // *Вестник МГОУ. Сер. Физика-математика*. 2011. № 2. С. 61–74.

23. On the generation of solitons and breathers in the modified Korteweg – de Vries equation / S. Clarke [at al.] // Chaos. 2000. V. 10. No. 2. P. 383–392.

*Дата поступления
в редакцию 09.08.2012*

E.A. Rouvinskaya

**PROPERTIES OF INTERNAL SOLITARY WAVES IN A THREE-LAYER FLUID:
A COMPARISON OF MODELS**

National Research University Higher School of Economics

Purpose: The goal of this study is to determine the properties of localized stationary internal gravity waveforms in a symmetric three-layer fluid.

Approach: The investigation is carried out in the framework of the numerical simulation of the two-dimensional (vertical plane) fully nonlinear Euler equations for incompressible stratified fluid under the Boussinesq approximation and modified Korteweg–de Vries equation.

Findings: The dependence of the number of internal solitary waves generated from the same initial disturbance on the layer thickness' ratio is analyzed for both models. The values of solitary waves' limiting amplitudes depending on the combination of fluid conditions are found. The amplitude-width, amplitude-velocity, mass-amplitude, and energy-amplitude relations are studied for fixed density stratification parameters.

Conclusions: The weakly-nonlinear theory can predict the wave regime (existence/absence of solitary waves), describes well the shape and properties of small amplitude solitons, yet overestimates the number of generated solitary interfacial waves.

Key words: modified Korteweg–de Vries equation, numerical modeling, fully nonlinear Euler equations.

УДК 537.86

Н.В. Асеева, Е.М. Громов, В.В. Тютин

ДИНАМИКА СОЛИТОНОВ В СРЕДАХ С ВЫНУЖДЕННЫМ ПРОСТРАНСТВЕННЫМ РАССЕЯНИЕМ РАМАНА И НЕОДНОРОДНОСТЬЮ ДИСПЕРСИИ И ВНЕШНЕГО ПОТЕНЦИАЛА

Национальный исследовательский университет Высшая школа экономики

Цель работы: Исследована динамика солитонов огибающей в рамках расширенного уравнения Шредингера $2i \frac{\partial U}{\partial t} + q(\xi) \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha U|U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} + F(\xi)U = 0$ при учете кубичной нелинейности α , нелокальной нелинейности (вынужденное пространственное рассеяние Рамана) μ , плавной неоднородности дисперсии второго порядка $q(\xi)$ и неоднородности добавочного внешнего потенциала $F(\xi)$.

Научный подход: Исследование проведено как численно, так и аналитически. В аналитической теории шесть интегралов исходного модельного уравнения удалось свести к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений, в которой анализировалась структура фазового пространства.

Результат: Показано, что сдвиг вниз волнового числа из-за рассеяния Рамана компенсируется сдвигом волнового числа вверх из-за неоднородности дисперсии второго порядка при увеличении линейной дисперсии второго порядка, или при увеличении внешнего потенциала. Как аналитически, так и численно, найдены квазисолитонные решения с малоизменяющимся спектром волнового числа, амплитудой и протяженностью. Такие солитоны существуют в результате равновесия эффектов вынужденного рассеяния Рамана и возрастания дисперсии второго порядка, или возрастания внешнего потенциала. Дано подробное описание режима динамического равновесия рассеяния Рамана и неоднородности среды, приводящее к периодическому изменению параметров солитона. В этом режиме аналитические и численные результаты взаимно согласованы.

Новизна: Результаты исследования новы и могут иметь практическое приложение для оптических волоконных линий связи с индуцированным рассеянием Рамана, переменной дисперсией второго порядка и (или) переменным внешним потенциалом.

Ключевые слова: расширенное уравнение Шредингера, солитон, нелокальная нелинейность, пространственное вынужденное рассеяние Рамана, неоднородность, линейная дисперсия второго порядка, внешний потенциал.

Введение

В настоящее время велик интерес к солитонам благодаря их способности распространяться на значительные расстояния, сохраняя свою форму, и переносить энергию без потерь. Солитонные решения предполагают интенсивные волновые поля при распространении в диспергирующих средах, присутствуют во многих нелинейных моделях и разных областях физики: оптические импульсы в волоконных линиях связи, электромагнитные волны в плазме, поверхностные волны на глубокой воде [1–4].

Распространение высокочастотных волновых пакетов достаточно малой интенсивности описываются во втором приближении теории дисперсии нелинейных волн. Базовым уравнением в этом порядке теории является нелинейное уравнение Шредингера (НУШ) [5–6], включающее как дисперсию второго порядка, так и кубичную нелинейность (фазовую самомодуляцию). Солитонное решение в этом случае существует в результате равновесия дисперсионного расплывания и нелинейного сжатия волнового пакета.

Динамика высокочастотных волновых пакетов высокой интенсивности описывается в третьем порядке теории дисперсии нелинейных волн, учитывающем члены третьего порядка [1]: нелинейную дисперсию (само – укручение) [7], вынужденное рассеяние Рамана [8–10] и дисперсию третьего порядка. Базовым уравнением в этом порядке теории является нелинейное уравнение Шредингера третьего порядка (НУШ-3) [10–14]. В частности, в нелинейных сре-

дах без вынужденного рассеяния Рамана, базовым является НУШ-3 без вынужденного рассеяния Рамана [19]. В [15–22] найдено солитонное решение НУШ-3 без вынужденного рассеяния Рамана. Такие солитоны существуют в результате равновесия дисперсии второго порядка и нелинейной дисперсии. В [23–24] найдены стационарные волны перепада в рамках НУШ-3 при наличии вынужденного рассеяния Рамана. Такие волны существуют в результате равновесия нелинейной дисперсии и вынужденного рассеяния Рамана. Для локализованных волновых пакетов (в т.ч. солитонов) учет вынужденного рассеяния Рамана приводит к переводу вниз спектра солитона [8–10], постоянному разрушению солитона во время его распространения.

Вынужденное рассеяние Рамана во временном представлении описывает запаздывание нелинейного отклика и соответствует возбуждению внутренних временных квантовых колебаний частотой Ω парой внешних высокочастотных полей частот ω_1 и ω_2 : $\omega_1 - \omega_2 = \Omega$. Вынужденное рассеяние Рамана приводит к понижению частоты волнового пакета [8, 9]. Компенсация вынужденного рассеяния Рамана линейным излучением волнового поля из области солитона рассмотрено в [25]. Компенсация вынужденного рассеяния Рамана в неоднородной среде рассмотрена в следующих случаях: в средах с периодической дисперсией второго порядка [26–27], в средах со смещением точки перегиба дисперсионной характеристики [28] и в оптических волокнах с уменьшающейся дисперсией [29].

Вынужденное рассеяние Рамана в пространственном представлении (пространственное вынужденное рассеяние Рамана) описывает нелокальность нелинейного отклика среды и соответствует возбуждению внутренних пространственных квантовых колебаний с волновым числом χ парой внешних волновых полей с волновыми числами k_1 и k_2 : $k_1 - k_2 = \chi$ (например, кристаллическая среда с характерным внутренним пространственным масштабом). Вынужденное пространственное рассеяние Рамана приводит к уменьшению волнового числа волнового пакета. В то же время, неоднородность дисперсии второго порядка приводит к изменению волнового числа волнового пакета. В частности, в плавно неоднородных средах скорость изменения волнового числа описывается хорошо известным уравнением геометрической оптики $\dot{k} = -\partial\omega/\partial\xi$, где $\omega = \omega(k, \xi)$ - закон линейной дисперсии. При неоднородной дисперсии второго порядка $q(\xi) = -\partial^2\omega/\partial k^2$ скорость изменения волнового числа пропорциональна градиенту дисперсии $\dot{k} = (\partial q/\partial\xi)(k - k_0)^2/2$ и при $\partial q/\partial\xi > 0$ волновое число возрастает. Равновесие пространственного вынужденного рассеяния Рамана и возрастающей дисперсии второго порядка приводит к стабилизации спектра волнового числа волнового пакета (в т.ч. - солитона) (рис. 1).

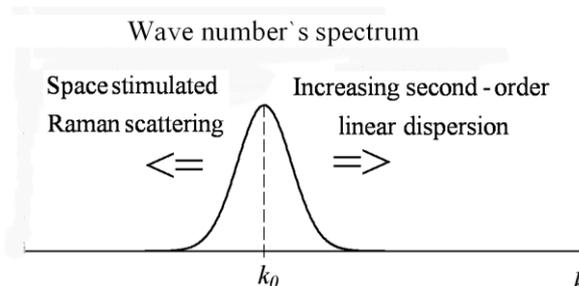


Рис. 1. Баланс уменьшения волнового числа вынужденным рассеянием Рамана и увеличения волнового числа возрастающей дисперсией второго порядка приводит к стабилизации спектра волнового числа солитона

При дисперсионном соотношении $\omega(k, \xi) = \omega(k) - F(\xi)$ с добавочным внешним неоднородным потенциалом $F(\xi)$ скорость изменения волнового числа пропорциональна гради-

енту внешнего потенциала $\dot{k} = \partial F / \partial \xi$ и при $\partial F / \partial \xi > 0$ волновое число возрастает. Равновесие вынужденного пространственного рассеяния Рамана и возрастающего внешнего потенциала также приводит к стабилизации спектра волнового числа волнового пакета (в т.ч. – солитона).

В данной работе рассмотрена динамика солитонов в средах с вынужденным пространственным рассеянием Рамана и с неоднородностью как дисперсии второго порядка, так и внешнего потенциала. Найдено квазисолитонное решение с малыми периодическими изменениями добавочного волнового числа, амплитуды и протяженности. Такой солитон существует в результате равновесия вынужденного пространственного рассеяния Рамана и возрастающей дисперсии второго порядка, или возрастающего внешнего потенциала. Получены условия динамического равновесия вынужденного пространственного рассеяния Рамана и неоднородности среды, соответствующие периодическому изменению параметров солитона.

Базовое уравнение и его интегралы

Рассмотрим динамику высокочастотного волнового поля $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$ в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера с нелокальной нелинейностью (вынужденного пространственного рассеяния Рамана), неоднородностью дисперсии второго порядка и неоднородностью внешнего потенциала:

$$2i \frac{\partial U}{\partial t} + q(\xi) \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha U |U|^2 + \mu U \frac{\partial (|U|^2)}{\partial \xi} + F(\xi)U = 0, \quad (1)$$

где использованы следующие обозначения при учете нелинейного дисперсионного закона $\omega = \omega(k, |U|^2)$: $q = -\partial^2 \omega / \partial k^2$ - параметр дисперсии второго порядка; $\alpha = -\partial \omega / \partial (|U|^2)$ - параметр самомодуляции (кубичной нелинейности); μ - параметр нелокальной нелинейности (вынужденного пространственного рассеяния Рамана).

Уравнение (1) при нулевом условии на бесконечности $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$ имеет следующие интегралы:

- скорость изменения “массы” (так называемые числа квантов) волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} K |U|^2 d\xi, \quad (2)$$

- скорость изменения импульса волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} K |U|^2 d\xi = -\frac{\mu}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial q}{\partial \xi} \left| \frac{\partial U}{\partial \xi} \right|^2 d\xi + \frac{1}{2} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial F}{\partial \xi} |U|^2 d\xi, \quad (3)$$

- скорость изменения квадрата модуля градиента волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left| \frac{\partial U}{\partial \xi} \right|^2 d\xi = -\mu \int_{-\infty}^{+\infty} K \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi + \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial F}{\partial \xi} K |U|^2 d\xi + \alpha \int_{-\infty}^{+\infty} K \frac{\partial |U|^4}{\partial \xi} d\xi, \quad (4)$$

- скорость изменения квадрата градиента интенсивности волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi = 2 \int_{-\infty}^{+\infty} q \frac{\partial^2 |U|^2}{\partial \xi^2} \frac{\partial (K |U|^2)}{\partial \xi} d\xi, \quad (5)$$

- скорость изменения квадрата интенсивности волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^4 d\xi = -2 \int_{-\infty}^{+\infty} q |U|^2 \frac{\partial (K |U|^2)}{\partial \xi} d\xi, \quad (6)$$

- скорость перемещения ядра волнового поля

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi = \int_{-\infty}^{\infty} qK |U|^2 d\xi, \tag{7}$$

где $U = |U| \exp(i\varphi)$, $K = \partial\varphi / \partial\xi$ - добавочное локальное волновое число волнового пакета.

Аналитические результаты

При аналитическом исследовании динамики солитонов примем, что масштаб пространственной неоднородности дисперсии второго порядка много больше масштаба огибающей солитона $L_q \gg L_{|U|}$ и будем приближенно считать пространственные изменения

волнового числа в области центра «масс» солитона $\bar{\xi} = N^{-1} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi$, где $N = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\xi$ - линейная функция $K(\xi, t) = k(t) + k_1(t)(\xi - \bar{\xi})$. При условии $(\partial|U(\xi, t)| / \partial\xi)_{\bar{\xi}} = 0$ выразим мнимую часть уравнения (1):

$$\left(\frac{\partial K(\xi, t)}{\partial \xi} \right)_{\bar{\xi}} = - \frac{2}{q(\bar{\xi}) |U(\bar{\xi}, t)|} \frac{\partial |U(\bar{\xi}, t)|}{\partial t}. \tag{8}$$

Пространственные изменения волнового числа солитона возникают из-за изменений амплитуды солитона во времени. Для солитоноподобного волнового пакета $N(t) \sim |U(\bar{\xi}, t)| \sqrt{q(\bar{\xi}) / \alpha(\bar{\xi})}$, учитывая (2), (7), имеем

$$K(\xi, t) = k(t) \left(1 - \frac{q'(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} (\xi - \bar{\xi}) \right), \tag{9}$$

где $q'(\bar{\xi}) = (\partial q / \partial \xi)_{\bar{\xi}}$ - градиент дисперсии второго порядка в области центра «масс» волнового пакета. Приняв, что масштаб пространственной неоднородности внешнего потенциала много больше масштаба неоднородности огибающей волнового пакета $L_F \gg L_{|U|}$, и при учете (9) система (2)–(7) принимает вид

$$\frac{dN}{dt} = q'(\bar{\xi}) k(t) N, \tag{10}$$

$$\frac{dk(t)}{dt} = -\frac{\mu}{2} \frac{I}{N} + \frac{1}{2} q'(\bar{\xi}) \frac{Z}{N} + \frac{1}{2} F' - q'(\bar{\xi}) k^2(t), \tag{11}$$

$$\frac{dZ}{dt} = -\mu k(t) I + F'(\bar{\xi}) k(t) N + \alpha k \frac{q'(\bar{\xi})}{q(\bar{\xi})} M, \tag{12}$$

$$\frac{dI}{dt} = 2k(t) q'(\bar{\xi}) I, \tag{13}$$

$$\frac{dM}{dt} = 2k(t) q'(\bar{\xi}) M, \tag{14}$$

$$\frac{d\bar{\xi}}{dt} = k(t) q(\bar{\xi}), \tag{15}$$

где $F'(\bar{\xi}) = (\partial F / \partial \xi)_{\bar{\xi}}$ - градиент внешнего потенциала в центре «масс» волнового пакета;

$Z = \int_{-\infty}^{\infty} |\partial U / \partial \xi|^2 d\xi$, $I = \int_{-\infty}^{\infty} (\partial |U|^2 / \partial \xi)^2 d\xi$, $M = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi$. Состояние равновесия системы (10)–(15) существует при выполнении следующих условий:

$$\mu I_0 = q'(\bar{\xi}) Z_0 + F'(\bar{\xi}) N_0, k = 0, \quad (16)$$

где $N_0 = N(0)$, $Z_0 = Z(0)$, $I_0 = I(0)$ – начальные интегральные параметры волнового пакета. Соотношение (16) выполняется при условии $q'(\bar{\xi}) Z_0 + F'(\bar{\xi}) N_0 > 0$. Для анализа динамики волнового пакета с неравновесными параметрами мы примем, что и дисперсия и потенциал являются линейными по пространству функциями $q'(\bar{\xi}) = q' = \text{const}$, $F'(\bar{\xi}) = F' = \text{const}$. При учете $d(q^{-1}(\bar{\xi})) / dt = -kq'(\bar{\xi}) / q(\bar{\xi})$ и используя замену переменных $\tau = tq' / 2$, $p = \mu I_0 / (q' N_0)$, $\delta(\bar{\xi}) = \alpha M_0 / (q(\bar{\xi}) N_0)$, $M_0 = M(0)$, $\sigma = F' / q'$, $n = N / N_0$, $z = Z / N_0$, $m = M / M_0$, $i = I / I_0$, система (10)–(15) приводится к виду

$$\frac{dn}{d\tau} = kn, \quad (17)$$

$$\frac{dk}{d\tau} = -\frac{p}{2} \frac{i}{n} + \frac{1}{2} \frac{z}{n} + \frac{\sigma}{2} - k^2, \quad (18)$$

$$\frac{dz}{d\tau} = -kpi + k\sigma n + k\delta m, \quad (19)$$

$$\frac{di}{d\tau} = 2ki, \quad (20)$$

$$\frac{dm}{d\tau} = 2km, \quad (21)$$

$$\frac{d\delta}{d\tau} = -k\delta. \quad (22)$$

Величины n , z , m , i и δ в (17)–(22) связаны соотношениями

$$\frac{z}{n} = -\frac{p}{2} n + \frac{w}{2n} + (\sigma + \delta_0), \quad i = n^2, \quad m = n^2, \quad \delta = \frac{\delta_0}{n}, \quad (23)$$

где $w = 2z_0 + p - 2\sigma - 2\delta_0$, $\delta_0 = \alpha M_0 / (q_0 N_0)$. При учете (23) система (17)–(22) приводится к системе двух уравнений:

$$\frac{dk}{d\tau} = -\frac{3p}{4} n + \frac{w}{4n} - k^2 + \frac{\lambda}{2}, \quad (24)$$

$$\frac{dn}{d\tau} = kn, \quad (25)$$

где $\lambda = 2\sigma + \delta_0$. Первый интеграл системы (24)–(25) имеет вид

$$pn^3 + n^2(2k^2 - \lambda) - wn = 2k_0^2 - 2z_0 + \delta_0. \quad (26)$$

Структура фазовой плоскости системы (24)–(25) определяется параметрами p , λ и w .

Траектории волнового пакета

На рис. 2 показаны на плоскости параметров (λ, w) возможные виды фазовой плоскости системы (24)–(25) при $p > 0$ (возрастающая дисперсия второго порядка). При $w > 0$ система (24)–(25) имеет состояние равновесия типа центр

$$k_* = 0, n_{*1} = \frac{\lambda}{3p} + \sqrt{\left(\frac{\lambda}{3p}\right)^2 + \frac{w}{3p}}. \quad (27)$$

Частота колебаний параметров волнового пакета в окрестности состояния равновесия (27) равна $\omega^2 = (w + n_{*1}(2\sigma + \delta_0)) / (2n_{*1})$. При $\begin{cases} w = 0, \\ \lambda > 0 \end{cases}$ система (24)–(25) – состояние равновесия типа центр $(k_* = 0, n_* = 2\lambda / (3p))$ и два седла $(k_* = \pm\sqrt{\lambda/2}, n_* = 0)$, при $\lambda > \sqrt{-3pw}$ – центр $(k_* = 0, n_{*1})$ и седло

$$k_* = 0, n_{*2} = \frac{\lambda}{3p} - \sqrt{\left(\frac{\lambda}{3p}\right)^2 + \frac{w}{3p}}, \quad (28)$$

при $\lambda = \sqrt{-3pw}$ – одно состояние типа седло-центр $(k_* = 0, n_* = \lambda / (3p))$. При $\lambda < \sqrt{-3pw}$ система не имеет состояний равновесия.

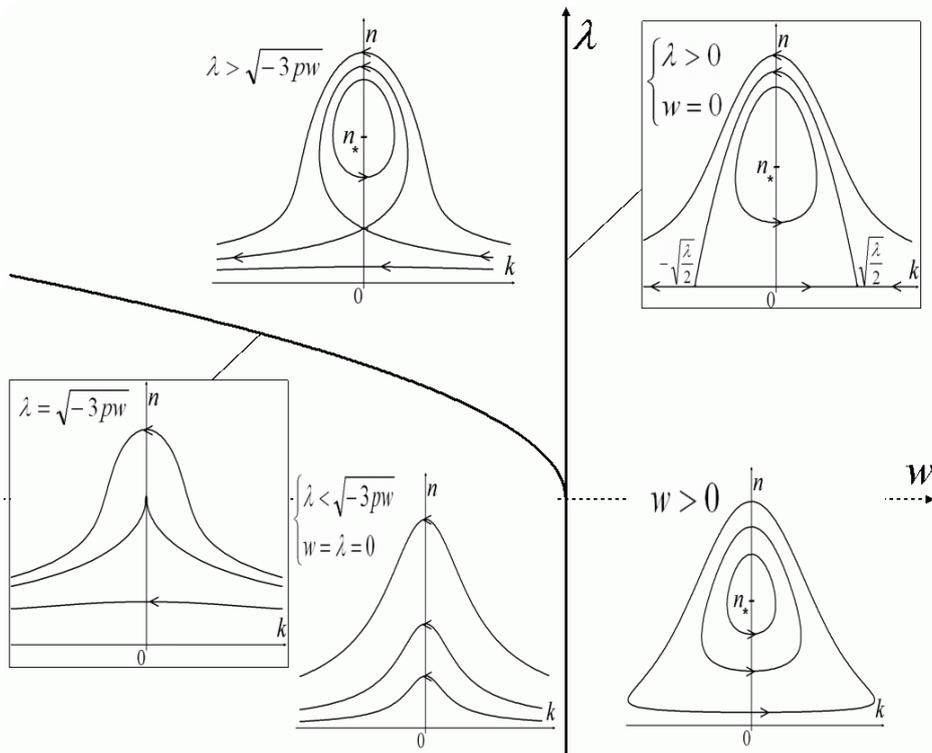


Рис. 2. Виды фазовой плоскости системы (24)–(25) на плоскости параметров (λ, w) при $p > 0$

На рис. 3 показаны на плоскости параметров (λ, w) различные виды фазовой плоскости системы (24)–(25) при $p < 0$ (уменьшающая дисперсия второго порядка). При $\lambda < -\sqrt{-3pw}$ система (24)–(25) имеет состояние равновесия типа седло $(k_* = 0, n_{*2})$ и центр $(k_* = 0, n_{*1})$, при $w < 0$ – седло $(k_* = 0, n_{*2})$, при $\begin{cases} w = 0, \\ \lambda < 0 \end{cases}$ – седло $(k_* = 0, n_{*2})$, при $\begin{cases} w = 0, \\ \lambda > 0 \end{cases}$ – два седла $(k_* = \pm\sqrt{\lambda/2}, n_* = 0)$. При $\lambda > -\sqrt{-3pw}$ система не имеет состояний равновесия.

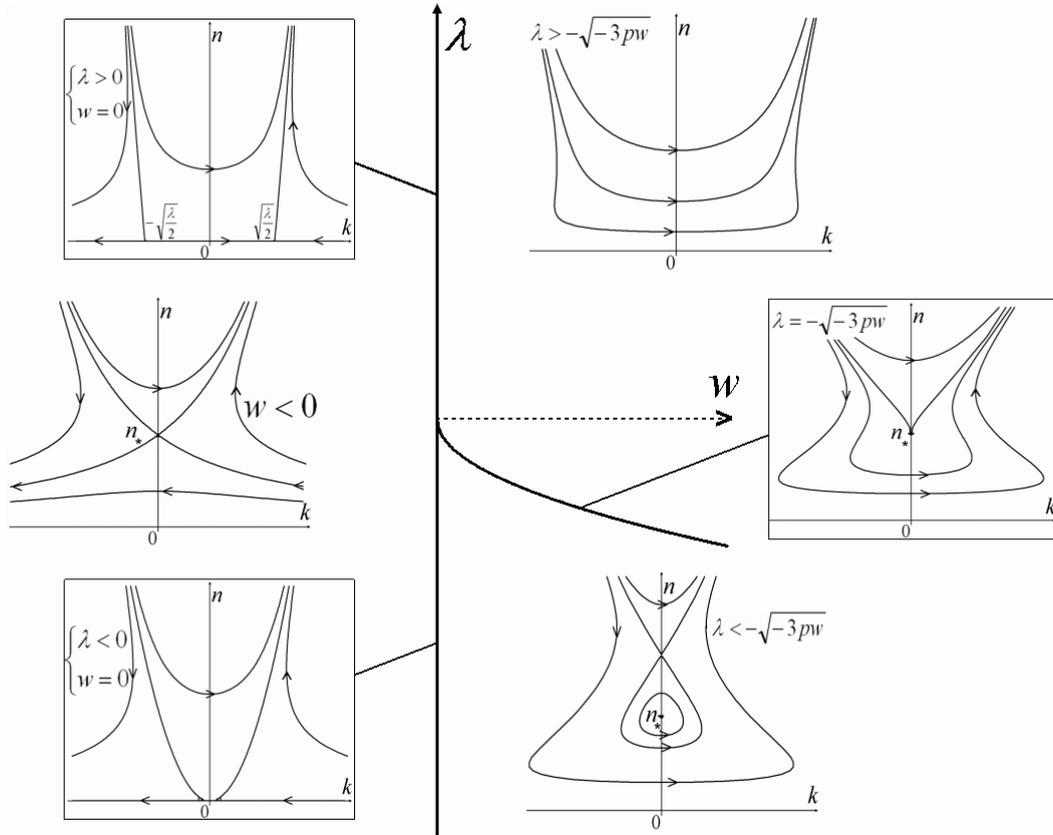


Рис. 3. Виды фазовой плоскости системы (24)–(25) на плоскости параметров (λ, w) при $p < 0$

Траектории солитона

Рассмотрим траектории (26) для волнового пакета с нулевым начальным волновым числом $k_0 = 0$ и с огибающей, соответствующей солитонному решению:

$$U(\xi, t = 0) = \frac{A_0}{\cosh(\xi A_0 \sqrt{\alpha/q_0})}, \quad (29)$$

где $q_0 = q(0)$. В этом случае, учитывая $z_0 = \delta_0/2 = \alpha A_0^2/(3q_0)$ и $n_0 = 1$, уравнение (26) приводится к виду

$$p_s n^2 + n(2k^2 - \lambda_s) + \lambda_s - p_s = 0, \quad (30)$$

где $\lambda_s = 2(\sigma + \alpha A_0^2/(3q_0))$, $p_s = 8\mu\alpha A_0^4/(15q'q_0)$.

На рис. 4 на плоскости (k, n) показаны соответствующие солитону траектории (30) при различных значениях p_s и λ_s . При $p_s = \lambda_s/2 > 0$ параметры начального волнового пакета (солитона) (29) совпадают с параметрами состояния равновесия и траектория солитона на плоскости (k, n) соответствуют начальной точке $(k_0 = 0, n_0 = 1)$. Равновесная величина параметра SSRS μ_* и амплитуда солитона A_* связаны следующим соотношением:

$$\mu_* A_*^4 = \frac{5}{8} \frac{q_0}{\alpha} \left(q' \frac{\alpha}{q_0} A_*^2 + 3F' \right). \quad (31)$$

Период осцилляций в окрестности состояния равновесия (31) в исходных величинах равен

$$T = \frac{4\pi}{\sqrt{2q'(F' + \alpha A_*^2 q'/(3q_0))}}.$$

При $0 < p_s < \lambda_s$ найдены локализованные траектории солитона. Они соответствуют динамическому равновесию вынужденного пространственного рассеяния Рамана и возрастающей дисперсии второго порядка. Движение по этим траекториям происходит против часовой стрелки. Условие динамического равновесия (периодическое изменение параметров солитона) в исходных переменных имеет вид

$$0 < \frac{4}{5} \frac{\alpha}{q_0} \mu A_0^4 < q' \frac{\alpha}{q_0} A_0^2 + 3F'. \quad (32)$$

Наибольшее значение волнового числа солитона на локализованной траектории из уравнения (30) равно $k_{\max} = \sqrt{\lambda_s/2 - \sqrt{p_s(\lambda_s - p_s)}}$. При $p_s = \lambda_s$ существует сепаратрисное решение: волновое число стремится к $-\sqrt{\lambda_s/2}$. При $p_s \leq 0$ волновое число солитона неограниченно возрастает из-за доминирования дисперсии второго порядка. При $p_s > \lambda_s$ волновое число солитона неограниченно убывает из-за доминирования вынужденного пространственного рассеяния Рамана.

При $\lambda_s < 0$ траектории солитона не локализованы (рис. 4, б): при $p_s < \lambda_s$ доминирует вынужденное пространственное рассеяние Рамана, и волновое число солитона неограниченно убывает; при $p_s > \lambda_s$ доминирует дисперсия второго порядка, и волновое число солитона неограниченно возрастает.

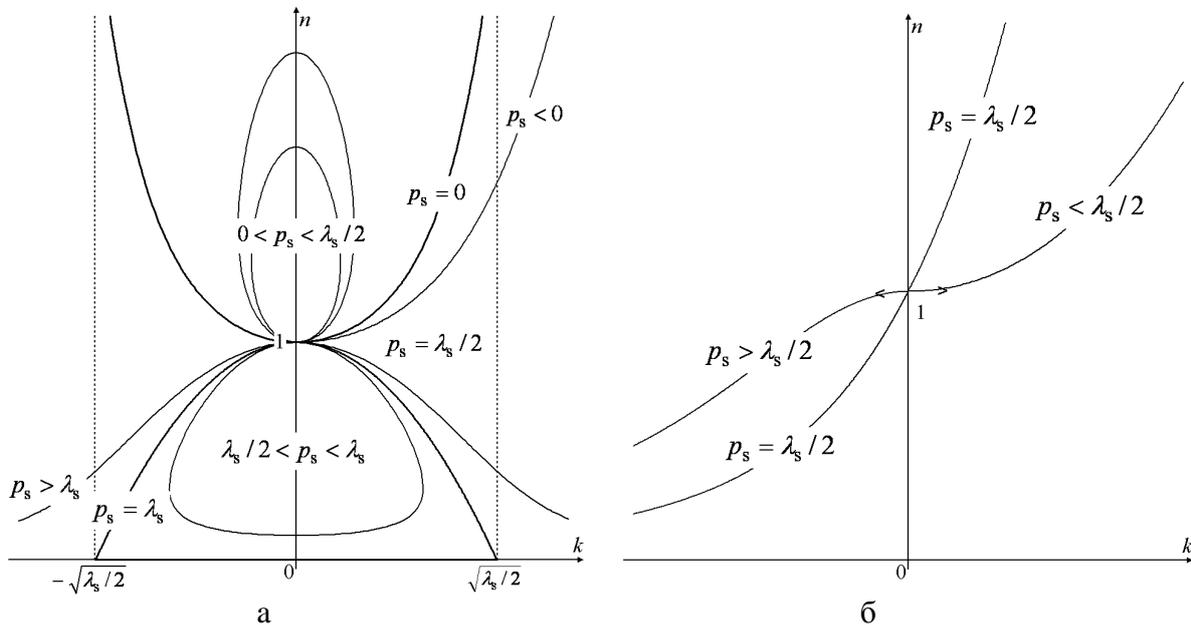


Рис. 4. Траектории (30), соответствующие солитону при различных λ_s и p_s :

$a - \lambda_s > 0$; $b - \lambda_s < 0$

Неоднородный потенциал

При $q' = 0$ система (10)–(15) приводится к уравнению

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{\mu}{2} \frac{I_0}{N_0} + \frac{1}{2} F'. \quad (33)$$

При $\mu = (\mu_*)_F = F'N_0/I_0$ волновое число волнового пакета не меняется во времени. Это соответствует равновесию между вынужденным рассеянием Рамана и возрастанием потенциала. При $\mu > (\mu_*)_F$ волновое число волнового пакета возрастает из-за доминирования вынуж-

денного рассеяния Рамана; при $\mu < (\mu_*)_F$ волновое число волнового пакета убывает из-за доминирования неоднородного потенциала $h\epsilon$.

Численное моделирование

Рассмотрим численно начальную задачу динамики волнового пакета

$$U(\xi, t = 0) = \frac{1}{\cosh \xi} \tag{34}$$

в рамках уравнения (1) при следующих значениях параметров: $\alpha = 1$, $q(\xi) = 1 + \xi/L_q$, $F(\xi) = \xi/L_F$, при различных значениях μ , L_q и L_F .

Неоднородность дисперсии

При $F(\xi) = 0$ и $(\mu_*)_q = 5/(8L_q)$ параметры исходного солитона (34) совпадают с параметрами равновесия между вынужденным рассеянием Рамана и дисперсии второго порядка. В частности, при $L_q = 20$: $(\mu_*)_q = 1/32$. На рис. 5 показано распределение огибающей солитона $|U|$ в зависимости от ξ в различные моменты времени при $\mu = 1/32$, $L_q = 20$ и $F(\xi) = 0$ в численном счете.

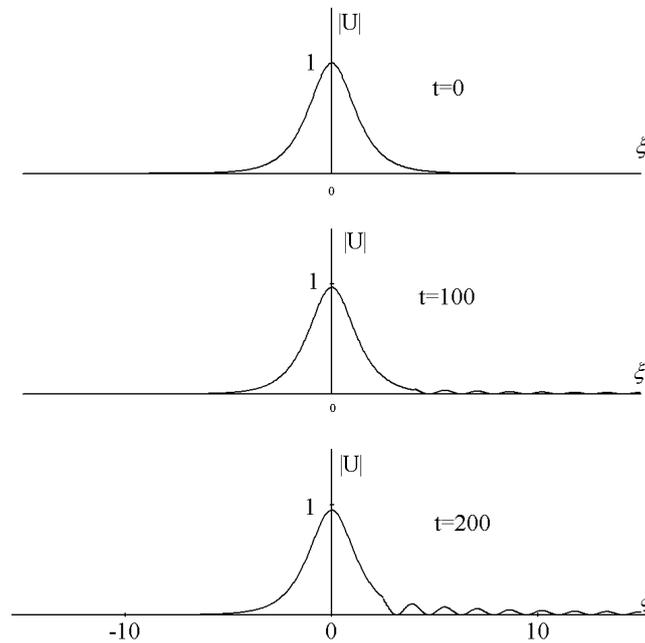


Рис. 5. Результаты численного эксперимента. Распределение огибающей солитона $|U|$ в различные моменты времени при $\mu = 1/32$, $L_q = 20$ и $F(\xi) = 0$

Динамика солитона характеризуется амплитудой линейного поля излучения при сохранении солитоноподобной формы импульса. При $\mu = 1/32$ локальное волновое число солитона остается неизменным. Это соответствует равновесию между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающей дисперсией второго порядка. Равновесная величина параметра вынужденного пространственного рассеяния Рамана находится в идеальном соответствии с аналитическим результатом $(\mu_*)_q = 1/32$. Изменение параметра μ приводит к изменению волнового. На рис. 6 показано пространственные распределения $|U|$ и ло-

кального волнового числа в различные моменты времени при $\mu = 1/24$, $L_q = 20$ и $F(\xi) = 0$. Волновое число в области ядра солитона изменяется медленно как линейная функция, что соответствует выражению (9).

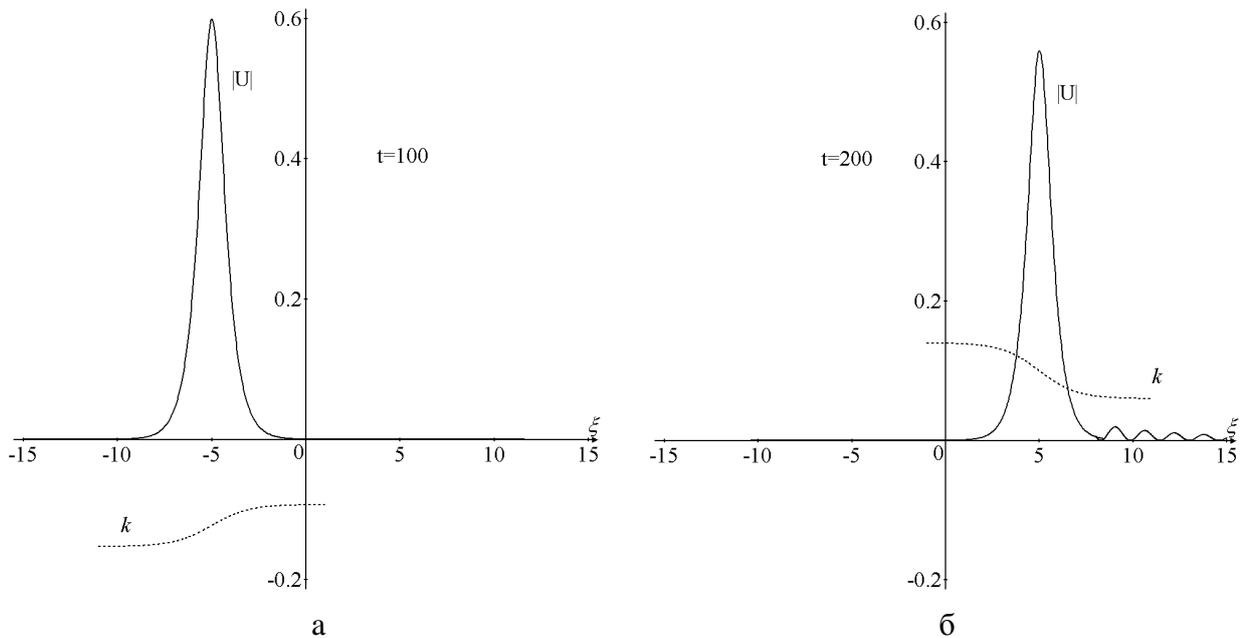


Рис. 6. Распределения модуля огибающей солитона $|U|$ в пространстве (непрерывная линия) и локального волнового числа солитона (прерывистая линия) при $\mu = 1/24$, $L_q = 20$, $F(\xi) = 0$ в различные моменты времени t : $a - t = 100$; $b - t = 200$

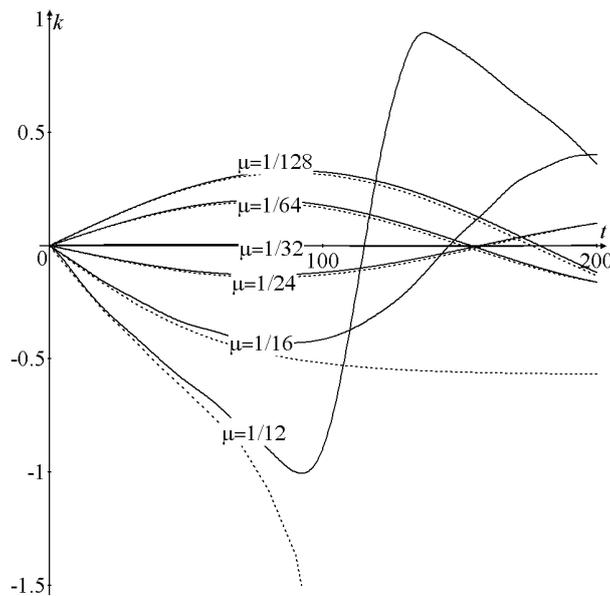


Рис. 7. Локальное волновое число солитона в точке максимума модуля огибающей солитона как функция t при $L_q = 20$, $F(\xi) = 0$ и при различных величинах μ :

- — результаты численного счета;
- — результаты аналитического исследования

На рис. 7 показаны величины локального волнового числа в координате максимума

модуля огибающей солитона $k(|U| = \max)$ в зависимости от t и при различных значениях μ . Непрерывной линией изображены результаты, полученные в численном эксперименте. Прерывистой линией изображены аналитические результаты динамики волнового числа солитона в рамках системы (24)–(25) при начальных условиях (34). При $\mu = 1/32$ локальное волновое число солитона не меняется во времени. Это соответствует равновесию между вынужденным пространственным равновесием Рамана и возрастающей дисперсией второго порядка. При $\mu > 1/16$ аналитические и численные результаты практически совпадают. При $\mu = 1/16$ аналитическая теория для системы (23)–(24) предполагает сепаратрисное решение (рис. 4, а). Наличие малых полей излучения в численном эксперименте приводит к постоянному слабому уменьшению параметра p_s и вместо нелокализованной сепаратрисной траектории, приводит к локализованной траектории. При $\mu > 1/16$ аналитическая теория приводит к нелокализованной траектории (рис. 4, а), что принципиально отлично от соответствующего численного результата. Это обусловлено увеличением поля излучения из области ядра солитона при больших изменениях волнового числа солитона.

Неоднородность одновременно дисперсии и потенциала

При одновременной неоднородности и дисперсии потенциала параметры исходного волнового пакета (34) совпадают с параметрами состояния равновесия системы (24)–(25) при условии $p_* = \sigma + 1/3$, что соответствует

$$(\mu_*)_{q,F} = \frac{5}{8} \left(\frac{1}{L_q} + \frac{3}{L_F} \right). \quad (35)$$

Динамика волнового числа солитона (24)–(25) при учете (33) описывается уравнением

$$\frac{d^2 k}{d\tau^2} = -\frac{k}{4} \left(\frac{1}{3} + \sigma \right). \quad (36)$$

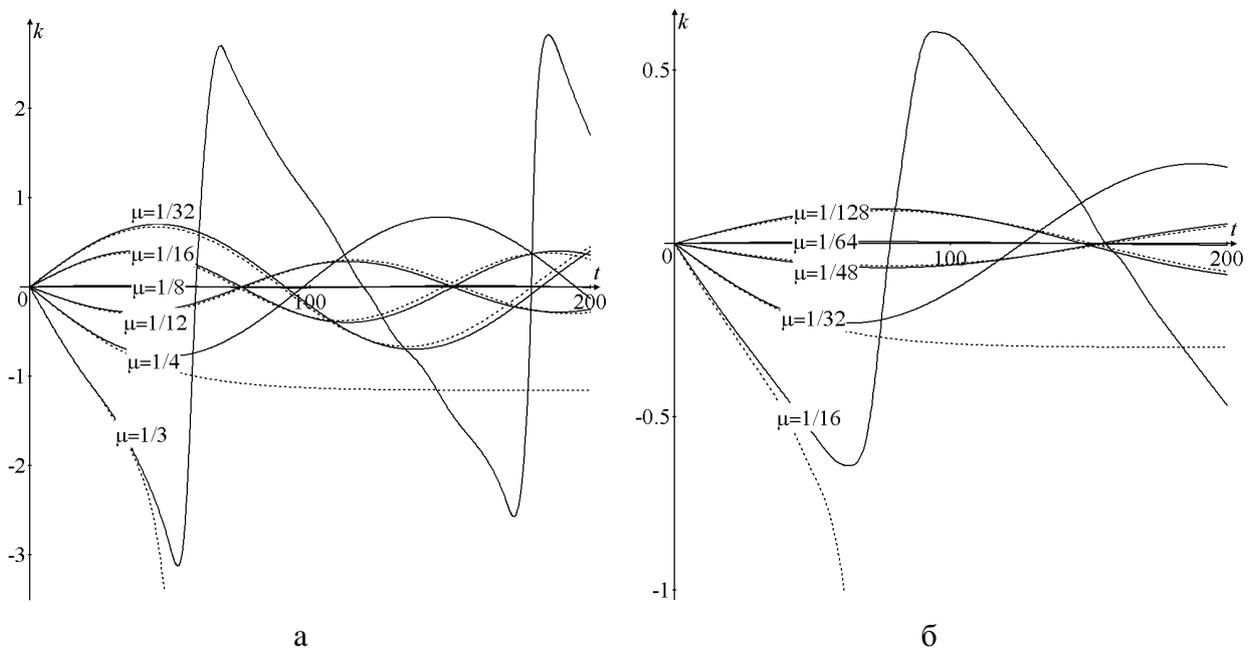


Рис. 8. Волновое число солитона в точке максимума модуля огибающей солитона в зависимости от t при различных значениях величины μ :

при $L_F = 20, L_q = 20$ (а) и при $L_F = -40, L_q = 10$ (б);

———— численные результаты; - - - - - аналитические результаты

При $\sigma > -1/3$ состояние равновесия (35) – центр, реализуется при возрастающей дисперсии второго порядка ($p > 0$). В частности, имеем при $L_q = 20$ и $L_F = 20$ ($\sigma = 1$): $(\mu_*)_{q,F} = 1/8$; при $L_q = 10$ и $L_F = -40$ ($\sigma = -1/4$): $(\mu_*)_{q,F} = 1/64$. На рис. 8 показаны значения волнового числа солитона в точке максимума модуля огибающей солитона $k(|U| = \max)$ в зависимости от t при $L_F = 20$, $L_q = 20$ (а); при $L_F = -40$, $L_q = 10$ (б); при различных значениях величины μ .

При $\mu = (\mu_*)_{q,F}$ волновое число солитона изменяется медленно. Это соответствует равновесию между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающими дисперсией и внешним потенциалом. При $\mu < 2(\mu_*)_{q,F}$ ($p_s < \lambda_s$) имеет место динамическое равновесие между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающей дисперсией второго порядка и убывающим внешним потенциалом (рис. 4, а). В режиме динамического равновесия результаты численного эксперимента и аналитической теории близки между собой. При $\mu = 2(\mu_*)_{q,F}$ ($p_s = \lambda_s$) аналитическая теория для системы (24)–(25) приводит к существованию сепаратрисного решения (рис. 4, а). Поля излучения в численном эксперименте приводят к постоянному уменьшению параметра p_s и перемещают решение с нелокализованной сепаратрисы на локализованную траекторию. При $\mu > 2(\mu_*)_{q,F}$ ($p_s > \lambda_s$) аналитическая теория приводит к наличию нелокализованных траекторий (рис. 4, а) и не имеет соответствия с численным экспериментом.

При $\sigma < -1/3$ состояние равновесия (33) является седлом, которое реализуется при уменьшающейся дисперсии второго порядка ($p < 0$). При $L_q = -20$ и $L_F = 20$ ($\sigma = -1$): $(\mu_*)_{q,F} = 1/16$. На рис. 9 показаны значения локального волнового числа в точке максимума модуля огибающей солитона $k(|U| = \max)$ в зависимости от t при $L_q = -20$ и $L_F = 20$ для различных значений μ .

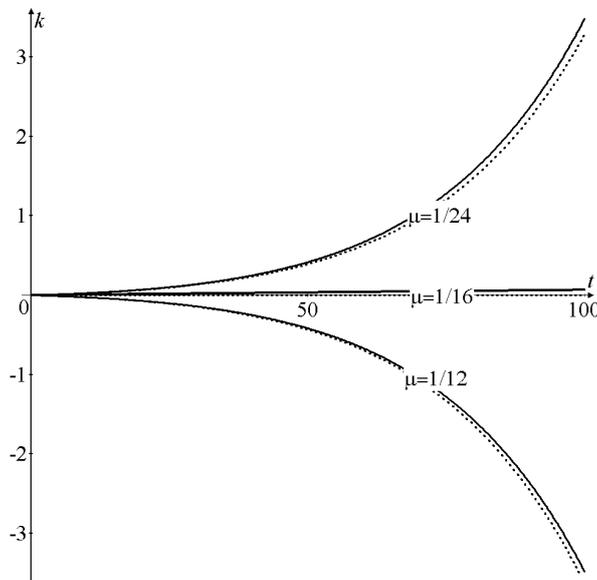


Рис. 9. Локальное волновое число в точке максимума модуля огибающей солитона в зависимости от t при $L_q = -20$ и $L_F = 20$ для различных значений μ :

————— - результаты численного эксперимента;
 - - - - - - - - соответствующие аналитические результаты

При $\mu = 1/16$ волновое число меняется мало. Это соответствует равновесию между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающим внешним потенциалом. Такое состояние равновесия является неустойчивым (негрубым): при $\mu > 1/16$ волновое число неограниченно убывает из-за доминирования вынужденного пространственного рассеяния Рамана, при $\mu < 1/16$ волновое число неограниченно возрастает из-за доминирования возрастающего внешнего потенциала. В указанных случаях результаты численного эксперимента и аналитической теории приемлемо близки (рис. 4, б).

Неоднородность внешнего потенциала

При $q' = 0$ параметры исходного волнового пакета (34) соответствуют равновесию между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающим внешним потенциалом при условии $(\mu_*)_F = 15/(8L_F)$. В частности, при $L_F = 20$ - $(\mu_*)_F = 3/32$. На рис. 10 показаны значения локального волнового числа в точке максимума модуля огибающей солитона в зависимости от t при $L_F = 20$, $q' = 0$ для различных значений μ . При $\mu = 3/32$ волновое число изменяется слабо. Это соответствует равновесию между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и возрастающим внешним потенциалом. При $\mu > 3/32$ волновое число неограниченно убывает из-за доминирования вынужденного пространственного рассеяния Рамана, при $\mu < 3/32$ волновое число неограниченно возрастает из-за доминирования возрастающего внешнего потенциала. То есть такое равновесие является неустойчивым (негрубым). В указанных случаях результаты численного эксперимента и аналитической теории приемлемо близки.

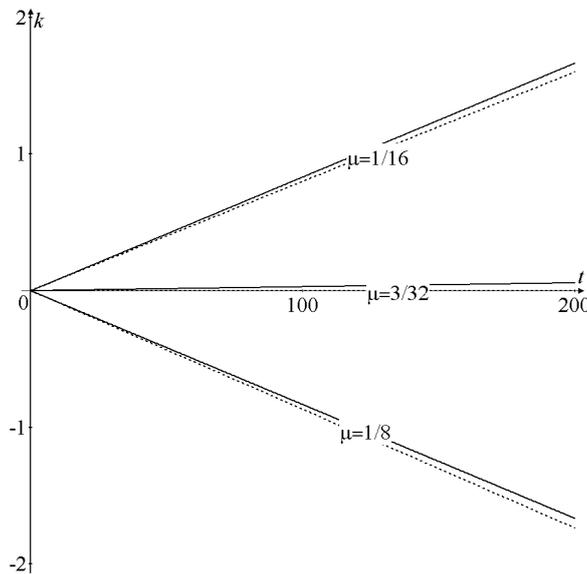


Рис. 10. Локальное волновое число в точке максимума модуля огибающей солитона в зависимости от t при $L_F = 20$, $q' = 0$ для различных значений μ :

————— - результаты численного эксперимента;
 - - - - - - - - - соответствующие аналитические результаты

Заключение

В данной работе исследована динамика солитонов огибающей в нелинейных диспергирующих средах при наличии вынужденного пространственного рассеяния Рамана и неоднородности как дисперсии второго порядка, так и внешнего потенциала. Исследование проводилось в рамках расширенного нелинейного уравнения Шредингера. Исследование проведено как аналитически, так и численно. В аналитическом подходе шесть интегралов (2)–(7) исходного модельного

го уравнения (1) удалось свести к системе двух обыкновенных дифференциальных уравнений (24)–(25), для которых проведен анализ траекторий в фазовом пространстве. Показана возможность компенсации убывания волнового числа солитона из-за вынужденного пространственного рассеяния Рамана, возрастание волнового числа из-за возрастания дисперсии второго порядка ($q' > 0$) и возрастания внешнего потенциала ($F' > 0$). Найдены как устойчивое квазисолитонное решение с малоизменяющимися параметрами солитона (волновое число, амплитуда и протяженность) ($p_s = \lambda_s / 2 > 0$), так и режим динамического равновесия между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и неоднородностью среды, в котором параметры солитона изменяются периодически ($0 < p_s < \lambda_s$). Показано приемлемое совпадение результатов аналитической теории и численного эксперимента в режиме динамического равновесия между вынужденным пространственным рассеянием Рамана и неоднородностью среды.

В данной работе динамика солитонов рассматривалась в пренебрежении полями излучения, линейной групповой скоростью, нелинейной дисперсией, дисперсией третьего порядка и неоднородностью фазовой самомодуляции. Возможность компенсации эффектов вынужденного пространственного рассеяния Рамана, разрушающих солитон в неоднородных средах при учете всех указанных членов будет описаны в следующих работах.

В данной научной работе использованы результаты, полученные в ходе выполнения проекта № 11-01-0066, реализованного в рамках Программы «Научный фонд НИУ ВШЭ» в 2012–2013 гг.

Библиографический список

1. **Agraval, G.P.** Nonlinear Fiber Optic / G.P. Agraval. – San Diego: Academic Press, 2001.
2. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang. – New York: Springer, 2001.
3. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S. Kivshar G.P. Agraval. – San Diego: Academic, 2003.
4. **Dickey L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems / L.A. Dickey. – New York: World Scientific, 2005.
5. **Zakharov, V.E.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / V.E. Zakharov, A.B. Shabat // Sov. Phys. JETP. 1972. №34. P. 62–69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. Lett. 1973. № 23. P. 142–144.
7. **Oliviera, J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliveira, M.A. Moura // Phys. Rev. E 57.1998. P. 4751–4755.
8. **Mitschke, F.M.** Discovery of the soliton self-frequency shift / F.M. Mitschke, L.F. Mollenauer // Optics Letters. 1986. №11. P. 659–661.
9. **Gordon, J.P.** Theory of the Soliton Self-frequency Shift // Opt. Lett. 1986. №. P. 11662–664.
10. **Kodama, Y.J.** Optical solitons in a monomode fiber // Stat. Phys. 1985. №39. P. 597–614.
11. **Kodama, Y.** Nonlinear pulse propagation in a monomode dielectric guide / Y. Kodama, A. Hasegawa // IEEE J. Quantum Electron. 1987. № 23. P. 510–524.
12. **Zaspel, C.E.** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. Lett. 1999. № 82. P. 723–726.
13. **Hong, B.** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation / B. Hong, D. Lu // Inter. Journal of Nonlinear Science. 2009. №73. P. 60–367.
14. **Karpman, V.I.** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal. 2004. № 39. P. 341–350.
15. **Gromov, E.M.** Nonlinear Dynamics of Short Wave Trains in Dispersive Media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1996. №110. P. 137; Sov. Phys. JETP. 1996. №83. P. 73–79.
16. **Gromov, E.M.** Short Optical Solitons in Fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 2000. № 10. P. 551–558.
17. **Gromov, E.M.** Dynamics of wave packets in the frame of third-order nonlinear Schrödinger equation / E.M. Gromov, L.V. Piskunova, V.V. Tyutin // Physics Letters. 1999. № 256. P. 153–158.
18. **Obregon, M.A.** Oblique magneto-acoustic solitons in a rotating plasma / M.A. Obregon, Yu.A. Stepanyants // Physics Letters. 1998. № 249. P. 315–323.

19. Generalized Nonlinear Schrödinger Equation for Dispersive Susceptibility and Permeability: Application to Negative Index Materials / M. Scalora [at al.] // Phys. Rev. Lett. 2005. № 95. 013902.
20. Modulation instability in nonlinear negative-index material / S.C. Wen [at al.] // Phys. Rev. E. 2006. № 73. 036617.
21. **Marklund, M.** Ultrashort solitons and kinetic effects in nonlinear metamaterials / M. Marklund, P.K. Shukla, L. Stenflo // Phys. Rev. E. 2006. № 73. 037601.
22. Higher-order effects and ultrashort solitons in left-handed metamaterials / N.L. Tsitsas [at al.] // Phys. Rev. Lett. E. 2009. №79. 037601.
23. **Kivshar, Y.S.** Dark-soliton dynamics and shock waves induced by the stimulated Raman effect in optical fibers // Phys. Rev. 1990. № 42. P. 1757–1761.
24. **Kivshar, Y.S.** Raman-induced optical shocks in nonlinear fibers / Y.S. Kivshar, B.A. Malomed // Opt. Lett. 1993. №18. P. 485–487.
25. **Biancalama, F.** Theory of the soliton self-frequency shift compensation by the resonant radiation in photonic crystal fibers / F. Biancalama, D.V. Skrybin, A.V. Yulin // Phys. Rev. 2004. № 70. 011615.
26. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultrashort solitons in high-speed communication systems. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers / R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal // Journal of the Optical Society of America B. 1997. № 14. P. 314–322.
27. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultrashort solitons in highspeed communication systems. II. Control of jitter by periodic optical phase conjugation / R.-J. Essiambre, G.P. Agrawal // Journal of the Optical Society of America B. 1997. № 14. P. 323–330.
28. DDF-based all-fiber optical source of femtosecond pulses smoothly tuned in the telecommunication range / A. Andrianov [at al.] // Laser Physics. 2007. № 17. P. 1296–1302.
29. Soliton pulse compression in dispersion-decreasing fiber / S. Chernikov [at al.] // Opt. Lett. 1993. № 18. P. 476–478.

*Дата поступления
в редакцию 30.07.2012*

N.V. Aseeva, E.M. Gromov, V.V. Tyutin

SOLITON DYNAMICS IN MEDIA WITH SPATIAL STIMULATED RAMAN SCATTERING AND INHOMOGENEOUS BOTH DISPERSION AND ADDITIONAL POTENTIAL

National Investigate University Higher School of Economics

Purpose: Dynamics of solitons in the frame of the extended nonlinear Schrödinger equation

$2i \frac{\partial U}{\partial t} + q(\xi) \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha U |U|^2 + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} + F(\xi)U = 0$, taking into account cubic nonlinearity α , nonlocal nonlinearity (space stimulated Raman scattering) μ , smoothly inhomogeneous second-order dispersion $q(\xi)$ and inhomogeneous additional potential $F(\xi)$ is considered.

Approach: Soliton's dynamic investigated as numerically as analytically. In analytic theory the six integrals of basic model equation was reduced to two ordinary differential equations system. Phase space structure of the system was analyzed.

Findings: It is shown that down shift (by Raman) is compensated with up shift (by second-order dispersion) in media with increasing second-order linear dispersion or increasing additional potential. A quasi-soliton solution with the small wave number spectrum variation, amplitude and extension are found both analytically and numerically. The soliton exists as the equilibrium of space stimulated Raman scattering and increasing second-order dispersion or increasing potential. Regime of the dynamical equilibrium of space stimulated Raman scattering and inhomogeneous media corresponding to the periodical variation of soliton parameters are found. Analytical and numerical solutions for this regime are in a good agreement.

Originality: The obtained results is original and can be important for optical fibers application.

Key words: Extended Nonlinear Schrödinger Equation, Soliton, Nonlocal Nonlinearity, Space Stimulated Raman-Scattering; Inhomogeneous, Second-Order Linear Dispersion, Additional Potential, Analytical Investigation, Numerical Simulation.

УДК 532.5

Е.Л. Авербух

**ПОВЕРХНОСТНЫЕ ПРОЯВЛЕНИЯ ЭКСПРЕМАЛЬНЫХ
ВОЛНОВЫХ РЕЖИМОВ ПОЛЯ КРАЕВЫХ ВОЛН**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Моделирование динамики пленок поверхностно-активных веществ в поле топографических захваченных волн с учетом экстремального характера волнового поля.

Метод: В основе исследования лежит численное моделирование уравнения баланса поверхностной концентрации. Динамика пленок была рассмотрена в рамках модели адвекции-диффузии-релаксации. Моделирование базируется на неявном конечно-разностном методе.

Результаты: Были получены распределения концентраций в поле краевых волн. Особое внимание уделено процессам дисперсионной фокусировки, усиления волн над неоднородным шельфом и нелинейным резонансным трехволновым взаимодействиям краевых волн и их поверхностных проявлениям.

Область применения: Изображения концентраций пленок поверхностно-активных веществ могут быть использованы при интерпретации данных дистанционного зондирования, диагностики и идентификации, лежащих в основе аномальных волновых процессов.

Ключевые слова: топографические захваченные волны, концентрация, поверхностно-активные вещества, фокусировка, нелинейные взаимодействия, усиление.

Введение

Волновые движения в океане сопровождаются перемещением значительных масс воды и перераспределением концентрации различного рода примесей естественного и антропогенного происхождения, повсеместно присутствующих в океане. Сильно нелинейные волны приводят к проникновению загрязняющих веществ в толщу океана за счет увеличения коэффициентов вертикальной турбулентной диффузии. Под действием крупномасштабных волновых движений примеси могут быть перенесены на значительные расстояния от места выброса, что и обнаруживается в природных условиях. Достаточно упомянуть последствия катастрофического цунами 2011 года в Японии, когда смытые с берега различного рода предметы перенесены через Тихий океан нестационарными течениями и крупномасштабными волнами и обнаружены у берегов Канады и США.

Примесные поля могут служить индикатором крупномасштабных волновых структур в океане [1, 2]. Динамика примесных полей на водной поверхности (так называемых поверхностно-активных веществ-ПАВ) играет важную роль на формирование космических изображений поверхности океана. Общеизвестна роль ПАВ в формировании радарного изображения сильно нелинейных внутренних волн, позволяя определять геометрическую структуру пакетов внутренних волн, их скорость распространения и амплитуду, а в отдельных случаях способствовать дистанционному определению вертикальной стратификации океана. Пленочные образы визуализируют расчет скопления ПАВ в поле различных волновых полей и течений; среди них циркуляции Ленгмюра, апвеллинг, внутренние волны, конвергентные зоны фронтов и вихревых структур. Все это делает актуальным исследование физики трансформации примесных полей под действием волн различной физической природы с целью получения количественных характеристик вариации поля концентрации примесей и оценки возможности решения обратных задач восстановления параметров волновых движений по динамике примесей.

Целью данной работы является исследование поверхностных проявлений краевых волн.

Краевые волны

В 1846 году Стокс опубликовал свой «Доклад о последних исследованиях в гидродинамике» [3], состоящий из шести разделов, рассматривающий ряд аспектов механики жидкости. Во втором разделе были исследованы различные проблемы распространения волн над дном постоянной глубины, а также в канале со стороны под углом. В этой работе, основанной на труде [4], исследуется возможность распространения и ограничения вдоль стенки волн жидкости, в одностороннем канале, увеличивающемся в глубину от наклонных стен. Это первое упоминание о краевых волнах, встречающееся в литературе. Краевые волны были отнесены к «захваченным волнам», потому что амплитуда быстро убывает от стенки. Основные характеристики этого решения описаны в работе [5], за ней последовала работа [6], которая дала первое полное описание линейной постановки задачи краевых волн в рамках непрерывного и дискретного спектра.

За столь ранней работой последовало много важных трудов. Нелинейные поправки к линейному решению Стокса были предоставлены в работах [7, 8]. Возбуждение стоячих краевых волн подходящей падающей волной, перпендикулярной к пляжу, было проанализировано в [9]. Другие механизмы генерации краевых волн были описаны [10]. Случай медленно меняющейся глубины, ограниченный анализом линейной задачи, был рассмотрен в [11]. Решение линейной задачи, с учетом береговых течений, было описано в [12]. Структура и нелинейные дисперсионное соотношение периодических краевых волн Стокса старших мод, вывод нелинейного уравнения Шредингера для волновой амплитуды в безразмерной форме, содержащей в коэффициентах только номер моды, был выполнен в работе [13, 14].

Несмотря на то, что со времен Стокса, до более поздних изданий текста Лэмба по гидродинамике, по крайней мере, считалось, что краевые волны были математическим курьезом [15], в настоящее время существуют доказательства (см., например, [16]), подтверждающие тот факт, что многие прибрежные процессы невозможно объяснить без привлечения теории краевых волн.

Наиболее сильное влияние на поведение крупномасштабных поверхностных волн в прибрежной зоне океана оказывает захват волновой энергии прибрежными особенностями топографии. Имеются многочисленные данные наблюдений реальных цунами, например, Камчатского цунами 4 октября 1952 г. и цунами 25 апреля 1992 г. с эпицентром около мыса Мендосино (Западное побережье США), исследования интенсивности и поведения которых в прибрежной зоне океана использует теорию захваченных волн. С их помощью легко объясняется также неравномерность изменения высоты волны цунами вдоль побережья. В целом, примерно до 70% волновой энергии цунами распространяется вдоль Курильских островов в виде захваченных волн.

Вблизи берега на захваченные волны приходится 95–8% энергии, которая может передаваться вдоль волновода на большие расстояния без существенных потерь. До сих пор остается открытым вопрос о причине гораздо более высокой энергонасыщенности захваченных волн по сравнению с волнами открытого океана, несмотря на то обстоятельство, что область захвата волн, как правило, занимает лишь 5–10% площади океана. Одним из видов захваченных волн являются краевые волны. Коротко-масштабные краевые волны играют определяющую роль во многих процессах береговой динамики, таких как формирование структуры линии берега и его рельефа, процессы, связанные с морфологией дна в прибрежной зоне и др. В настоящее время имеется множество фактов, подтверждающих их существование в волновом поле в прибрежной зоне океана. Крупномасштабные краевые волны являются важной компонентой движений воды, производимых циклонами, движущимися вдоль береговой линии.

Исследование динамики пленочных загрязнений в поле краевых волн было начато с изучения линейных бегущих краевых волн над однородным шельфом [17], учета вдольберегового сдвигового течения краевых волн [18], исследования поведения ПАВ в поле краевых волн с учетом неоднородности подводного [19]. Остановимся подробнее на экстремальных

режимах краевых волн и эффектах фокусировки, нелинейных резонансных трехволновых взаимодействий и усиления волн близ критической частоты отсечки.

Модель расчета

Динамика пленок поверхностно-активных веществ основана на модели адвекции, дополненной диффузионными и релаксационными эффектами в рамках уравнения баланса поверхностной концентрации $\Gamma(x, y, t)$ [20]:

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial t} + \frac{\partial(u\Gamma)}{\partial x} + \frac{\partial(v\Gamma)}{\partial y} = D\left(\frac{\partial^2 \Gamma}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Gamma}{\partial y^2}\right) + \frac{\Gamma_0 - \Gamma}{\tau}, \quad (1)$$

где $u(x, y, t)$, $v(x, y, t)$ – компоненты двумерной (поверхностной) заданной скорости гидродинамического потока. Параметр D есть коэффициент горизонтальной (поверхностной) диффузии, а τ – характерное время релаксации пленки, описывающее процессы обмена с более глубокими слоями воды, Γ_0 – равновесная концентрация пленки на поверхности раздела (в отсутствие течения). Эта величина может зависеть от многих параметров, например, от скорости ветра над водой, температуры, солености воды и др. Коэффициенты D и τ являются эмпирическими. Они могут меняться в пространстве и во времени и также определяются различными физическими процессами в окрестности поверхности раздела.

Уравнение (1) было решено численно с помощью метода конечных разностей. Неявная схема решалась методом переменных направлений:

$$\begin{aligned} & \Gamma_{i-1,j}^{n+1/2} \left(-\frac{u_{i,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} - \frac{D}{\Delta x^2} \right) + \Gamma_{i,j}^{n+1/2} \left(\frac{1}{\Delta t/2} + (u_x)_{i,j}^{n+1/2} + 2\frac{D}{\Delta x^2} \right) + \Gamma_{i+1,j}^{n+1/2} \left(\frac{u_{i,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} - \frac{D}{\Delta x^2} \right) = \\ & = \Gamma_{i,j-1}^n \left(\frac{D}{\Delta y^2} + \frac{v_{i,j}^n}{2\Delta y} \right) + \Gamma_{i,j}^n \left(\frac{1}{\Delta t/2} - 2\frac{D}{\Delta y^2} - (v_y)_{i,j}^n \right) + \Gamma_{i,j+1}^n \left(\frac{D}{\Delta y^2} - \frac{v_{i,j}^n}{2\Delta y} \right); \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \Gamma_{i,j-1}^{n+1} \left(-\frac{v_{i,j}^{n+1}}{2\Delta y} - \frac{D}{\Delta y^2} \right) + \Gamma_{i,j}^{n+1} \left(\frac{1}{\Delta t/2} + (v_y)_{i,j}^{n+1} + 2\frac{D}{\Delta y^2} + \frac{1}{\tau} \right) + \Gamma_{i,j+1}^{n+1} \left(\frac{v_{i,j}^{n+1}}{2\Delta y} - \frac{D}{\Delta y^2} \right) = \\ & = \Gamma_{i-1,j}^{n+1/2} \left(\frac{u_{i,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2} \right) + \Gamma_{i,j}^{n+1/2} \left(\frac{1}{\Delta t/2} - 2\frac{D}{\Delta x^2} - (u_x)_{i,j}^{n+1/2} \right) + \Gamma_{i+1,j}^{n+1/2} \left(-\frac{u_{i,j}^{n+1/2}}{2\Delta x} + \frac{D}{\Delta x^2} \right) + \frac{\Gamma^0}{\tau}, \end{aligned}$$

где в качестве граничных условий на берегу ставилось условие непротекания $\frac{\partial \Gamma}{\partial n} = 0$, а мо-

ристую границу области будем считать достаточно далекой, так чтобы волновые возмущения не успевали доходить в эту область за время расчетов, т.е. концентрация там не изменялась и всегда оставалась равной начальной, или равновесной, концентрации Γ_0 . Периодические граничные условия на боковых границах задавались:

$$\Gamma_{1,j}^n = 2\Gamma_{N,j}^n - \Gamma_{N-1,j}^n, \quad \Gamma_{N,j}^n = 2\Gamma_{1,j}^n - \Gamma_{2,j}^n.$$

Согласно линейной теории краевых волн, поле горизонтальных приповерхностных скоростей задается в виде [16, 21]:

$$\begin{aligned} u(x, y, t) &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{gk}{\omega} F(y) \exp i(\omega t - kx) \right\}; \\ v(x, y, t) &= \operatorname{Re} \left\{ \frac{ig}{\omega} \frac{dF}{dy} \exp i(\omega t - kx) \right\}, \end{aligned} \quad (3)$$

где Re – знак вещественной части получаемых выражений; ω – частота, k – вдольбереговое волновое число; $F(y)$ – структура моды краевой волны, которая находится как решение линейной краевой задачи вида:

$$\frac{d^2 F}{dy^2} + \frac{1}{h} \frac{dh}{dy} \frac{dF}{dy} + \left(\frac{\omega^2}{gh} - k^2 \right) F = 0, \quad (4)$$

здесь $h(y)$ задает форму профиля рельефа дна на цилиндрическом шельфе. На берегу ставится условие отсутствия потока массы через береговую границу. На бесконечности структура мод стремится к нулевому значению для захваченных волн.

Фокусировка краевых волн

Как и в аналогичных задачах возникновения аномально больших волн в поле ветровых волн вдали от зоны генерации, будем рассматривать захваченные волны также на больших расстояниях от очага, поэтому ближним полем будем пренебрегать [22]. Волновая часть общего решения может быть записана в виде ряда Фурье:

$$\eta(x, y, t) = \sum_{n=0}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} A_n(k) \exp(-|k|y) L_n(2|k|y) \exp(i(\omega_n t - kx)) dk, \quad (5)$$

где

$$A_n(k) = \frac{k}{\pi} \int_0^{+\infty} \exp(-|k|y) L_n(2|k|y) dy \int_{-\infty}^{+\infty} \eta_0(x, y) \exp(ikx) dx.$$

Таким образом, основой для анализа поля концентрации является линейная суперпозиция свободных краевых волн. Согласно [22], задачу доказательства появления аномально большой волны из заданного пакета можно свести к более простой задаче, а именно эволюции заданной аномально высокой волны как начального условия. Тогда все получаемые решения после инвертации в пространстве будут представлять собой волновые пакеты, эволюция которых будет всегда приводить к формированию аномально большого импульса. Применим далее эту идею к полю волн Стокса.

Рассмотрим сначала процесс формирования аномально больших импульсов из наиболее энергетической первой моды волн Стокса ($n = 0$), для которой полином Лагерра есть константа ($L_0(y) = 1$). Тогда временная эволюция волнового поля первой моды описывается интегралом Фурье [23, 24]

$$\eta(x, y, t) = \int A(k) \exp(i(\omega t - kx) - |k|y) dk \quad (6)$$

с простым дисперсионным соотношением

$$\omega = \sqrt{g\alpha} |k| \operatorname{sign} k \quad (7)$$

и условием $A(-k) = A^*(k)$, обеспечивающим действительность волнового поля.

Как уже отмечалось, в качестве начальных условий можно рассматривать возможную форму аномально высокой волны. Она описывается следующим интегралом Фурье:

$$\eta_0(x, y) = \eta(x, y, 0) = \int A(k) \exp(ikx - |k|y) dk, \quad (8)$$

где $A(k)$ – спектральная плотность аномально большой волны. Аналитические результаты легко могут быть получены в замкнутом виде для спектра

$$A(k) = \frac{A_0 l}{2} \exp(-l|k|), \quad (9)$$

где A_0 и l определяют амплитуду и длину аномальной волны непосредственно вдоль берега. Форма аномальной волны, имеющей спектр (9), представлен на рис. 1, а изменения концентрации представлены на рис. 2.

Заметим, что поле концентраций в начальные моменты времени имеет более сложную геометрию пленки, чем для линейно бегущих краевых волн, однако, с течением времени на поверхности отчетливо выделяются чередующиеся зоны сгущения и разрежения пленки, зона сгущения имеет единственный максимум, а зона понижения концентрации характеризуется двумя локальными минимумами. Отчетливо заметно влияние диффузии на 30-50 секундах расчета. Необходимо отметить, что если максимум возвышения водной поверхности наблю-

дается в момент фокусировки 30 с (рис.1), то максимум поля концентрации после фокусировки, в момент времени 50 с.

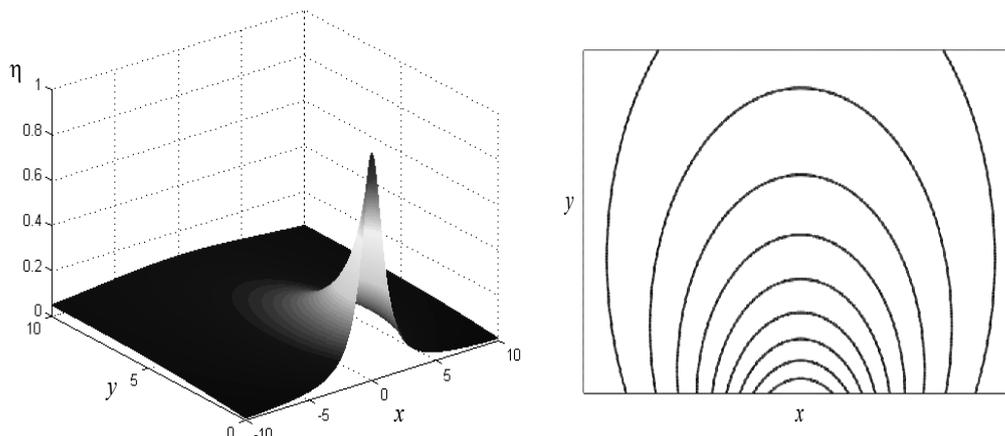


Рис. 1. Трехмерный вид и изолинии аномальной волны

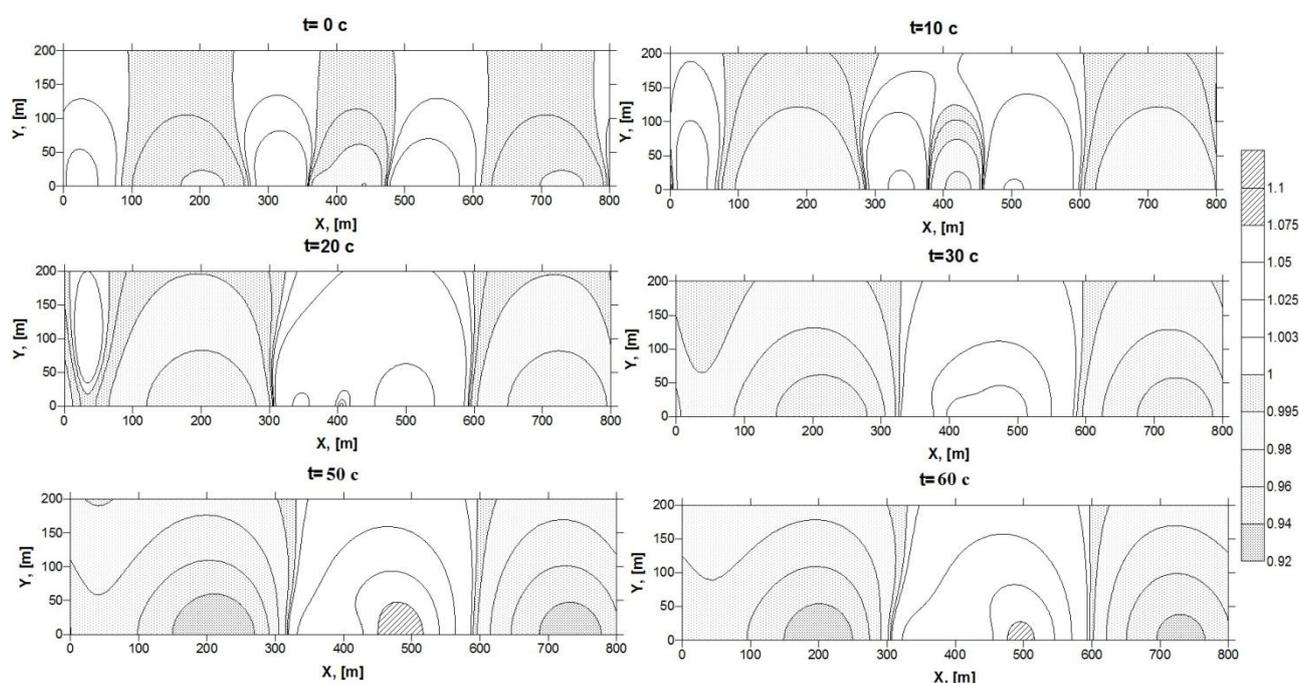


Рис. 2. Изменение концентрации в различные моменты времени

Резонансные нелинейные взаимодействия

Резонансные нелинейные взаимодействия краевых волн рассматриваются как один из основных механизмов перераспределения энергии волновых движений в прибрежной зоне. Исследования в этом направлении проводятся уже более 30 лет. Так, существование резонансных триад краевых волн Стокса над откосом постоянного уклона было доказано еще в работе [25], и затем подтверждено в последующих статьях [26-28]. Трехволновые резонансы возникают для краевых волн и над подводным рельефом сложной формы [27,29]. Более сложной задачей является учет влияния нелинейных резонансных трехволновых взаимодействий краевых волн на динамику примесей и загрязнений.

Рассмотрим вклад резонансных нелинейных трехволновых взаимодействий топографических захваченных волн, оказывающий основное влияние на перераспределение волно-

вой энергии в прибрежной зоне. В такой постановке смещение поверхности жидкости $\eta(x, y, t)$ представимо в виде [26]:

$$\eta^{(1)} = \sum_r \sum_n \frac{1}{2} A_r^n(T) F_r^n(x) e^{i(k_r y - \omega_r^n t)} + \text{К.С.}, \quad (10)$$

где $\eta^{(1)}$ представляет собой ряд Фурье линейных мод, а амплитуды $A(T)$, медленно изменяются во времени, F – структура моды, k – волновое число, ω – частота.

Рассмотрим одну резонансную триаду волн с волновыми числами k_1, k_2, k_3 ($k_3 = k_1 + k_2$), соответствующих модам n_1, n_2, n_3 . Уравнения связи k_2 и k_1 , обеспечивающие выполнение условия синхронизма частот

$$\omega_{n_3}(k_3) = \omega_{n_1}(k_1) + \omega_{n_2}(k_2). \quad (11)$$

При этом медленно изменяющиеся во времени амплитуды A_j волны моды n_j связаны системой уравнений:

$$\begin{cases} A_{1T} = i\mu_1 A_2^* A_3, \\ A_{2T} = i\mu_2 A_1^* A_3, \\ A_{3T} = i\mu_3 A_1 A_2, \end{cases} \quad (12)$$

где «*» обозначает комплексное сопряжение; i – мнимая единица; μ_i – коэффициенты взаимодействия. Поле скорости в длинных волнах восстанавливалось согласно смещению η .

Рассмотрим процессы взаимодействия краевых волн над вогнутым экспоненциальным шельфом (рис. 3), для которого профиль глубины

$$h(y) = H_0 (1 - e^{-ay}), \quad (13)$$

где H_0 – постоянная глубина на бесконечности, a^{-1} – характерная ширина шельфа.

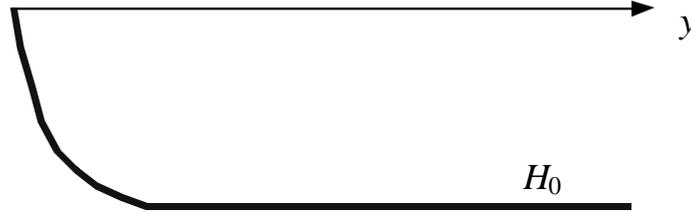


Рис. 3. Модель вогнутого экспоненциального шельфа

Для этого шельфа характерно наличие минимальных значений частот и волновых чисел для дисперсионных кривых всех мод, за исключением низшей. Соотношение между номерами мод в триаде определяет возможность одного либо двух путей энергетического обмена между волнами, распространяющимися в одну сторону. Отметим также, что резонансные условия выполняются только в определенных областях спектра.

Рассмотрим пространственно-временную динамику для одной из триад краевых волн. Возьмем триаду «011» волновых компонент с волновыми числами $k_1 = 1,5a, k_2 = 1,6a, k_3 = 3,1a$. Для этой триады коэффициенты могут быть рассчитаны и принимают значения: $\mu_1 = -0,0495\mu, \mu_2 = -0,0229\mu, \mu_3 = -3,4936\mu$, где $\mu = a\sqrt{g/H_0}$. Волновое поле и концентрация примеси для стационарного решения системы (12) представлены на рис. 4.

Видно, что волновое поле для стационарного случая над вогнутым экспоненциальным шельфом обладает сильной временной изменчивостью, и его форма существенно зависит от расстояния от берега. Однако поле концентраций пленки поверхностно-активных веществ изменяется существенно в области у берега.

Необходимо отметить, что для триад с более высокочастотными компонентами, уровень концентрации будет резко увеличиваться и приводить к экстремальным отклонениям.

Данный эффект связан с увеличением энергетического уровня для высоких мод краевых волн.

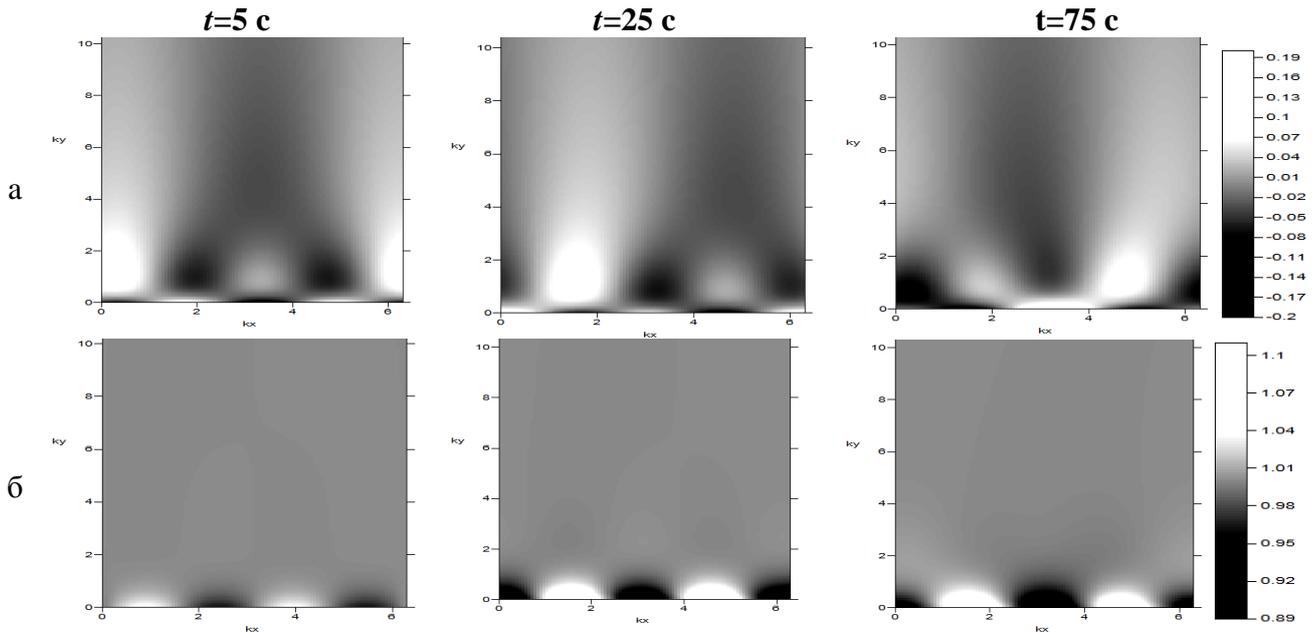


Рис. 4. Смещение водной поверхности (а) и концентрация ПАВ для триады над вогнутым экспоненциальным шельфом (б)

Усиление краевых волн

Динамика краевых волн над шельфом с цилиндрическим рельефом дна, параметры которого медленно изменяются во вдольбереговом направлении, может быть описана с помощью работ [30, 31]. Ограничимся представлением дисперсионного соотношения, собственной функции и закона изменения амплитуды для вогнутого экспоненциального шельфа(13):

$$\omega^2 = \frac{gH_0 a^2}{2} \left((2n+1) \sqrt{1 + \frac{4k_n^2}{a^2}} - (2n^2 + 2n + 1) \right), \quad (14)$$

$$G_n(k, y) = \exp(-apy) \frac{\Gamma(2p+1)}{\Gamma(2p+n+1)} \sum_{j=0}^n \frac{n!}{j!(n-j)!} \frac{\Gamma(2p+n+j+1)}{\Gamma(2p+j+1)} (-1)^j \exp(-ajy),$$

$$p = \frac{1}{2} \left(\sqrt{1 + \frac{4k^2}{a^2}} - (2n+1) \right) > 0, \quad (15)$$

$$A^2 \sim \frac{q(1+q)(1+2q)(3+2q)}{H_0 \Theta \sqrt{\left(\frac{2\omega^2}{gH_0 a^2} + 5 \right)^2 - 9}}, \quad \text{при } n = 1, \quad (16)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма функция,

$$\Theta = 4q^3 + 12q^2 + 11q + 3 - 2c^2 q(2q^2 + 3q + 1) + c q(c+2)(4q^2 + 8q + 3) - 2q(2c+1)(2q^2 + 5q + 3), \quad c = \frac{\Gamma(2q+3)\Gamma(2q+1)}{\Gamma^2(2q+2)}, \quad q = \frac{1}{3} \left(\frac{\omega^2}{gH_0 a^2} - 2 \right).$$

Важной характеристикой дисперсионных кривых для краевых волн над экспоненциальным шельфом является минимальная частота существования отдельных мод, которая определяется выражением

$$\omega_n^{\min} = a[gH_0 n(n+1)]^{1/2}, \quad (17)$$

а также длинноволновая асимптотика для скорости волн, определяемая скоростью на максимальной глубине H_0 .

Изменение концентрации ПАВ при распространении первой моды на границе области их непротекания показано на рис. 5 (оси даны в метрах). Скорость изменения на границе велика, поэтому асимптотические формулы строго не работают, однако ясно, что «оставшееся» волновое поле уже не будет представлять собой распространяющуюся волну.

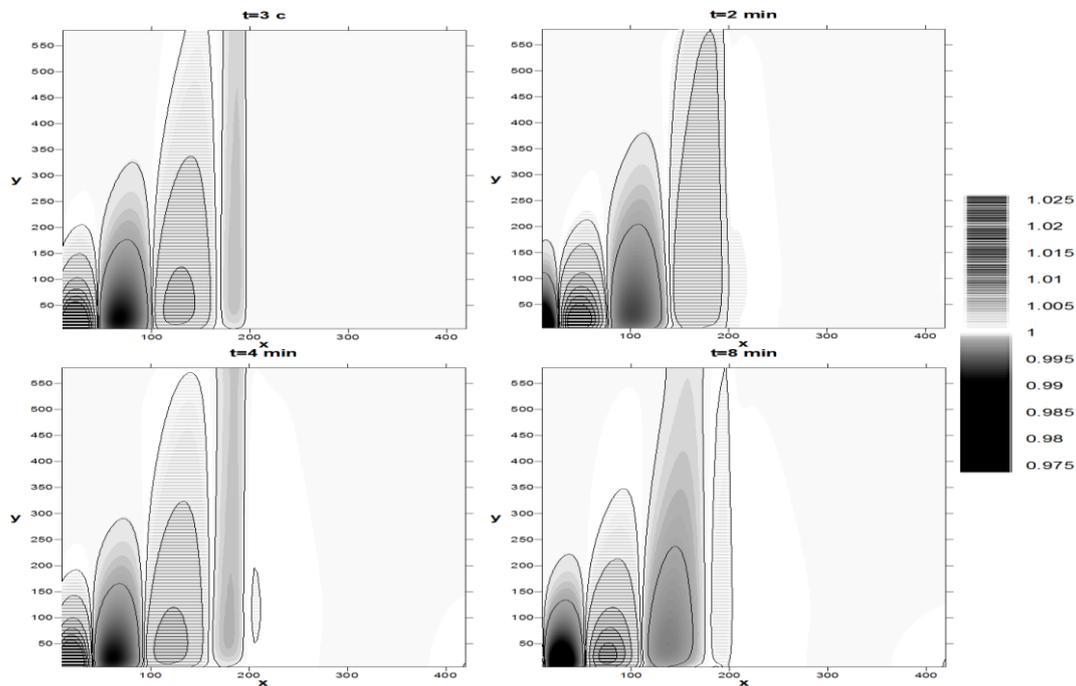


Рис. 5. Концентрация ПАВ в поле первой моды краевых волн для модели адвекции-диффузии-релаксации ($D = 10 \text{ м}^2/\text{с}$, $\tau = 3 \text{ мин}$) при изменении глубины шельфа на бесконечности

Заключение

В настоящей работе исследованы экстремальные волновые режимы краевых волн и их поверхностные проявления в пленках поверхностно-активных веществ. Рассматриваются различные процессы, приводящие к формированию аномальных смещений: фокусировка краевых волн, усиление волн на неоднородном шельфе близ частоты отсечки и трехволновое взаимодействие, приводящие к рождению новой гармоники.

Исследование показало, краевые волны умеренных амплитуд приводят к довольно слабым изменениям концентрации пленки в пределах 1%, однако при экстремальных волновых режимах были получены отклонения порядка 15%.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы» и гранта РФФИ 10-05-00199.

Библиографический список

1. Математическое моделирование в задачах прогнозирования аварийных ситуаций на реке Ока в пределах Нижегородской области / [А.В. Иванов и др.] // Водные ресурсы. 2000. Т. 27. № 3. С. 305 – 312.
2. **Ермаков, С.А.** Влияние пленок на динамику гравитационно-капиллярных волн / С.А. Ермаков. – Н. Новгород: ИПФ РАН, 2010.

3. **Stokes, G.G.** Report on recent researches in hydrodynamics. Rep. 16th Brit. Assoc. Adv. Sci., P. 20. (See also Papers, Vol.i. Pp. 157-187. Cambridge University Press, 1880.)
4. **Kelland, P.** On the theory of waves, P. 2. Trans. R. Soc. Edin. 15. P. 101–144.
5. **Lamb, H.** Hydrodynamics, 6th edn. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 1932.
6. **Ursell, F.** Edge waves on a sloping beach. Proc. R. Soc. A 214, 1952. P. 79–97.
7. **Whitham, G. B.** Nonlinear effects in edge waves // J. Fluid Mech. 1976. № 74. P. 353–368.
8. **Minzoni, A.A.** Nonlinear edge waves and shallow-water theory // J. Fluid Mech. 1976. №74. P. 369–374.
9. **Minzoni, A.A.** On the excitation of edge waves on beaches / A. A. Minzoni, G. B. Whitham // J. Fluid Mech. 1977. №79. P. 273–287.
10. **Evans, D. V.** Edge waves over a sloping beach. Q // J. Mech. Appl. Maths. 1988. №42. P. 131–142.
11. **Miles, J. W.** Edge waves on a gently sloping beach // J. Fluid Mech. 1989. №199. P. 125–131.
12. **Howd, P.A.** Edge waves in the presence of strong longshore currents / P. A. Howd, A. J. Bowen, R. A. Holman // J. Geophys. Res. 1992. №97. P. 11 357–11 371.
13. Слабонелинейные периодические краевые волны Стокса / В.А. Дубинина [и др.]// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004. Т. 49. № 4. С. 525-530.
14. **Дубинина, В.А.** 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.
15. **Johnson, R.S.** Edge waves: theories past and present // Mathematical, physical & engineering sciences, Phil. Trans. R. Soc. A (2007) 365, 2359–2376, doi:10.1098/rsta.2007.2013, Published online 13 March 2007.
16. **Полухина, О.Е.** Интерпретация данных наблюдений краевых волн на о. Шикотан / О.Е. Полухина, А.А. Куркин, Н.В. Полухин / Океанология. 2006. Т. 46. № 5. С. 645-649.
17. **Авербух, Е.Л.** Моделирование динамики пленок поверхностно – активных веществ в поле линейных бегущих краевых волн на шельфе моря / Е.Л. Авербух, О.Е. Куркина, А.А. Куркин // Вестник МГОУ. Сер. Естественные науки. 2011. № 2. С. 109–22.
18. **Авербух, Е.Л.** Краевые волны на вдольбереговом сдвиговом течении над ступенчатым шельфом / Е.Л. Авербух, О.Е. Куркина, А.А. Куркин / Современная наука: идеи, исследования, результаты, технологии: сб. научн. ст. – Киев: «НПВК Триакон», 2011. Вып. 2(7). С. 163-166.
19. **Авербух, Е.Л.** Нестационарная динамика пленок поверхностно – активных веществ в поле краевых волн над неоднородным шельфом // Е.Л. Авербух, А.А. Куркин / Вопросы современной науки и практики. 2012. №2(40). С. 10-22.
20. **Талипова, Т.Г.** Динамика нелинейных длинных внутренних волн в стратифицированной жидкости: дис. ... док. физ. - мат. наук. Т.Г. Талипова. – Н. Новгород, 2004. – 356 с.
21. **Рабинович, А.Б.** Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение / А.Б. Рабинович. – СПб.: Гидрометеоздат, 1993. – 325 с.
22. **Дубинина, В.А.** 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.
23. **Kurkin, A.** Focusing of edge waves above a sloping beach / A. Kurkin, E. Pelinovsky // European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2002. Т. 21. № 5. С. 561-577.
24. **Куркин, А.А.** Динамика нестационарных краевых волн Стокса // Океанология. 2005. Т. 45. № 3. С. 325–331.
25. **Kenyon, K.E.** A note on conservative edge wave interactions // Deep-Sea Research. 1970. V. 17. P. 197–201.
26. **Kirby, J.T.** Evolution equations for edge waves and shear waves on longshore uniform beaches / J.T. Kirby, U. Putrevu, H.T. Ozkan-Haller // Proc. 26th Int. Conf. Coastal Engineering. 1998. P. 203–216.
27. **Кочергин, И.Е.** Нелинейное взаимодействие триады краевых волн / И.Е. Кочергин, Е.Н. Пелиновский // Океанология. 1989. Т. 29. № 6. С. 899–03.
28. Резонансные трехволновые взаимодействия краевых волн Стокса / В.А. Дубинина [и др.]// Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2006. N. 42. № 2. С. 277-284.
29. **Galletta, V.** Nonlinear effects on edge wave development / V. Galletta, G. Vittori // European Journal of Mechanics B\ Fluids. 2004. V. 23. P. 861–878.

30. **Куркин, А.А.** 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. 353.
31. **Kurkin, A.** Shallow-water edge waves above an inclined bottom slowly varied in along-shore direction / A. Kurkin, E. Pelinovsky / European Journal of Mechanics - B/Fluids. 2003. Т. 22. № 4. С. 305–316.

*Дата поступления
в редакцию 15.08.2012*

E.L. Averbukh

SURFACE MANIFESTATIONS OF EXTREME WAVE REGIMES IN THE FIELD OF EDGE WAVES

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

Purpose: Modeling of surfactant's dynamics in the field of topographic trapped waves subject to extreme character of the wave field.

Method: Research based on numerical simulation of the balance equation of the surface concentration. Film dynamics considered in the advection - diffusion - relaxation model. Simulation based on implicit finite-difference method.

Results: Concentration distributions in the field of edge waves were obtained. Process of the wave amplitude changes due to slow longshore variations in the underwater topography, interactions of edge wave triads, effects of dispersive focusing and their surface manifestations were considered.

Application domain: Specific pictures in the field of surfactant film concentration can be used in the interpretation of remote sensing data and diagnostics and identification of underlying anomalous wave processes.

Key words: topographic trapped waves, concentration, surfactant, focusing, nonlinear interactions, amplification.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.518.54

А.М. Ворон, Д.В. Ломакин

ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СЛОЖНЫХ СИСТЕМ С УЧЕТОМ ОШИБОК КОНТРОЛЬНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ АППАРАТУРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработан алгоритм условного поиска дефектов с учетом возможных ошибок контрольно-измерительной аппаратуры.

Ключевые слова: граф, диагностирование, дефект, точки контроля, ошибка контрольно-измерительной аппаратуры.

Постановка задачи

Обеспечение контролепригодности систем является одной из основных задач технологии проектирования и производства сложных систем [1]. Эта задача решается в первую очередь за счет разработки эффективных методов диагностирования систем с использованием соответствующей контрольно-измерительной аппаратуры (КИА). В работе [2] был предложен алгоритм условного поиска дефектов, когда выбор очередной точки контроля зависит от результатов тестирования системы в предыдущих точках контроля. Но при этом считалось, что результаты проверок являются достоверными. К сожалению, при измерении информационных параметров системы всегда имеют место ошибки, снижающие эффективность локализации дефектов в системе и, чаще всего, делают ее невозможной. Поэтому разработка методов и алгоритмов, которые снижают влияние ошибок КИА на результат диагностирования, является актуальной. В данной работе предложен алгоритм условного поиска дефектов, предусматривающий обнаружение и исправление ошибок КИА.

Алгоритм обнаружения ошибок КИА

Результатом измерения параметра в некоторой точке контроля является решение о принадлежности его значения области допустимых значений. Решение принимается равным 1, если значение параметра вышло за пределы области допустимых значений, и равным 0 – в противном случае. Ошибки КИА могут привести к ложным решениям. Если при измерении параметра принято ложное решение, то неисправные блоки, которые проверяются на основе данной точки контроля, будут исключены из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта. Если данная проверка определяет состояния не всех дефектных блоков, тогда начнется процесс поиска дефекта в блоках, состояния которых данная проверка не определяет, в противном случае результаты всех последующих проверок будут равны нулю.

Факт исключения неисправного блока из подмножества блоков, подозреваемых на наличие дефекта, с некоторой вероятностью можно контролировать по m последовательно идущим отрицательным результатам проверки (нулям - дефект не обнаружен). Величина m подбирается экспериментально. Для снятия неопределенности в установлении указанного факта в качестве очередной (тестовой) проверки выбирается одна или несколько предыдущих проверок, давших положительный результат (1 - дефект обнаружен).

Количество тестовых проверок подбирается экспериментально с учетом вероятности ошибок КИА и числа подходящих проверок. Если все результаты проверок снова оказались равными 1, то ошибка отсутствует, в противном случае произошла ошибка в одной из предыдущих проверок. Ошибка может быть найдена с помощью тех же тестовых проверок (одной или нескольких), устанавливая их сначала перед m последними проверками и выполняя их как очередную проверку в программе. Если результаты проверки оказались равны 1, то ошибка отсутствует в предыдущих проверках и тестовые проверки перемещаются вниз. Если при очередном выполнении тестовых проверок результаты оказались равны 0, то ошибка возникла при выполнении предыдущей проверки. Аналогичным образом тестовые проверки могут перемещаться вверх. После обнаружения ошибки она исправляется и тем самым неисправный блок включается в подмножество блоков, подозреваемых на наличие дефекта, и процедура поиска дефектов продолжается.

На рис. 1 представлена блок-схема алгоритма условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА.

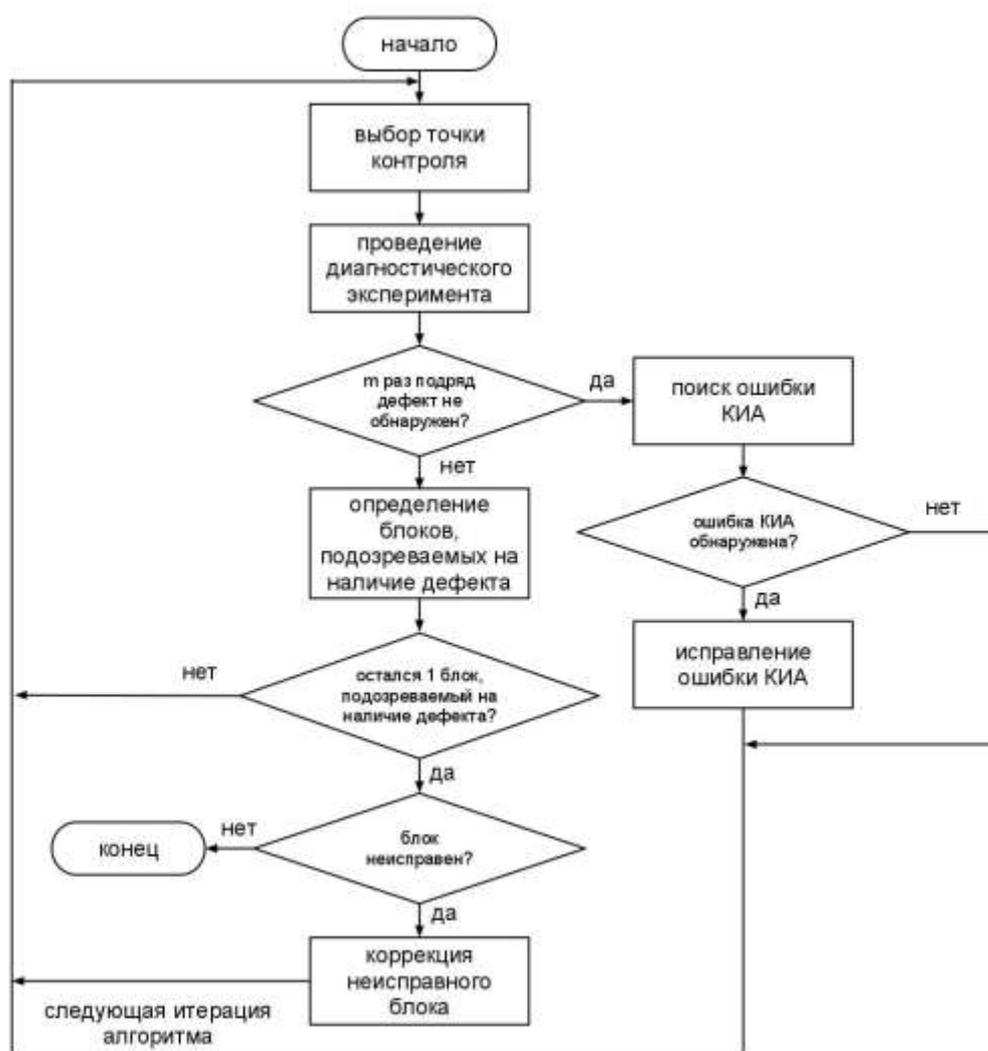


Рис. 1. Блок-схема алгоритма условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА

Экспериментальная часть

В качестве примера рассмотрим определение ошибки КИА при диагностировании системы с однократным дефектом. Модель системы состоит из 15 блоков. В процессе эксплуатации в системе произошел дефект в блоке 10. Количество отрицательных результатов проверок m , указывающее на возможность наличия ошибки КИА, равно 3.

На итерациях 1 и 2 проверки дали положительный результат: проверки в точках контроля a и b обнаружили дефект. На итерации 3 произошла ошибка КИА: неисправный блок 10, который проверялся точкой контроля c , был исключен из подмножества блоков, подозреваемых на наличие ошибки (табл. 1).

Таблица 1

**Пример работы алгоритма условного поиска дефектов
с исправлением ошибок КИА**

№ итерации	Выбранная точка контроля	Множество блоков, состояние которых проверяет выбранная точка контроля	Результат тестирования системы	Множество блоков, подозреваемых на наличие дефекта после тестирования
1	a	{1, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15}	1	{1, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15}
2	b	{1, 3, 4, 5, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15}	1	{1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15}
3	c	{7, 10}	0	{1, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 15}
4	d	{5, 13}	0	{1, 3, 4, 9, 11, 12, 15}
5	e	{3, 11}	0	{1, 4, 9, 12, 15}

В трех подряд идущих итерациях (3, 4, 5 итерации) проверки дали отрицательные результаты (дефект не обнаружен). Этот факт допускает возможность появления ошибки КИА при диагностировании системы. С целью опровержения или подтверждения факта наличия ошибки КИА выполняется процедура поиска ошибок КИА с помощью тестовых проверок (табл. 2).

Таблица 2

Процедура поиска ошибок КИА

№ итерации	Выбранная точка контроля	Множество блоков, проверяемых выбранной точкой контроля	Результат тестирования системы	Множество блоков, подозреваемых на наличие дефекта после тестирования
6	a	{1, 4, 9, 12, 15}	0	-
	b	{1, 4, 9, 12, 15}	0	-
7	a	{1, 3, 4, 9, 11, 12, 15}	0	-
	b	{1, 3, 4, 9, 11, 12, 15}	0	-
8	a	{1, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 15}	0	-
	b	{1, 3, 4, 5, 9, 11, 12, 13, 15}	0	-
9	a	{1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15}	1	{7, 10}
	b	{1, 3, 4, 5, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15}	1	{7, 10}

Тестовые проверки на итерации 6 показали, что множество блоков {1, 4, 9, 12, 15} не содержит дефекта, что подтверждает факт наличия ошибки КИА. Для определения итерации, на которой произошла ошибка КИА, тестовые проверки выполняют поиск дефектов в предыдущих множествах блоков, подозреваемых на наличие ошибки. Ошибка КИА будет обнаружена тестовыми проверками в подмножестве блоков, полученном на итерации 2, следовательно, ошибка КИА произошла на итерации 3.

Коррекция осуществляется посредством замены множества {1, 4, 9, 12, 15} множеством

{7, 10}, которое было исключено ошибочной проверкой. После коррекции процедура поиска дефектов продолжается.

Для рассматриваемой в примере системы был проведен сравнительный анализ алгоритмов с исправлением и без исправления ошибок КИА по времени, затрачиваемого на локализацию дефекта, и по вероятности того, что дефект не будет обнаружен при диагностировании системы. В качестве исходных данных методом статистического моделирования было сгенерировано 1000 состояний системы с однократным дефектом и 1000 состояний системы с двукратным дефектом. Вероятность появления ошибки КИА равна 0.01.

Сравнительный анализ алгоритмов условного поиска дефектов без исправления и с исправлением ошибок КИА

Алгоритм условного поиска дефектов с исправлением ошибок КИА затрачивает больше времени на локализацию дефектов в системе. Это объясняется тем, что алгоритму требуется дополнительное время для поиска ошибок КИА, если есть подозрение на их наличие (рис. 2).

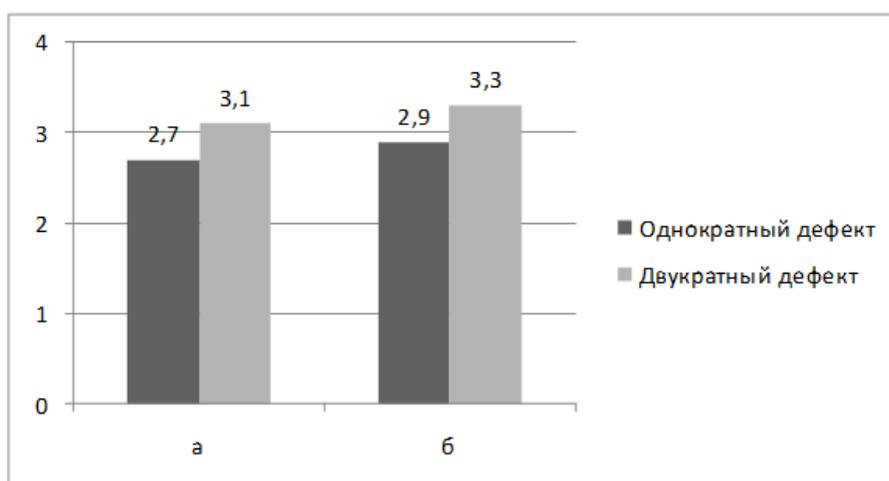


Рис. 2. Среднее время локализации дефекта (в микросекундах) при использовании алгоритма:
а – алгоритм условного поиска дефектов без исправления ошибок КИА;
б – с исправлением ошибок КИА

В случае диагностирования системы с однократным дефектом алгоритм без исправления ошибок КИА пропускает дефект с вероятностью появления ошибки КИА (рис. 3, а).

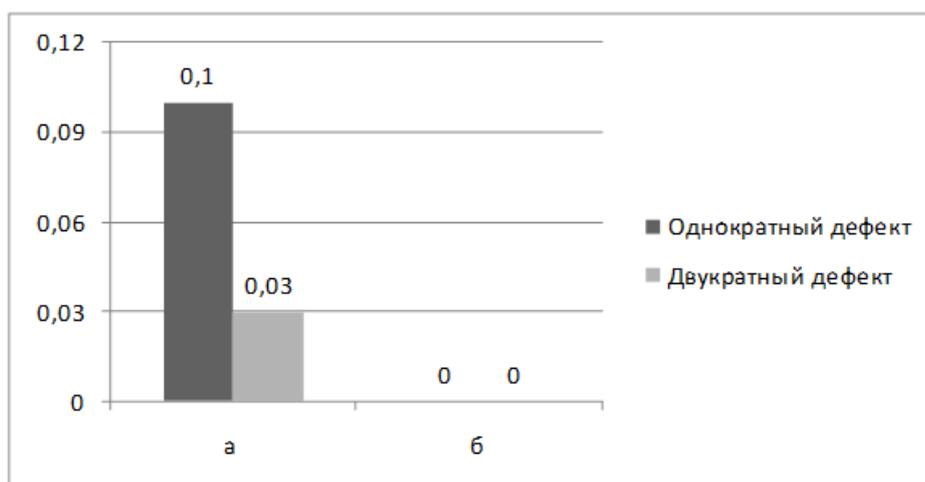


Рис. 3. Вероятность того, что дефект не будет обнаружен при использовании алгоритма:
а – алгоритм условного поиска дефектов без исправления ошибок КИА;
б – с исправлением ошибок КИА

Таким образом, ошибка КИА гарантированно приводит к получению неверного результата при диагностировании системы с однократным дефектом. При использовании алгоритма без исправления ошибок КИА для диагностирования системы с кратным дефектом, вероятность получения неверного результата меньше, чем при использовании данного алгоритма для поиска однократного дефекта. В случае многократного дефекта ошибка КИА приводит к получению неверного результата только тогда, когда ошибка произошла при измерении параметра в точке контроля, определяющей состояния всех неисправных блоков.

Алгоритм условного выбора точек контроля позволил определить ошибки КИА и локализовать все однократные и двухкратные дефекты в системе (рис. 3, б).

Выводы

Разработан алгоритм обнаружения и исправления ошибок КИА в процессе локализации дефектов, что позволяет значительно снизить влияние ошибок на исход диагностирования системы. Процедура обнаружения и исправления ошибок КИА включает в себя:

1) текущий анализ результатов диагностирования системы, позволяющий выявить факт возможного появления ошибки КИА;

2) поиск ошибки КИА с помощью тестовых проверок;

3) коррекцию ошибки КИА.

Реализация алгоритма локализации дефекта с исправлением ошибок КИА дала возможность сократить среднее время поиска дефекта в системе, тем самым повысить эффективность обслуживания системы на всех этапах жизненного цикла.

Библиографический список

1. Сагунов, В.И. Контролепригодность структурно связанных систем / В.И. Сагунов, Л.С. Ломакина. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 11 с.
2. Ломакин, Д.В. Диагностирование сложных технических и программных систем / Д.В. Ломакин, А.А. Иванова, А.М. Ворон // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 3(90). С. 83–88.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

A. Voron, D. Lomakin

DIAGNOSIS OF COMPLEX SYSTEMS CONSIDERING INSTRUMENTATION FAILURES

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

Purpose: Techniques of diagnosis use instrumentation equipment to detect faults in systems. Actually there are faults in instrumentation which decrease diagnosis efficiency. Here it is described how to detect instrument faults during testing.

Design/methodology/approach: An algorithm for diagnosis of complex systems that handles probable instrumentation failures is developed. A method of failure confirmation by controlling test results is given.

Findings: The algorithm described can be applied to the fault diagnosis in systems can be represented by a directed graph.

Research limitations/implications: The present study is an expansion of research in the fault diagnosis sector.

Originality/value: Moreover, the method has proven to be useful in increasing diagnosis efficiency.

Key words: graph, diagnosis, defect, checkpoints, instrumentation.

УДК 612.84; 535.643; 535.247

М.В. Мартынюк

ОЦЕНКА ГРАНИЦ ОБЛАСТЕЙ МЕТАМЕРИИ ДЛЯ НАБОРА
СВЕТОЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ПРИЁМНИКОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается решение проблемы оценки систематической погрешности колориметра, обусловленной линейной независимостью кривых спектральной чувствительности его светочувствительных приёмников и кривых сложения цветов стандартного колориметрического наблюдателя.

Ключевые слова: метамерия, объективная фотометрия, ограниченное множество в метрическом пространстве, линейное программирование, трёхцветные системы, спектральная чувствительность человеческого глаза.

Введение

Считается, что в глазной системе человека существует три вида колбочек, отличающихся кривыми спектральной чувствительности, и цветовое ощущение, вызываемое излучением со спектральным составом $S(\lambda)$, может быть представлено в виде трёх сигналов от колбочек L , M и S (L – long wavelength, M – middle wavelength, S – short wavelength). Если ввести обозначение

$$(A(\lambda), B(\lambda)) = \int_{360\text{nm}}^{830\text{nm}} A(\lambda)B(\lambda)d\lambda, \quad (1)$$

то $L = (S(\lambda), l(\lambda))$, $M = (S(\lambda), m(\lambda))$, $S = (S(\lambda), s(\lambda))$, где $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ и $s(\lambda)$ – кривые спектральной чувствительности колбочек человеческого глаза.

Если векторы $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ и $s(\lambda)$ нормированы, то L , M и S являются ортогональными проекциями вектора $S(\lambda)$ на $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ и $s(\lambda)$, поэтому их принято называть цветовыми координатами спектра $S(\lambda)$ в цветовом пространстве LMS (термин цветовая координата не является полным аналогом термина координата, так как векторы $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ и $s(\lambda)$ неортогональны). Векторы $l(\lambda)$, $m(\lambda)$ и $s(\lambda)$ и аналогичные им далее будем называть базисными.

На основании усреднённых результатов экспериментов Гилда и Райта были получены так называемые кривые сложения цветов $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ для стандартного колориметрического наблюдателя [1] (рис. 1, а). В ходе эксперимента наблюдатель должен был уравнивать все чистые спектральные (монохроматические) цвета с помощью суммы трёх уравнивающих цветов (синего, красного и зелёного с длинами волн 700, 546.1 и 435.8 нм, интенсивностями 243.3, 4.663 и 3.384 Вт, при угле зрения 2°)

Следует заметить, что кривые сложения цветов не являются непосредственно кривыми спектральной чувствительности колбочек человеческого глаза. Они представляют собой их линейную комбинацию. Наблюдатель, уравнивая во время эксперимента результат воздействия на его зрительную систему монохроматического света с длиной волны λ_j , с результатом воздействия взвешенной суммы трёх монохроматических цветов (изменяя веса уравнивающих цветов – $r(\lambda_j)$, $g(\lambda_j)$, и $b(\lambda_j)$), подбирал решение системы линейных уравнений:

$$\begin{cases} l(435.8)r(\lambda_j) + l(456.1)g(\lambda_j) + l(700.0)b(\lambda_j) = l(\lambda_j), \\ m(435.8)r(\lambda_j) + m(456.1)g(\lambda_j) + m(700.0)b(\lambda_j) = m(\lambda_j), \\ s(435.8)r(\lambda_j) + s(456.1)g(\lambda_j) + s(700.0)b(\lambda_j) = s(\lambda_j), \end{cases} \text{ или } [RGB \rightarrow LMS] \times \begin{bmatrix} r(\lambda_j) \\ g(\lambda_j) \\ b(\lambda_j) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l(\lambda_j) \\ m(\lambda_j) \\ s(\lambda_j) \end{bmatrix}.$$

Из подобного эксперимента невозможно получить матрицу перехода от $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ к $l(\lambda)$, $m(\lambda)$, $s(\lambda)$:

$$[RGB \rightarrow LMS] = \begin{bmatrix} l(435.8) & l(456.1) & l(700.0) \\ m(435.8) & m(456.1) & m(700.0) \\ s(435.8) & s(456.1) & s(700.0) \end{bmatrix},$$

и сами кривые спектральной чувствительности человеческого глаза, но R , G и B – цветовые координаты спектра $S(\lambda)$ в цветовом пространстве RGB , вычисленные как $R = (S(\lambda), r(\lambda))$, $G = (S(\lambda), g(\lambda))$, $B = (S(\lambda), b(\lambda))$, будут являться линейной комбинацией цветовых координат спектра $S(\lambda)$ в цветовом пространстве LMS .

Из этого следует взаимная однозначность (биективность) отображения цветовых координат RGB и LMS друг в друга, т.е. **не существует спектров, имеющих одинаковые цветовые координаты в цветовом пространстве RGB и различные цветовые координаты в цветовом пространстве LMS .**

Для описания цветового ощущения человека может подойти любая цветовая система, построенная на базовых векторах (кривых сложения), являющихся линейной комбинацией кривых $r(\lambda)$, $g(\lambda)$ и $b(\lambda)$.

В 1931 г. Международная комиссия по освещению (МКО) предложила в качестве одного из возможных вариантов кривые сложения $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ [1] (рис. 1. б), известные как кривые сложения цветов стандартного колориметрического наблюдателя МКО 1931 г. Переход от кривых $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ к $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ осуществляется умножением на известную матрицу размером $[3 \times 3]$.

В колориметрии принято, что при пропорциональном изменении цветовых координат излучения яркость изменяется во столько же раз, но его цветовой тон и насыщенность цвета остаются неизменными. Последние два параметра в колориметрии называются цветностью и определяют направление цветового вектора в цветовом пространстве [2].

Кривые сложения $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$ и $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$ изменяются достаточно плавно. Из рис. 2 видно, что шаг между отсчётами при их описании равный 5 нм является достаточным и даже избыточным, поэтому переход от непрерывных кривых сложения к дискретным не приведёт к существенному изменению результатов. Далее мы будем рассматривать только дискретные кривые сложения, заданные для длин волн λ_j , где $j = 1 \div N$.

Если рассматривать три значения $x(\lambda_j)$, $y(\lambda_j)$, $z(\lambda_j)$ для определённой длины волны λ_j , как три координаты в трёхмерном пространстве, можно представить кривые сложения в виде одной трёхмерной кривой (рис. 3). Обозначим получившуюся кривую как $C_{xyz}(\lambda)$ и введём специальное обозначение для вектора, имеющего координаты $[x(\lambda_j) \ y(\lambda_j) \ z(\lambda_j)] - C_{xyz}(\lambda_j)$.

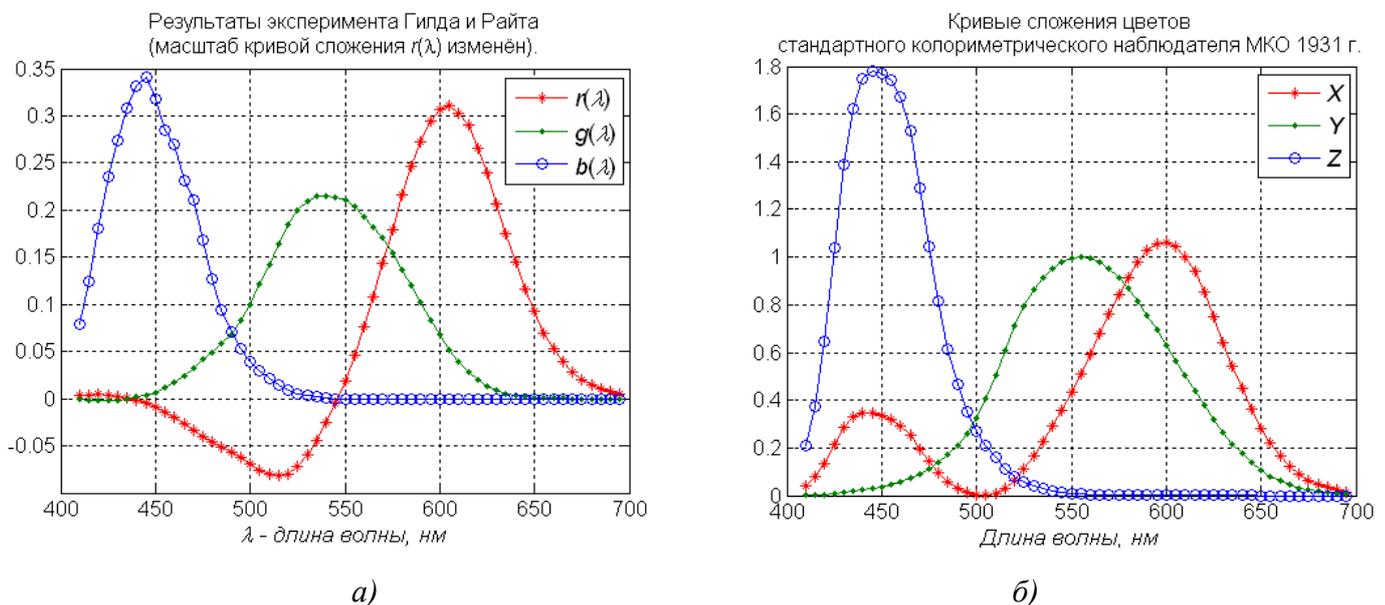
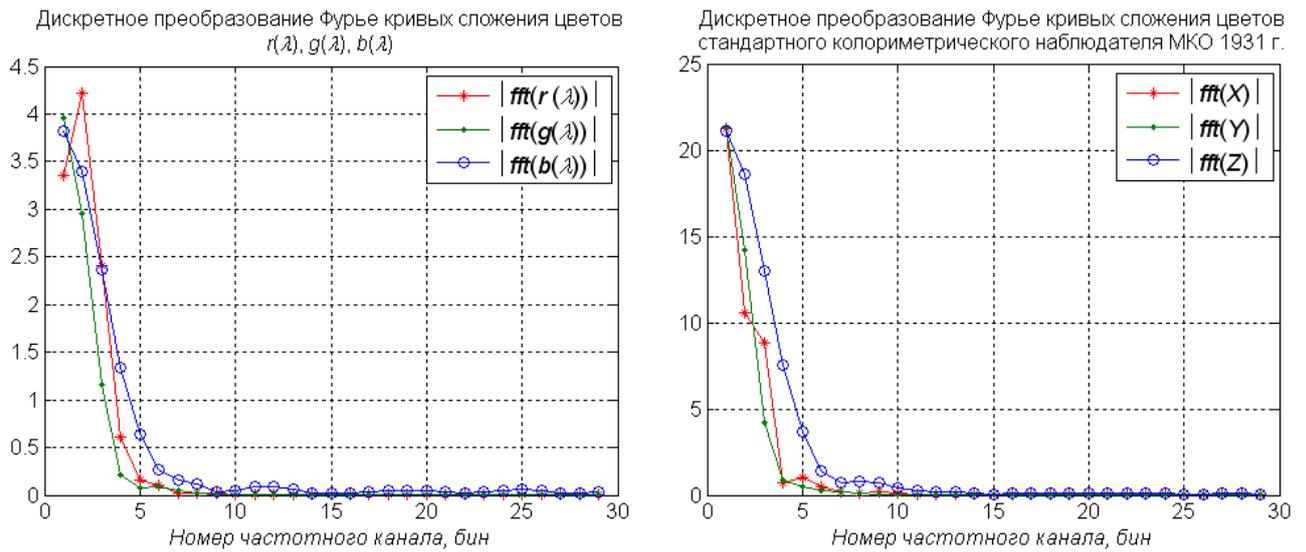


Рис. 1. Кривые сложения цветов:
а – $r(\lambda)$, $g(\lambda)$, $b(\lambda)$; б – $x(\lambda)$, $y(\lambda)$, $z(\lambda)$



а) б)
Рис. 2. Дискретные спектры кривых сложения цветов:
a – $r(\lambda), g(\lambda), b(\lambda)$; *б* – $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$

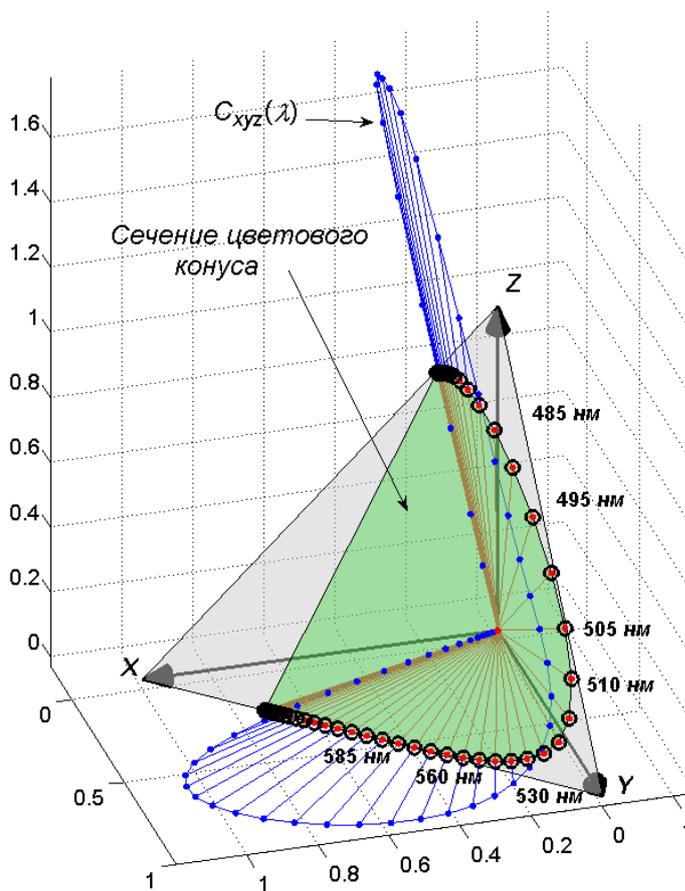


Рис. 3. Кривые сложения цветов $x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$

цветовых координат X, Y , и Z ставят в соответствие три координаты цветности: $x = X / (X+Y+Z)$, $y = Y / (X+Y+Z)$, $z = Z / (X+Y+Z)$, а при описании цветности приводят только x и y , так как $z = 1 - x - y$.

Так как $S(\lambda_i)$ не может принимать отрицательные значения, область всех возможных цветовых координат X, Y , и Z реально существующих спектров (с произвольным, но положи-

Цветовые координаты X, Y , и Z нохроматического спектра $S(\lambda)$, содержащего единственную составляющую с длиной волны λ_j , равны (1) $l_j \cdot x(\lambda_j)$, $S(\lambda_j) \cdot y(\lambda_j)$, $S(\lambda_j) \cdot z(\lambda_j)$ или $l_j \cdot C_{xyz}(\lambda_j)$. Следовательно, направление вектора, проходящего через некоторую точку трёхмерной кривой $v_z(\lambda_j)$, определяет цветность всех монохроматических спектров с длиной волны λ_j . Излучение, имеющее сложный спектральный состав, можно представить в виде суммы монохроматических спектров, а его цветовые координаты в виде взвешенной суммы соответствующих векторов:

$$[X \ Y \ Z] = \sum_{i=1}^N S(\lambda_i) \cdot C_{xyz}(\lambda_i).$$

На рис. 4 приведён пример вычисления цветовых координат для диоматического спектра.

В колориметрии принято оценить цветность любого вектора в цветовом пространстве по координатам его пересечения с плоскостью, заданной уравнением $x + y + z = 1$. Тройке

тельным распределением энергии) ограничена цветовым конусом – выпуклой оболочкой конуса с вершиной в начале координат, боковой поверхности которого принадлежит кривая $C_{xyz}(\lambda)$ [2]. Сечение цветового конуса плоскостью $x + y + z = 1$ (рис. 3) образует кривую спектральных цветов (локус) и линию, замыкающую красный и синий концы локуса. Если локус ограничивает выпуклую область, то он является границей множества всех возможных значений цветовых координат x , y и z .

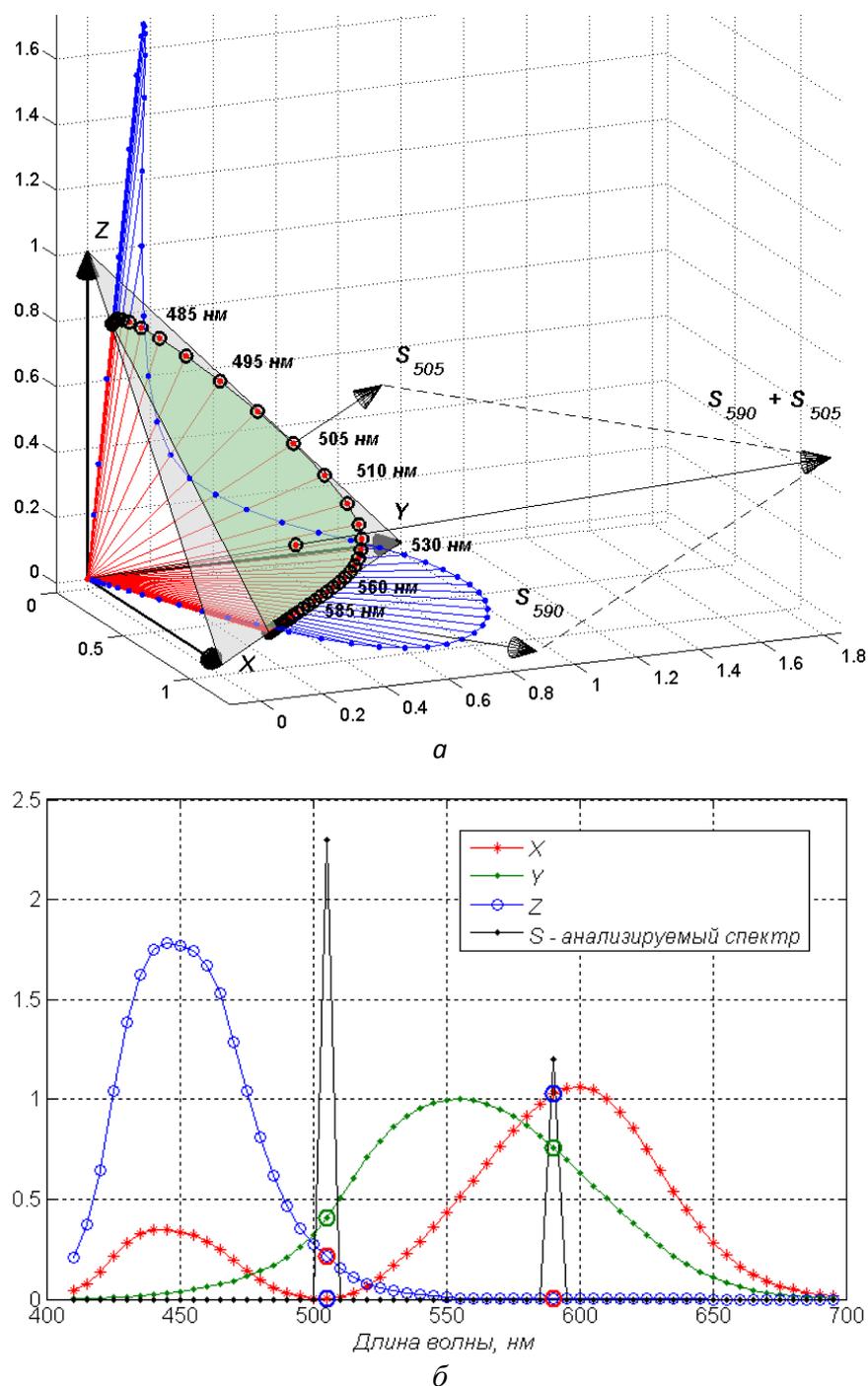


Рис. 4. Вычисление цветовых координат дихроматического спектра

При измерении цвета как физической характеристики используются специальные измерительные приборы – колориметры. Каждый из этих приборов содержит набор светочувствительных элементов с различными кривыми спектральной чувствительности. Обозначим кривые спектральной чувствительности колориметра через $q_i(\lambda)$, а соответствующие им возбуждения от

излучения $S(\lambda)$ (цветовые координаты) через $Q_i = (S(\lambda), q_i(\lambda))$, где i – номер светочувствительного элемента ($i = 1 \div n$) а n – размерность цветового пространства колориметра.

Любые два излучения $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$, различающиеся по спектральному составу, но вызывающие одинаковые возбуждения каждого из светочувствительных приёмников

$$(S_1(\lambda), q_i(\lambda)) = (S_2(\lambda), q_i(\lambda)); \forall i = 1 \div n$$

будут неотличимы для колориметра. Если в качестве колориметра выступает человеческий глаз ($n = 3$) о подобных излучениях $S_1(\lambda)$ и $S_2(\lambda)$ говорят, что они имеют одинаковый цвет, а сами излучения принято называть метамерными [2]. Далее мы будем называть метамерными излучения, имеющие одинаковый цвет в цветовом пространстве колориметра, а множество точек цветового пространства XYZ с координатами цветности x, y, z , являющихся проекцией метамерных излучений, областью метамерии.

В [2] рассмотрены вопросы цветоразличения различных ступенчатых окрасок при изменении спектра освещения, т.е. сколь велики могут быть ошибки при узнавании цвета предмета при помощи данного набора светочувствительных приёмников для данной пары источников – вопросы, связанные с физиологией восприятия цвета.

В представленной статье рассматривается техническая сторона проблемы измерения цвета применительно к более общему случаю – сколь велики могут быть ошибки при измерении цвета произвольного излучения для двух различных наборов светочувствительных приёмников. В качестве одного из двух наборов приёмников может быть выбран человеческий глаз и соответствующий ему один из возможных вариантов цветового пространства XYZ . В этом случае рассматриваемый вопрос сводится к задаче оценки максимальной систематической погрешности колориметра, обусловленной явлением метамерии.

Постановка задачи

Набор отсчётов спектра $S(\lambda_j)$ ($j = 1 \div N$) можно рассматривать как координаты вектора в N -мерном линейном пространстве.

Заданным цветовым координатам $[Q_1 \dots Q_n]$ в цветовом пространстве колориметра соответствует множество векторов N -мерного пространства – S^M , дающих заданную ортогональную проекцию на n базисных векторов $q_i(\lambda)$ ($i = 1 \div n$) (2). Все N -мерные векторы из множества S^M лежат в подпространстве с размерностью $N-n$, полученном пересечением n гиперплоскостей, каждая из которых имеет $N-1$ степень свободы (одна гиперплоскость – одна строка в системе линейных уравнений (2)).

$$\begin{cases} S(\lambda_1) \cdot q_1(\lambda_1) + S(\lambda_2) \cdot q_1(\lambda_2) + \dots + S(\lambda_N) \cdot q_1(\lambda_N) = Q_1, & S(\lambda_j) \geq 0, \\ S(\lambda_1) \cdot q_2(\lambda_1) + S(\lambda_2) \cdot q_2(\lambda_2) + \dots + S(\lambda_N) \cdot q_2(\lambda_N) = Q_2, & q_i(\lambda_j) > 0, \\ \dots & \\ S(\lambda_1) \cdot q_n(\lambda_1) + S(\lambda_2) \cdot q_n(\lambda_2) + \dots + S(\lambda_N) \cdot q_n(\lambda_N) = Q_n, & \forall i = 1 \div n, \forall j = 1 \div N. \end{cases} \quad (2)$$

Очевидно, что пересечение каждой из гиперплоскостей и полупространств $S(\lambda_j) \geq 0$, $\forall j = 1 \div N$ в (2) ограничено, т.е. имеет конечный объём в N -мерном пространстве. Например, конечно множество наборов целых неотрицательных чисел, дающих в сумме заданное число. Пересечение n ограниченных гиперплоскостей также будет ограничено, соответственно множество S^M в метрическом пространстве размерностью N будет ограниченным.

Проекции неограниченного множества всех возможных спектров с неотрицательным распределением энергии на плоскость $x + y + z = 1$ в цветовом пространстве XYZ занимают всю внутреннюю область локуса. Ограниченность множества S^M позволяет предположить, что область внутри локуса, на которую будут проецироваться все $S(\lambda) \in S^M$, назовём её областью метамерии, не будет занимать весь локус.

Ставится задача найти границы области метамерии на плоскости $x + y + z = 1$ в цветовом пространстве XYZ для известных цветовых координат $[Q_1 \dots Q_n]$, заданных в цветовом пространстве некоторого колориметра, имеющего известные кривые спектральной чувствительности $q_i(\lambda)$ ($i = 1 \div n$).

Решение данной задачи позволит определять погрешности оценки координат цветности x, y колориметров только на основании кривых их спектральной чувствительности.

Определение границ области метамерии

Спектр, содержащий n монохроматических спектральных составляющих с длинами волн $\lambda_{a_1}, \lambda_{a_2}, \dots, \lambda_{a_n}$, будем называть n -хроматическим спектром $[a_1, a_2, \dots, a_n]$. Покажем, что область метамерии в цветовом пространстве XYZ ограничена x, y, z координатами всех возможных n -хроматических спектров, имеющих цветовые координаты $[Q_1 \dots Q_n]$ в цветовом пространстве колориметра.

Запишем (2) для случая n -хроматического спектра. Далее условие $S(\lambda_j) \geq 0, q_i(\lambda_j) > 0, \forall i = 1 \div n, \forall j = 1 \div N$ будем полагать обязательным, поэтому его упоминание будем опускать:

$$\begin{cases} S(\lambda_{a_1}) \cdot q_1(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_1(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_1(\lambda_{a_n}) = Q_1, \\ S(\lambda_{a_1}) \cdot q_2(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_2(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_2(\lambda_{a_n}) = Q_2, \\ \dots \\ S(\lambda_{a_1}) \cdot q_n(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_n(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_n(\lambda_{a_n}) = Q_n, \end{cases} \quad (3)$$

где a_1, a_2, \dots, a_n – номера n ненулевых координат вектора $S(\lambda_j)$ ($j = 1 \div N$).

Система линейных уравнений (3) имеет единственное решение $[S(\lambda_{a_1}) S(\lambda_{a_2}) \dots S(\lambda_{a_n})]$

Если $S(\lambda_{a_i}) \geq 0 \forall i = 1 \div n$, то n -хроматический спектр $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ с цветовыми координатами $[Q_1 \dots Q_n]$ существует.

Пусть существует n -хроматический вектор $S(\lambda)$ с ненулевыми a_1, a_2, \dots, a_n координатами, имеющий в цветовом пространстве колориметра цветовые координаты $[Q_1 \dots Q_n]$. Преобразуем это спектр в $(n+1)$ -хроматический, добавив к нему ещё одну ненулевую составляющую, тогда выражение (3) преобразуется в (4):

$$\begin{cases} S(\lambda_{a_1}) \cdot q_1(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_1(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_1(\lambda_{a_n}) + S(\lambda_{a_{n+1}}) \cdot q_1(\lambda_{a_{n+1}}) = Q_1, \\ S(\lambda_{a_1}) \cdot q_2(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_2(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_2(\lambda_{a_n}) + S(\lambda_{a_{n+1}}) \cdot q_2(\lambda_{a_{n+1}}) = Q_2, \\ \dots \\ S(\lambda_{a_1}) \cdot q_n(\lambda_{a_1}) + S(\lambda_{a_2}) \cdot q_n(\lambda_{a_2}) + \dots + S(\lambda_{a_n}) \cdot q_n(\lambda_{a_n}) + S(\lambda_{a_{n+1}}) \cdot q_n(\lambda_{a_{n+1}}) = Q_n. \end{cases} \quad (4)$$

Система линейных уравнений (4) содержит одну свободную переменную, поэтому множество её решений будет лежать на прямой \bar{s} , проходящей через точку с координатами $P = [0 \dots S(\lambda_{a_1}) \dots 0 \dots S(\lambda_{a_2}) \dots 0 \dots S(\lambda_{a_n}) \dots 0 \dots]$, и будет ограниченным, так как $S(\lambda_j) \geq 0, \forall j = 1 \div N$.

Каждая строка в (4) это уравнение i -й плоскости, вектор нормали к которой имеет неотрицательные координаты $\bar{n}_i = [0 \dots q_i(\lambda_{a_1}) \dots 0 \dots q_i(\lambda_{a_2}) \dots 0 \dots q_i(\lambda_{a_n}) \dots 0 \dots q_i(\lambda_{a_{n+1}}) \dots 0 \dots]$. Любой вектор параллельный i -той плоскости будет ортогонален также вектору нормали \bar{n}_i . Прямая, содержащая множество решений (4), является пересечением n таких плоскостей. Соответственно ненулевой вектор, параллельный данной прямой (обозначим его \bar{V}), будет ортогонален каждому из векторов $\bar{n}_i, \forall i = 1 \div n$, т.е. $(\bar{V}, \bar{n}_i) = 0, \forall i = 1 \div n$, а это невозможно, если все его координаты положительные. Соответственно и вектор \bar{V} и вектор $(-1) \cdot \bar{V}$ будут иметь отрицательные координаты.

Движение из любой точки прямой \bar{s} , являющейся решением (4), в направлении вектора \bar{V} или вектора $-\bar{V}$ приведёт к уменьшению, по крайней мере, одной из координат. Продолжая движение вдоль векторов \bar{V} и $-\bar{V}$, мы попадём на границы отрезка, содержащего всё множество решений (4), в точку, для которой одна из переменных $[S(\lambda_{a_1}) S(\lambda_{a_2}) \dots S(\lambda_{a_n}) S(\lambda_{a_{n+1}})]$ обратится в ноль, и при дальнейшем перемещении вдоль \bar{V} и $-\bar{V}$ станет отрицательной.

Равенство нулю одной из переменных $[S(\lambda_{a_1}) S(\lambda_{a_2}) \dots S(\lambda_{a_n}) S(\lambda_{a_{n+1}})]$ означает, что гра-

ничными точками отрезка, содержащего множество решений (4), являются координаты двух n -хроматических спектров.

При ортогональном проецировании в линейном пространстве некоторого множества точек расстояния между проекциями максимально удалённых точек будет максимальным, следовательно:

Проекция множества $(n+1)$ -хроматических векторов, имеющих в цветовом пространстве колориметра размерности n одинаковые координаты $[Q_1 \dots Q_n]$, в любое другое цветовое пространство будет принадлежать отрезку, ограниченному проекциями n -хроматических векторов, имеющих координаты $[Q_1 \dots Q_n]$ в цветовом пространстве колориметра.

Теперь вернёмся к системе линейных уравнений (2). Некоторое ограниченное множество S^M , полученное в результате пересечения подпространства с размерностью $(N-n)$ и полупространств $S(\lambda_j) \geq 0, \forall j = 1 \div N$. Данное пересечение даёт выпуклый многогранник [3]. Вершинами многогранника в N -мерном пространстве являются все n -хроматические векторы (спектры), удовлетворяющие (3), рёбрами – множество всех $(n+1)$ -хроматических векторов, удовлетворяющих (4), гранями – множество всех $(n+2)$ -хроматических векторов, имеющих координаты $[Q_1 \dots Q_n]$ в цветовом пространстве колориметра. Очевидно, что при проекции такого N -мерного многогранника в пространство размерности r ($r < N$) всё множество вершин выпуклой оболочки r -мерного многогранника будет являться подмножеством проекций вершин N -мерного многогранника.

Следовательно, для поиска границы максимально возможного разброса действительных цветовых координат x, y всех возможных спектров с положительным распределением энергии имеющих в цветовом пространстве колориметра координаты $[Q_1 \dots Q_n]$ достаточно:

- решить систему линейных уравнений (3) для каждого из возможных n -хроматических спектров, перебрав все возможные комбинации $[a_1, a_2, \dots, a_n]$ (всего C_N^n вариантов), т.е. найти все возможные $P = [0 \dots S(\lambda_{a_1}) \dots 0 \dots S(\lambda_{a_2}) \dots 0 \dots S(\lambda_{a_n}) \dots 0 \dots]$, такие, что $S(\lambda_{a_i}) \geq 0, \forall i = 1 \div n$ и $(P, q_1(\lambda)) = Q_1, \dots, (P, q_n(\lambda)) = Q_n$;
- вычислить для каждого из полученных решений (P) его цветовые координаты X, Y, Z в цветовом пространстве XYZ и координаты цветности x, y, z ;
- найти кусочно-линейную выпуклую оболочку для множества полученных точек – область метамерии.

Задавшись некоторым начальным значением N (соответственно шагом $\Delta\lambda$), можно уменьшать шаг интерполяции кривых спектральной чувствительности приёмников (увеличивая N) до тех пор, пока дальнейшее увеличение N перестанет приводить к существенному изменению границы области метамерии. Необходимо заметить, что N не может быть очень большим (например, при $N=52$ и $n=3$ число трихроматических спектров $C_{52}^3 = 22100$, при $N=52$ и $n=4$ $C_{52}^4 = 270725$, при $N=52$ и $n=5$ $C_{52}^5 = 2598960$ и т.д.), поэтому данный метод может использоваться, скорее, для качественной оценки границ области метамерии.

Из изложенного следует, что, чем больше спектральных составляющих в каждом из метамерных спектров, тем ближе (в среднем) их проекции окажутся к центру метамерной области.

Экспериментальная проверка метода

Для численной экспериментальной проверки предложенного метода в качестве набора светочувствительных приёмников была выбрана ПЗС-матрица (прибор с зарядовой связью) ICX285AQ производства фирмы SONY [4] с размерностью цветового пространства $n=3$. Кривые спектральной чувствительности выбранной матрицы в трёхмерном виде приведены на

Рис. 5.

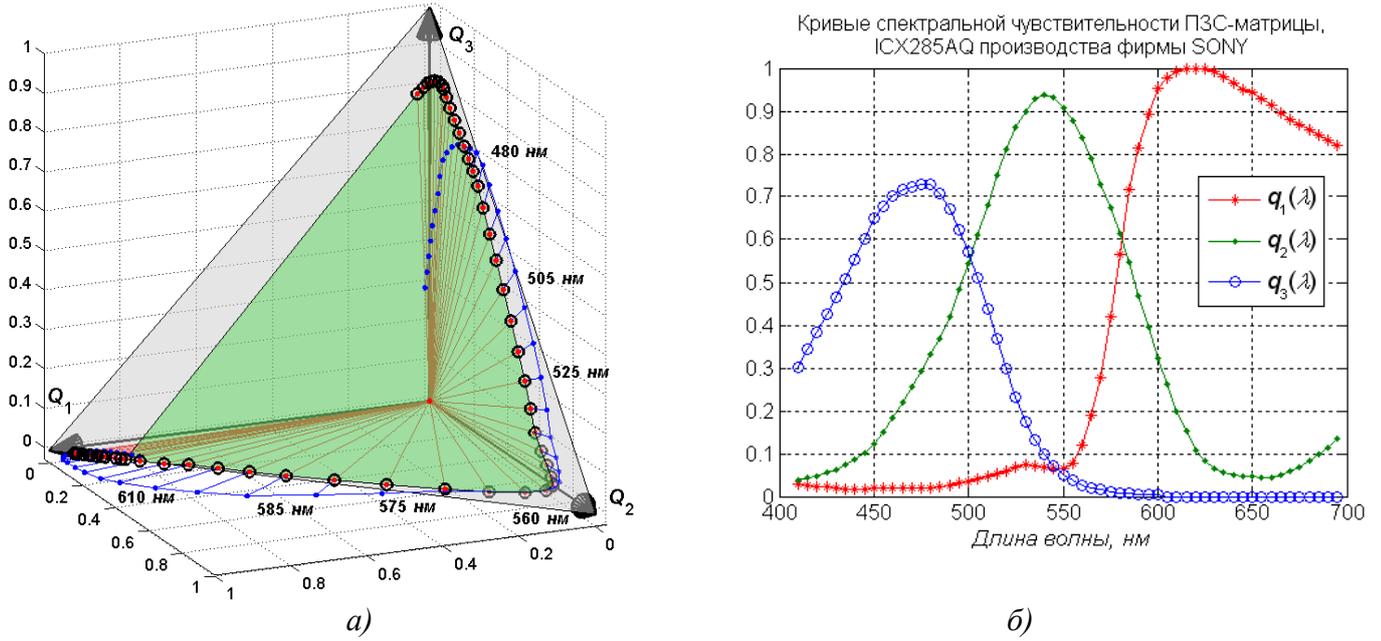


Рис. 5. Кривые спектральной чувствительности ПЗС-матрицы ICX285AQ

Из рис. 5, а видно, что кривые спектральной чувствительности ПЗС-матрицы выбирались таким образом, чтобы обеспечить максимальное использование цветового пространства. Так как цветовой конус данного набора светочувствительных приёмников заполняет почти всё цветовое пространство, на выходе ПЗС-матрицы практически отсутствуют «запрещённые» комбинации цветов, что повышает информативность результатов.

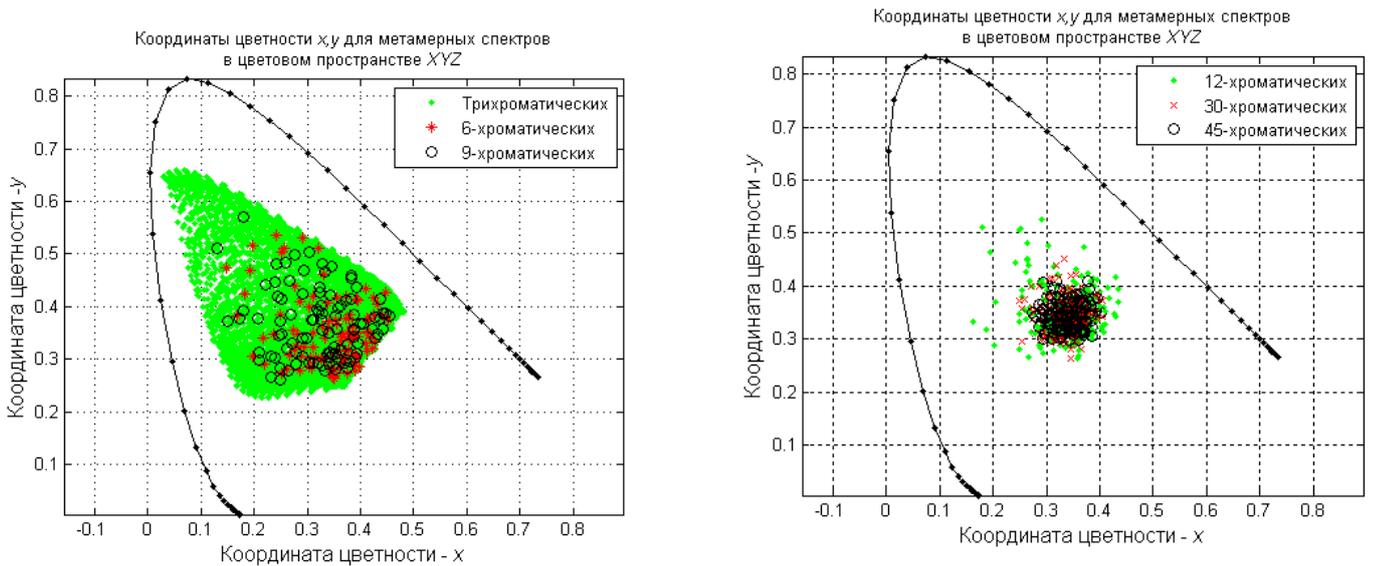


Рис. 6. Координаты цветности x, y метамерных спектров

Далее задавался набор цветковых координат $[Q_1 Q_2 Q_3]$, для которого вычислялись все трихроматические спектры и некоторое достаточно большое количество случайных 4, 5, ..., N -хроматических спектров.

Первая серьёзная теоретическая попытка оценить степень метамеризма окрасок была предпринята в работах [5] и [6]. В них же описан метод численной генерации метамерных спектров, так называемый «прямой» метод. Сначала определялась базовая совокупность

спектральных коэффициентов отражения окрасок при исходном освещении, затем из этой совокупности выбирались краски, имеющие один и тот же цвет. Однако данный метод не подходит для генерации спектров с заданными цветовыми координатами, поэтому был предложен метод, основывающийся на свойствах линейного пространства. Проекция суммы векторов равна сумме проекций, а изменение длины вектора приводит к пропорциональному изменению длины его проекции. Следовательно, проекции в цветовое пространство колориметра любых линейных комбинаций метамерных векторов будут являться масштабными копиями вектора $[Q_1 \ Q_2 \ Q_3]$. Так как масштабирование нового метамерного вектора не изменит его координат цветности x, y в цветовом пространстве XYZ , координаты цветности можно вычислять без дополнительных преобразований.

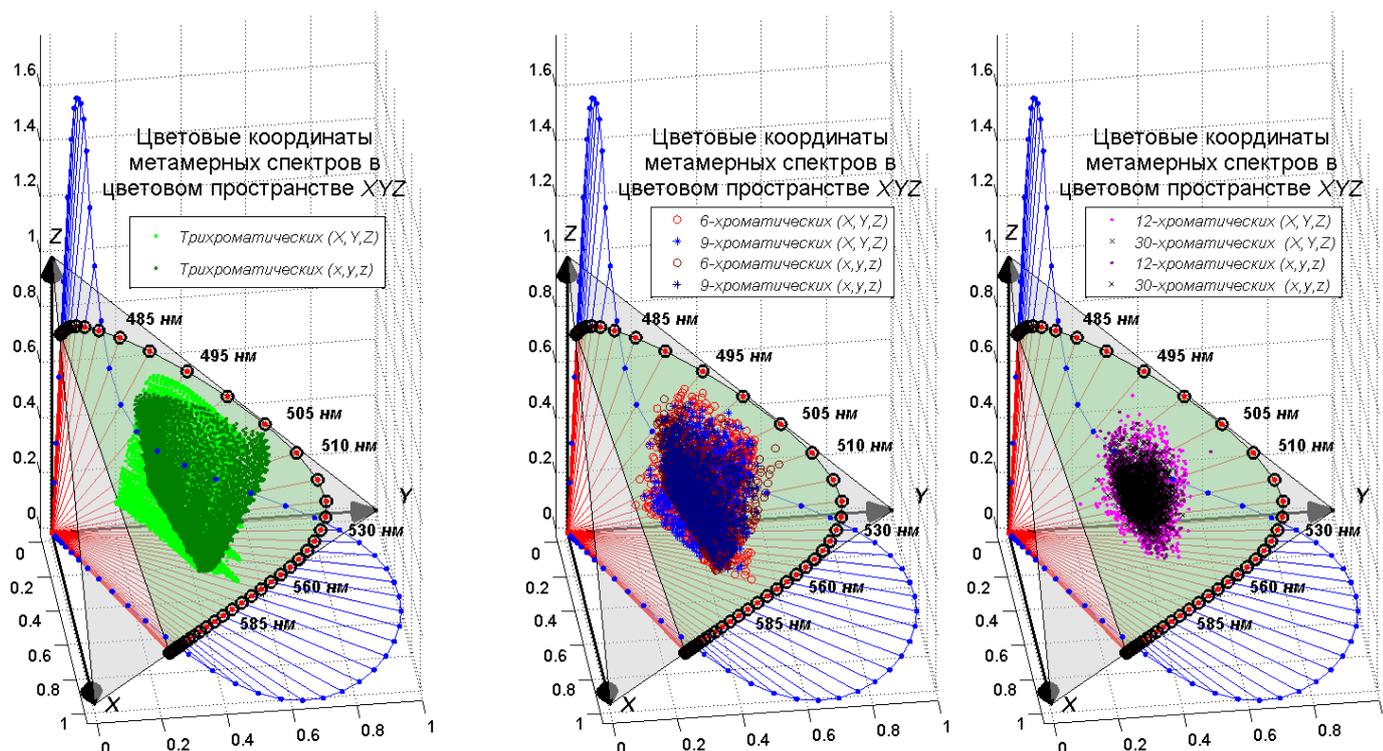


Рис. 7. Цветовые координаты метамерных спектров X, Y, Z и их проекция x, y, z на плоскость $x + y + z = 1$

В качестве исходного набора метамерных векторов используются трихроматические спектры с положительным распределением энергии, вычисленные в соответствии с предыдущим пунктом.

При численном моделировании были выбраны следующие параметры:

- координаты в цветовом пространстве ПЗС-матрицы: $[0.4122, 0.3515, 0.2363]$;
- размерность спектров, кривых спектральной чувствительности и кривых сложения $N=58$.

Общее количество возможных трихроматических спектров составило 30 856, из них 7312 давали проекцию в цветовое пространство ПЗС-матрицы при положительно определённых координатах. Результаты моделирования приведены на рис. 6 и рис. 7.

Выводы

Предложен метод качественной оценки границ систематической погрешности колориметра, имеющего произвольное количество светочувствительных приёмников, обусловленной линейной независимостью кривых спектральной чувствительности светочувствительных приёмников колориметра и кривых сложения цветов стандартного колориметрического наблюдателя. Предлагаемый метод может быть использован как для оценки погрешно-

стей трёхкомпонентных колориметров, использующих набор корректирующих фильтров, так и для оценки погрешности определения цвета с помощью спектрофотометров.

Предложенный метод определяет только теоретический предел матамеризма и не учитывает никаких ограничений на формы спектров излучений, кроме положительности распределения энергии.

Библиографический список

1. [Электронный ресурс] // <http://cvr1.ioo.ucl.ac.uk/>
2. **Максимов, В.В.** Трансформация цвета при измерении освещения / В.В. Максимов. – М.: Наука, 1984. – 161 с.
3. [Электронный ресурс] // <http://ru.wikipedia.org/wiki/>
4. [Электронный ресурс] // http://www.datasheetcatalog.com/datasheets_pdf/I/C/X/2/ICX285.html
5. **Stiles, W.S.** Counting metameric object colors / W.S. Stiles, G.W. Wyszecki. – J. Opt. Soc. Amer., 1962. V. 52. N 3. P. 313–328.
6. **Stiles, W.S.** Counting metameric object-color stimuli using frequency-limited spectral reflectance functions / W.S. Stiles, G. Wyszecki, N. Ohta // J. Opt. Soc. Amer., 1977. V. 67. N 6. P. 779–784.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

M.V. Martinuk

METAMERIC AREA ESTIMATION FOR THE SET OF THE LIGHT-SENSITIVE ELEMENTS

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

Purpose: This article deals with technical issues of color measurement.

Design/methodology/approach: The paper gives a method of estimating the error value in measuring the color of an arbitrary radiation for two different sets of light-sensitive detectors. As one of the two sets of light-sensitive detectors, can be selected the human eye. In this case, the problem is reduced to the question of estimating the maximum systematic error of the colorimeter, due to the phenomenon of the metamerism.

Implications: The solution to this problem allows to determine the error of estimates of chromaticity coordinates x , y colorimeters only on the basis of their spectral sensitivity curves. The proposed method allows to estimate the errors of the three-component colorimeters. This method can also evaluate the accuracy of color measurement by the spectrophotometer.

Originality/value: This paper proposes a method of qualitative assessment of the boundaries of a systematic error of the colorimeter, which has an arbitrary number of light-sensitive detectors. The proposed method only determines the theoretical limit of the metamerism. The method does not take into account the restrictions on the shape of the spectra of radiation except for the positivity of the energy distribution.

Key words: metamerism, objective photometry, bounded set in a metric space, linear programming, three-color system, spectral sensitivity of the eye.

УДК 519.8

Е.А. Лазарев

О ПРИМЕНЕНИИ ЭВРИСТИК ДЛЯ МЕТОДА ВЕТВЕЙ И ГРАНИЦ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМИЗАЦИИ СЕТИ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Модернизация существующих сетей передачи данных является крайне важной и актуальной задачей, так как поставщикам услуг Интернет необходимо удовлетворять все растущие требования конечных пользователей. Для решения этой задачи следует использовать математические модели сетей передачи данных и эффективные алгоритмы оптимизации. В статье предлагаются эвристики для сокращения времени работы метод ветвей и границ нахождения множества оптимальных по Парето решений на примере бикритериальной задачи оптимизации сети передачи данных.

Методология проведения работы: Применяется эвристика нахождения субоптимальной оценки, используемая при решении однокритериальных задач оптимизации, а также ряд эвристик, специфичных для рассматриваемой бикритериальной задачи. Для проверки эффективности рассматриваемых эвристик производится серия вычислительных экспериментов.

Результаты и область применения: Использование эвристики нахождения субоптимальной оценки эффективно при решении не только однокритериальных, но и бикритериальных задач оптимизации нахождения множества Парето, что доказывается результатами вычислительных экспериментов.

Вывод: Предложенные эвристики позволили существенно сократить время работы метода ветвей и границ.

Ключевые слова: метод ветвей и границ, бикритериальная оптимизация, планирование сетей.

Введение

С развитием сети Интернет, сетей связи и коммуникации люди стали обмениваться все большими объемами информации. Немаловажную роль играет доступность телекоммуникационных услуг. Так, количество пользователей сети Интернет увеличилось с 26 млн в 1995 г., до 1,5 млрд к настоящему времени.

По прогнозам компании Cisco, объем передаваемых данных в сети Интернет к 2015 г. возрастет в четыре раза, достигнув отметки в тысячу экзабайт в год. Такое значительное увеличение количества передаваемой информации будет оказывать существенную нагрузку на имеющиеся сети передачи данных (СПД). Таким образом, оптимизация существующих и создание новых СПД, способных удовлетворить все растущие требования конечных пользователей, являются крайне важными и актуальными задачами.

Для нахождения оптимальной структуры сети, основанной на бикритериальной модели СПД, описанной в работе [3], предлагается метод ветвей и границ, а также эвристики, позволяющие существенно уменьшить время работы данного алгоритма в среднем; приводятся результаты вычислительных экспериментов.

Математическая модель сети передачи данных и постановка задач оптимизации

Процедура оптимизации базируется на модели сети передачи данных, основанной на классических потоковых моделях [2]. Известен ориентированный ациклический граф $G = (V, E)$, задающий существующую СПД (V и E – множества вершин и ребер соответственно). Вершинам соответствуют узловые элементы сети (коммутаторы). Каждое ребро $(u, v) \in E$ имеет положительную пропускную способность $c(u, v)$, обусловленную техническими характеристиками конкретного канала передачи данных.

В графе выделяются две особые вершины – источник информации s и сток t . Из источника ведут магистральные каналы, соединяющие сеть доступа с магистральной сетью. В сток ведут ребра от коммутаторов, к которым напрямую подключены конечные пользователи.

Для описания каналов передачи данных, которые могут быть достроены, задается множество ребер E' ($E \cap E' = \emptyset$). Для каждого $(u, v) \in E'$ известна пропускная способность $c'(u, v)$ и стоимость строительства $p'(u, v)$.

Возможным планом проведения новых каналов является множество ребер E^* такое, что $E^* \subseteq E'$. При этом рассматриваются стоимость строительства сети передачи данных

$$Q_1(x) = \sum_{(u,v) \in E} p'(u, v) \quad (1)$$

и величина максимальной пропускной способности сети

$$Q_2(x) = \sum_{v \in V} f(s, v), \quad (2)$$

задаваемые графом $G^* = (V, E \cup E^*)$. Далее будем обозначать величину потока в произвольном графе G через функцию $F(G)$. Причем функция потока $f: V \times V \rightarrow \mathcal{R}$ (величина $f(u, v)$ задает величину потока, передаваемого по ребру (u, v) в единицу времени) должна удовлетворять трем условиям:

- 1) ограниченность пропускной способности: $f(u, v) \leq c(u, v)$ для всех $u, v \in V$;
- 2) антисимметричность: $f(u, v) = -f(v, u)$ для всех $u, v \in V$;
- 3) сохранение потока: для всех $u \in V \setminus \{s, t\}$: $\sum_{v \in V} f(u, v) = 0$.

Задача оптимизации формулируется следующим образом

Задача I-1. По заданным ациклическим ориентированным графам $G = (V, E)$ и множеству ребер E' ($E \cap E' = \emptyset$), матрицам пропускных способностей $c(u, v)$, $c'(u, v)$ и матрице стоимости ребер $p'(u, v)$ найти все множество Парето-оптимальных решений задачи $\min_{x \in D} (Q_1(x)), \max_{x \in D} (Q_2(x))$, отсортированных по первому (второму) критерию.

Для данной задачи было доказано, что множество оптимальных по Парето решений может состоять из всех элементов множества решений D , мощность которого экспоненциально зависит от размерности задачи. Так же была доказана NP-трудность задачи I-1 [3]. Принимая во внимание гипотезу $P \neq NP$, и то, что мощность множества Парето может быть очень большой (например, для задачи размерности 20 количество недоминируемых решений может составлять 1 048 576) формулируется задача поиска субоптимального решения I-2 [4]:

Задача I-2. По заданным ациклическим ориентированным графам $G = (V, E)$ и множеству ребер E' ($E \cap E' = \emptyset$), матрицам пропускных способностей $c(u, v)$, $c'(u, v)$ и матрице стоимости ребер $p'(u, v)$ построить субоптимальное множество решений.

Для задачи I-2 были предложены генетические алгоритмы поиска субоптимального решения [4]. Для проверки точности предложенных алгоритмов необходимо вычислять все множество оптимальных по Парето решений. Метод полного перебора, используемый для этих целей, не способен находить ответ к задаче за приемлемое время, в случае, когда мощность множества E' превышает 30. В данной работе предлагается метод ветвей и границ и способы его ускорения работы для нахождения всего множества оптимальных по Парето решений задачи бикритериальной оптимизации сети передачи данных, который позволит искать решения для задач большей размерности.

Описание метода ветвей и границ

Под методом ветвей и границ понимается алгоритм решения задачи, имеющий древовидную структуру поиска оптимального решения и использующий результаты решения оценочных задач [5]. Древовидная структура, описывающая разбиение всего множества решений на непересекающиеся подмножества, называется деревом ветвления. Приведем описание реализации метода ветвей и границ для решения задачи I-1.

1. Пронумеруем все ребра из множества E' произвольным образом различными числами от 1 до $|E'|$. Обозначим через e_i ребро с номером i из множества E' .

2. Каждая вершина дерева ветвления соответствует некоторому подмножеству D_p области допустимых решений и содержит нижнюю (L_p) и верхнюю (H_p) оценки значения пары $(Q_1(x), Q_2(x))$ на этом подмножестве. При этом корневая вершина (нулевой уровень дерева) соответствует всей области допустимых решений D , а любой вершине уровня $k > 0$ соответствует подмножество решений, получающееся при фиксировании первых k ребер (из множества E') сети. Под термином «фиксирование» понимается тот факт, что для выбранных ребер уже принято решение, будут они построены или нет. Обозначим через S множество, содержащее фиксированные ребра, которые будут построены.

3. Из каждой вершины (за исключением концевых вершин, в которых зафиксированы все $|E'|$ ребер) производится ветвление на два подмножества, т.е. осуществляется дихотомическое ветвление. При этом первое из подмножеств получается путем фиксирования очередного ребра, но без добавления его во множество S , таким образом, данное ребро не будет построено в сети. Второе из подмножеств получается путем фиксирования очередного ребра с добавлением его во множество S , таким образом, данное ребро будет построено в сети.

4. Нижняя оценка L_p решения x после фиксирования первых k ребер:

$$a. Q_1(x) = \sum_{e \in S} p'(e) + \sum_{i=k+1}^{|E'|} p'(e_i), \text{ т.е. сумме стоимостей строительства фиксированных}$$

ребер, которые будут построены, и ребер, которые еще не рассматривались, т.е. ребер с номерами, большими k .

b. $Q_2(x) = F(G(V, E \cup S))$, т.е. величина потока для графа, полученного путем добавления в исходный множества построенных фиксированных ребер.

5. Верхняя оценка H_p решения x после фиксирования первых k ребер:

$$a. Q_1(x) = \sum_{e \in S} p'(e), \text{ т.е. сумме стоимостей строительства фиксированных ребер, кото-}$$

рые будут построены.

b. $Q_2(x) = F(G(V, E \cup S \cup \{e_i | i > k\}))$, т.е. величине потока для графа, полученного путем добавления в исходный множества построенных фиксированных ребер и всех ребер, которые еще не рассматривались, т.е. ребра с номерами, большими k .

б. Функцией ветвления является рекурсивная функция, на вход которой подается номер ребра k для рассмотрения (подразумевается, что при вызове функции с параметром k ребра с номерами от 1 до $k-1$ являются фиксированными). Запуск алгоритма производится вызовом функции ветвления с аргументом 1.

7. Для каждой вершины дерева ветвления рассчитывается верхняя H_p и нижняя L_p оценки решения p . Они сравниваются с решениями из множества рекордов R . Пусть H_r и L_r – верхняя и нижняя оценки решения $r \in R$, тогда:

a. если $L_p \succ H_r$, то $R = R \setminus \{r\}$;

b. если $L_r \succ H_p$, то ветвление из данной вершины прекращается;

c. если $\neg \exists r \in R : L_r \succ H_p$, то, если текущая вершина дерева ветвления является концевой, то решение p добавляется во множество рекордов R ($R = R \cup \{p\}$). В противном случае продолжается ветвление из данной вершины (вызывается функция ветвления с аргументов $k+1$). Здесь символ \succ обозначает доминированность по Парето одного решения над другим.

8. Останов алгоритма выполняется при невозможности осуществления дальнейшего ветвления.

В результате работы алгоритма множество R содержит все решения задачи I-1 оптимальные по Парето.

Следует отметить, что предложенный метод крайне прост в реализации и не требует явного хранения в памяти подмножеств решений, которые необходимо подвергнуть процедуре ветвления.

Анализ метода

В худшем случае метод по сложности будет сравним с алгоритмом полного перебора. В работе [3] приведен пример сети, в которой множество оптимальных по Парето решений имеет мощность $2^{|E'|}$. На такой сети метод ветвей и границ в ходе работы не сможет отсеять ни одного подмножества решений и, в итоге, построит дерево ветвлений, состоящее из $|E'|$ уровней (корень дерева имеет уровень 0). Уровень глубины i будет иметь 2^i вершин. Таким образом, вычислительная сложность алгоритма такая же, как и у полного перебора, и составляет $O(2^{|E'|} \cdot |V|^3)$.

Несмотря на то, что алгоритм полного перебора и метод ветвей и границ имеют одинаковую вычислительную сложность, среднее время работы метода ветвей и границ гораздо меньше, чем у алгоритма полного перебора, что доказывается результатами вычислительных экспериментов, приведенными далее.

Требования по памяти данного алгоритма имеют экспоненциальную зависимость от размера входных данных, так как необходимо хранить все недоминируемые решения, найденные в ходе работы. В худшем случае, в памяти будет храниться $2^{|E'|}$ решений. Таким образом, требования по памяти составляют $O(2^{|E'|} \cdot |E'|)$.

Описание эвристик

При решении оптимизационных задач методом ветвей и границ можно добиться существенного сокращения времени работы алгоритма за счет нахождения некоторого решения с использованием жадных или, например, эвристических алгоритмов, тем самым уменьшив число операций ветвления и сократив перебор рассматриваемых вариантов. Такой подход доказал свою эффективность при решении однокритериальных задач [1]. Однако при решении бикритериальных задач с использованием концепции оптимальности по Парето эффективность такого подхода еще необходимо проверить.

В работе предлагается применить генетический алгоритм для нахождения субоптимального множества решений, которым изначально инициализируется множество рекордов R метода ветвей и границ. Это позволит на раннем этапе работы метода отсеять заведомо неоптимальные подмножества решений. При этом используется генетический алгоритм, описанный в статье [4], с некоторыми модификациями:

- количество поколений популяции ограничивается величиной $100 \cdot |E'|$. Таким образом, время работы генетического алгоритма будет невелико, но при этом будет найдено некоторое приближение множества Парето;
- максимальный размер множества недоминируемых решений (элиты) не задается, так как, в отличие от задачи I-2, в I-1 ставится цель найти все множество Парето, а не только репрезентативную выборку.

Описанная выше эвристика может применяться при решении любой бикритериальной задачи оптимизации. Теперь рассмотрим две эвристики, специфичные для рассматриваемой задачи.

- эвристика предварительной обработки состоит в том, чтобы удалить из графа компоненты, не связанные с истоком, и поддеревья, не соединенные со стоком. Тем самым,

достигается уменьшение стоимости строительства при сохранении пропускной способности;

- эвристика удаления пустых ребер заключается в том, что после вычисления оценки (верхней или нижней) для некоторого подмножества решений необходимо удалить ребра, которые были построены (но не зафиксированы), и по которым не течет поток. В результате удаления уменьшается стоимость строительства при сохранении пропускной способности сети.

Результаты вычислительных экспериментов

Приведем результаты тестирования программной реализации метода ветвей и границ без использования и с применением эвристик, а также алгоритма полного перебора, выполненных на языке C++. Вычислительные эксперименты заключались в нахождении всего множества оптимальных по Парето решений для 100 различных случайным образом сгенерированных сетей передач данных с числом ребер во множестве E' , равным 15, 20, 25, 30, 35 и 40. Вычислительные эксперименты проводились на компьютере с двухядерным процессором Intel® Core™ I5 M520 с частотой 2.4 ГГц.

В табл. 1 приведены следующие статистические значения показателя времени работы на тесте: минимальное и максимальное значение (указаны в скобках), а также среднее значение (приведено через запятую после квадратных скобок) в тестовом наборе задач. Столбец t_{bf} содержит время работы алгоритма полного перебора, $t_{B\&B}$ – метода ветвей и границ без использования эвристик, $t_{B\&B+SPEA}$ – метода ветвей и границ с применением описанных выше эвристик.

Для случаев $|E'| = 35$ и $|E'| = 40$ указано приближенное время работы алгоритма полного перебора, вычисленное аналитически, исходя из анализа вычислительной сложности алгоритма, поскольку реальный запуск на таких больших входных данных не представляется возможным.

Таблица 1

Время работы алгоритмов

$ E' $	$ V $	$ E $	t_{bf}	$t_{B\&B}$	$t_{B\&B+SPEA}$
15	[7; 11], 9	[18; 45], 35	[0.085; 0.52], 0.224	[0.008; 0.205], 0.057	[1.408; 7.242], 3.164
20	[8; 11], 9	[24; 45], 35	[1.926; 13.253], 6.091	[0.032; 3.693], 0.493	[1.435; 6.62], 2.972
25	[9; 12], 10	[30; 53], 40	[82.612; 419.717], 186.77	[0.062; 54.595], 5.01	[2.494; 36.971], 6.750
30	[9; 14], 12	[30; 72], 52	[2947.527; 15062.571], 7346.636	[0.312; 897.448], 62.843	[3.471; 475.878], 40.844
35	[10; 14], 13	[37; 72], 63	250000	[0.27; 3541.633], 297.496	[3.641; 1712.806], 136.033
40	[11; 16], 13	[45; 93], 72	8250000	[11.886; 65203.957], 2689.295	[11.546; 28711.778], 1083.015

Выводы

Применение описанных эвристик позволило более чем в два раза сократить время работы алгоритма на сетях размерности не менее 35, что подтверждает их эффективность. Таким образом, использование эвристики нахождения субоптимального множества решений

генетическим алгоритмом и применение его в качестве начального множества рекордов возможно и при решении бикритериальных задач.

Библиографический список

1. **Алексеев, О.Г.** Комплексное применение методов дискретной оптимизации / О.Г. Алексеев. – М.: Наука. Гл. ред. физ-мат. лит., 1987. – 248 с.
2. Алгоритмы: построение и анализ / Т. Кормен [и др.]. – 2-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 1296 с.
3. **Лазарев, Е.А.** Бикритериальная модель сети передачи данных / Е.А. Лазарев, Д.Е. Шапошников, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии. 2011. №3.2(45).– С. 255–258.
4. **Лазарев, Е.А.** Генетические алгоритмы оптимизации сети передачи данных / Е.А. Лазарев, Д.Е. Шапошников, П.В. Мисевич // Системы управления и информационные технологии. 2011. №4(46). С. 59–63.
5. **Сигал, И.Х.** Введение в прикладное дискретное программирование. Модели и вычислительные алгоритмы / И.Х. Сигал, А.П. Иванова. – М.: Физматлит, 2007. – 304 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

E.A. Lazarev

ON THE APPLICATION OF HEURISTICS FOR BRANCH AND BOUND METHOD SOLVING DATA TRANSMISSION NETWORK OPTIMIZATION PROBLEM

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

Purpose: Modernization of existing data transmissions networks is very important and actual problem, because Internet service providers must satisfy continuously growing end-users demands. In order to solve this problem it is necessary to use mathematical models of data transmission networks and effective optimization algorithms. The article presents heuristics to decrease calculation time of branch and bound method finding of pareto-optimal solutions set of the bi-criteria network optimization problem.

Design/methodology/approach: A heuristic of searching suboptimal solution used in single-criteria optimization problem is considered. Also, a set of heuristics specific for considered bi-criteria problem are proposed. Calculation experiments are done in order to check effectiveness of heuristics.

Research results and area of application: Application of heuristic of searching suboptimal solution is effective not only for single-criteria problems but for bi-criteria problems finding pareto-optimal solutions set also, which is proven by computational experiments.

Findings: Proposed heuristic decrease the execution time of branch and bound algorithm in more than two times.

Key words: branch and bound method, bi-criteria optimization, network design.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.9.01

И.А. Савин

ФОРМИРОВАНИЕ БАЗЫ ДАННЫХ ВАРИАНТОВ МАТЕРИАЛА РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ИНСТРУМЕНТА И МЕТОДА ЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО УПРОЧНЕНИЯ

Казанский национальный исследовательский технический университет
им. А.Н. Туполева-КАИ (НЧФ КНИТУ-КАИ)
г. Набережные Челны

Современное механообрабатывающее поточное производство характеризуется значительными объемами выпуска деталей. Эффективная эксплуатация специального дорогостоящего оборудования приводит к интенсификации процессов резания. Этими процессами можно эффективно управлять за счет выбора оптимального сочетания свойств инструментальных материалов и методов их поверхностного упрочнения и комбинаций параметров режима резания. Окончательный выбор наиболее экономичного варианта обработки производится не для отдельного процесса резания, а для всей системы связей в операции.

Ключевые слова: инструментальный материал, поверхностное упрочнение, процесс резания.

В настоящее время в процессе проектирования технологии обработки резанием зачастую весь расчет сводится только лишь к назначению параметров режима резания. Но данные параметры обуславливают только одну сторону условий протекания процесса резания. Резание как физический процесс определяется взаимодействием поверхностных слоев конкретного обрабатываемого материала с конкретным материалом поверхностного слоя режущей части инструмента в заданных параметрах режима резания. Таким образом, необходимо проанализировать, какие возможные варианты инструментального материала, а, в общем случае, и варианты свойств поверхностного слоя режущей части, получаемых тем или иным способом поверхностного упрочнения, могут быть использованы при известном режиме резания. При уже полностью спроектированном на верхних структурных уровнях содержании технологии этот ее элемент остается единственным, за счет которого можно достаточно гибко управлять ее эффективностью.

В большинстве существующих методик технологического проектирования выбор марки инструментального материала сведен к отдельной единичной процедуре его назначения перед началом расчета количественных параметров в соответствии с технологическими рекомендациями. В этом случае практически не используется возможность альтернативного выбора, т.е. назначения хотя бы двух марок с последующим сравнением их эффективности по количественным показателям. Наиболее наглядно это проявляется при назначении только одного варианта поверхностного упрочнения, хотя совершенно очевидно, что при наличии на заводе участка покрытий является необходимым оперативное сравнение по эффективности хотя бы нескольких конструкций поверхностных слоев. Это вполне возможно выполнить даже без использования ЭВМ, так как не требуется чрезмерных затрат времени на относительно небольшой объем вычислений по

каждому варианту. К сожалению, до сих пор нет нормативных материалов, содержащих достаточно четкие обоснования по выбору метода поверхностного упрочнения, состава и конструкции покрытия для конкретных условий обработки в конкретных операциях и переходах. Вся информация сосредоточена в статьях и немногих монографиях, причем представляет собой лишь только достаточно общие рекомендации, не систематизированные настолько, чтобы их можно было использовать для решения практических задач.

В соответствии с общей логикой проектирования и последовательностью расчетов параметров режима резания методика отбора вариантов материала режущей части должна представлять собой строго упорядоченную процедуру отбора. Практически это значит, что необходима соответствующим образом организованная база данных марок инструментальных материалов, методов их поверхностного упрочнения, состава и свойств упрочненных слоев. Структура ее должна определиться строением принятой модели технологии.

Сформировать такую базу можно на основе существующих в настоящее время баз. Во многих справочниках общая совокупность марок инструментального материала уже сгруппирована по очевидным признакам - способу получения, химическому составу, строению, диапазону значений основных свойств. Примерная рекомендуемая область применения каждой марки обусловлена ее комплексом свойств. Однако глубина рекомендаций на применение того или иного инструментального материала, как правило, ограничивается достаточно общими признаками (зависит от этапа обработки, типа инструмента). Существует множество примеров базы марок инструментальных материалов. Развитие же современных методов повышения износостойкости режущих инструментов требует четкой систематизации материалов режущей части инструмента, имеющих поверхностные слои с измененными свойствами.

В результате анализа особенностей промышленной эксплуатации режущего инструмента с покрытием можно отметить следующее:

- инструмент с покрытием заметно дороже инструмента без покрытия, что требует более высокой культуры производства, использования неизношенного станочного оборудования, тщательного экономического анализа целесообразности использования инструмента с покрытием;
- наиболее целесообразно эксплуатировать инструмент с покрытием на скоростях, превышающих скорость резания обычного инструмента на 30–60%. Такие скорости соответствуют оптимальной экономической скорости резания, минимизирующей интенсивность изнашивания и затраты на обработку резанием;
- в настоящее время промышленность использует разнообразный режущий инструмент с покрытием, получаемый различными технологическими методами, что требует от заводских технологов знаний областей наиболее рационального использования такого инструмента. Эффективность инструмента с покрытием при различных условиях обработки сильно зависит от метода получения покрытия даже одного химического состава.

В целом совокупность имеющихся справочников, по сути, представляет собой достаточно подготовленную общую базу данных для выбора инструментальных материалов на верхних структурных уровнях технологии. Но для более конкретной проработки задачи повышения эффективности обработки резанием за счет рационального применения инструментальных материалов требуется однозначно рекомендовать или не рекомендовать данную марку к применению в конкретных условиях рабочего хода, определяемых на всех иерархических уровнях структуры технологии. Это значит, что необходима дополнительная дифференциация справочных рекомендаций. Кроме того, систематизация марок инструментальных материалов должна быть также дополнена систематизацией характеристик поверхностных слоев с измененными свойствами (СИС), иначе нельзя

объективно определить возможность применения и технологий упрочнения в целом, и множества вариантов состава и конструкций упрочненных слоев для конкретных условий обработки. В общем виде предложенная систематизация представлена на рис. 1.



Рис. 1. Систематизация вариантов материала режущей части инструментов, имеющих слой с измененными свойствами (СИС) для их альтернативного выбора при проектировании процессов резания

Применяемые способы сгруппированы в ней не просто по их физическим особенностям, но и по конечному результату - диапазону характеристик и вариантам конструкции получаемых слоев, которые и необходимо знать для принятия решения об их применении. Всего предусмотрено четыре признака, ранжированных в строго определенном порядке.

Исходя из того, что области применения традиционных марок материалов определены достаточно четко, **первым признаком** становится наличие на материале режущей части инструмента какого-либо варианта упрочненного слоя. Это условие разграничивает диапазоны свойств этих слоев, т.е. по сути, вводятся новые классы материалов, обладающие качественно различными служебными характеристиками. Очевидно, что упрочнение основы,

т.е. изменение свойств уже имеющегося материал, не позволит намного увеличить их твердость и износостойкость, в отличие от нанесения покрытий, свойства которых практически не зависят от свойств основы.

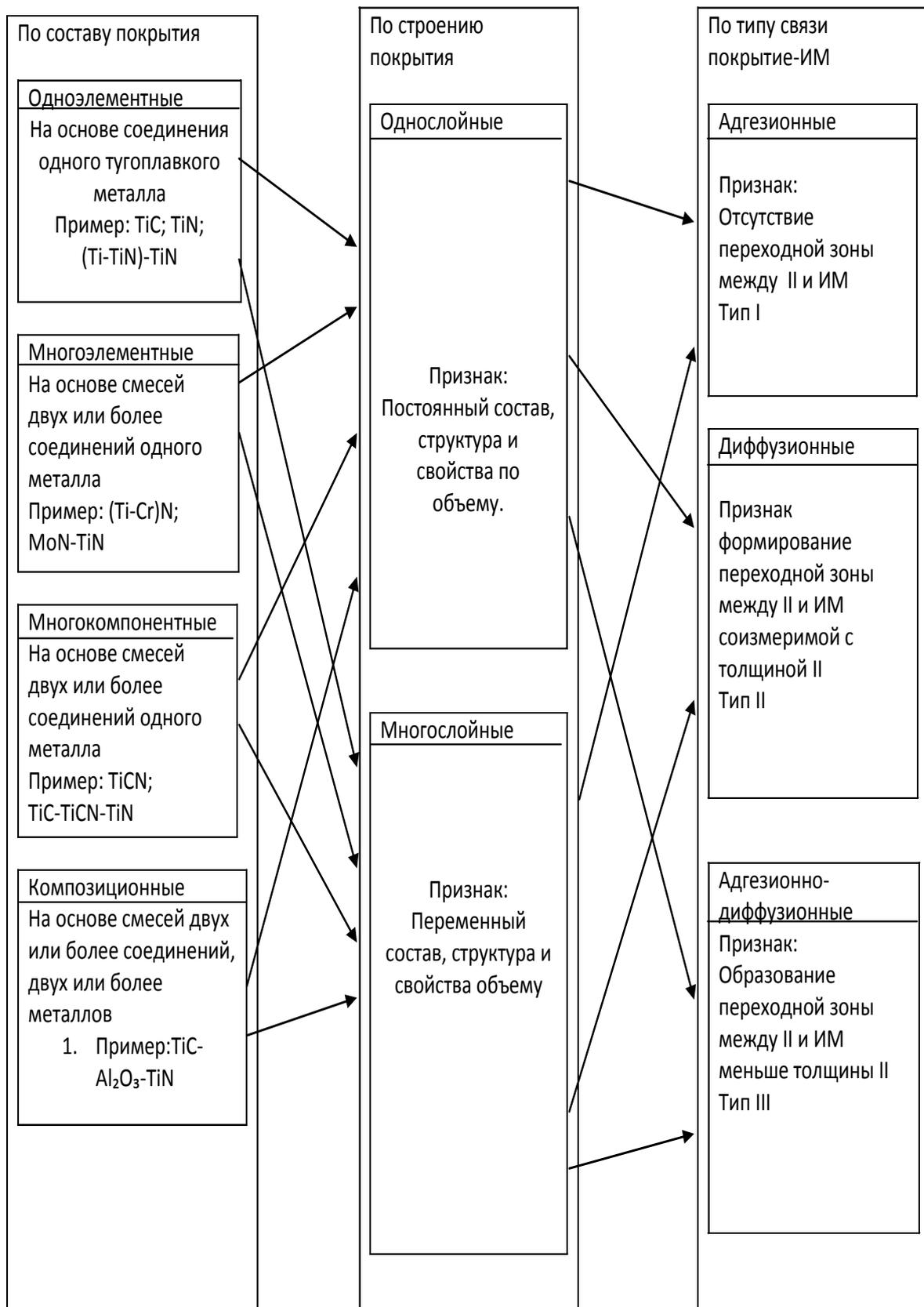


Рис. 2. Классификация износостойких покрытий для режущего инструмента [1]

Вторым признаком систематизации является возможная технология получения того или иного варианта упрочненного слоя режущей части инструмента. Он определяет возможности использования упрочненного слоя в производстве. Наиболее распространенной технологией поверхностного упрочнения является нанесение износостойких покрытий на режущие инструменты. Существующие и широко применяемые в промышленности методы нанесения покрытий укрупнено разбиты на три группы (рис. 2) [1].

Однако, помимо нанесения износостойких покрытий на поверхности инструментов, существуют еще четыре группы технологий поверхностного упрочнения режущих инструментов[1]:

1. Методы механического упрочнения: вибрационный, дробеструйный, взрывом и т.д. Наиболее часто используют для упрочнения инструментов из быстрорежущей стали и твердых сплавов. Поверхностное пластическое деформирование (ППД) – наклеп поверхностного слоя на глубину 0,2-0,8 мм с целью создания в нем остаточного напряжения сжатия. При наклепе поверхностный слой расплющивается. Удлинению поверхностного слоя препятствует сила сцепления с нижележащими слоями металла. Вследствие этого в наклепанном слое возникают двухосные напряжения сжатия, а в толще основного металла незначительные реактивные напряжения растяжения. Складываясь с рабочими напряжениями растяжения, остаточные напряжения сжатия уменьшают, а при достаточно больших значениях компенсируют первые. Возникающие при наклепе множественные искажения структуры (деформация зерна, местные пластические сдвиги) эффективно тормозят развитие усталостных повреждений и расширяют область существования нераспространяющихся трещин, увеличение которых обуславливает существование разрушающих напряжений.

Эффективен наклеп в напряженном состоянии, представляющий собой сочетание упрочнения перегрузкой с наклепом. При этом способе деталь нагружают нагрузкой того же напряжения, что и рабочая, вызывая в материале упругие или упругопластические деформации. После снятия нагрузки, в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия. Наклепанный слой чувствителен к нагреву. При температурах 400-500 °С действие наклепа полностью исчезает из-за наступающего при этих температурах процесса рекристаллизации, устраняющего кристалло-структурные изменения, внесенные наклепом. Основные разновидности упрочнения поверхности пластической деформацией: дробеструйная обработка, обкатывание, чеканка, алмазное выглаживание.

Дробеструйная обработка заключается в наклепе поверхностного слоя потоком закаленных шариков (диаметр 0,5-1,5 мм), создаваемым центробежными дробеметками. Качество поверхности при данном процессе немного снижается. Плоские поверхности упрочняют обкатыванием шариками, установленными во вращающемся патроне. Заготовке придают движение продольной и поперечной подачи, при правильно выбранном режиме обкатывания остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое составляют 600-1000 МПа. Глубина уплотнения слоя 0,2-0,5 мм. Данный процесс улучшает качество поверхности детали. Поверхность вращения упрочняют обкатыванием стальными закаленными роликами. Силу прижатия ролика выбирают с таким расчетом, чтобы создать в поверхностном слое напряжения, превышающие предел текучести материала в условиях всестороннего сжатия (для стали 5000-6000 МПа). Чеканку производят бойками со сферической рабочей поверхностью, приводимыми в колебания пневматическими устройствами. Частота колебаний и скорость вращения заготовки должны быть согласованы таким образом, чтобы наклепанные участки перекрывали друг друга. Алмазное выглаживание заключается в обработке предварительно шлифованной и полированной поверхности закругленными алмазными резцами (радиус 2-3 мм). Поверхностный слой уплотняется до глубины 0,3-0,5 мм.

2. Методы химико-термической обработки (ХТО) инструментальных сталей: азотирование, цементация, карбонитрация, оксидирование, борирование в газовых и жидких средах,

тлеющем газовом электрическом разряде (ионное азотирование). Высокую поверхностную прочность обеспечивает изотермическая закалка, а также термомеханическая обработка поверхности детали. При поверхностной закалке (газопламенная закалка) и химико-термической обработке (цементование) упрочнение обусловлено главным образом возникновением в поверхностном слое остаточных сжимающих напряжений вследствие образования структур большего удельного объема (нитриды и карбонитриды при нитроцементации и азотировании), чем структуры основного металла. Расширение поверхностного слоя тормозит сердцевина, сохраняющая исходную перлитную структуру, вследствие чего в поверхностном слое возникают двухслойные напряжения сжатия. В нижних слоях развиваются реактивные растягивающие напряжения, имеющие малое значение из-за незначительности сечения термически обработанного слоя сравнительно с сечением сердцевины. Создание предварительных напряжений сжатия снижает среднее напряжение в области сжатия, тем самым повышается предел выносливости. Газовая закалка повышает предел выносливости по сравнению с исходной конструкцией из необработанной стали в 1,85 раза. Наиболее эффективным способом обработки является азотирование, которое практически полностью устраняет внешних концентраторов напряжений. Азотирование не вызывает изменения формы и размеров детали. Азотированный слой обладает повышенной коррозионно- и термостойкостью. Твердость и упрочняющий эффект сохраняются вплоть до температур 500-600 °С. Оптимальные толщины слоя уплотнения при цементации 0,4-0,8 мм, цементовании и азотировании 0,3-0,5 мм, закалке с нагревом и газовой закалке 2-4 мм. Качество поверхности значительно улучшается.

3. Электроискровое, магнитное, ультразвуковое упрочнение. Данные метода редко применяются для обработки режущих инструментов.

4. Физическое упрочнение: лазерная обработка, ионная имплантация. Технология ионной имплантации является на сегодня одной из наиболее перспективных с точки зрения создания композиционных материалов с оптимальным набором поверхностных и объемных свойств.

Ионная имплантация – это процесс, в котором практически любой элемент может быть внедрен в приповерхностную область любого твердого тела – мишени (подложки), помещенной в вакуумную камеру, посредством типа высокоскоростных ионов, имеющих энергию в несколько мегаэлектронвольт. Ионы внедряются в материал мишени (подложки) на глубину от 0,01 мкм до 1 мкм, теряя энергию в процессе столкновений с атомами основы. Профиль (распределение) концентрации примеси по глубине для большинства комбинаций внедряемый атом – мишень (подложка) может быть вычислен. Для малой дозы ионов (малого числа ионов на единицу площади) профиль распределения концентрации примеси по глубине обычно хорошо описывается гауссовым распределением с центром в середине области распространения. В результате ионной имплантации образуется поверхностный слой сплава с изменяющимся составом, который не обладает выраженной поверхностью раздела, характерной для осажденного покрытия.

Преимуществом ионной имплантации, как метода модифицирования поверхности по сравнению с другими методами упрочнения поверхности, являются:

- увеличение растворимости в твердом состоянии;
- независимость образования сплавов от констант диффузии;
- возможность быстрого изменения состава сплава;
- независимость от процессов, протекаемых в объеме материала;
- возможность процесса при низких температурах;
- весьма незначительное изменение размеров обрабатываемой детали;
- отсутствие проблемы аугезии, так как не существует ярко выраженной поверхности раздела;

- контролируемая глубина распределения концентрации;
- вакуумная чистота;
- высокая контролируемость и воспроизводимость.

Основным недостатком ионной имплантации является обработка только той части поверхности инструмента, которая находится непосредственно в области действия пучка ионов.

Технологии нанесения покрытий на инструменты обладают высокой производительностью, универсальностью, экономичностью. Кроме того, появляется возможность управления условиями формирования и свойствами покрытий, а также свойствами композиции покрытие – инструментальный материал. Инструментальный материал с износостойким покрытием является новым материалом композиционного типа, в котором оптимально сочетаются свойства поверхностного слоя (высокие значения твердости, теплостойкости, пассивности по отношению к обрабатываемому материалу и т. д.) и свойства, проявляющиеся в объеме тела инструмента (прочность, ударная вязкость, трещиностойкость и т. д.).

Третьим признаком является общая, интегральная характеристика упрочненного слоя - его суммарная толщина, Влияние толщины износостойкого покрытия на работоспособность инструмента достаточно подробно рассмотрено в [1, 2].

Толщина слоя с измененными свойствами является важнейшей его характеристикой. Во-первых, разные технологии упрочнения могут обеспечить строго определенные диапазоны толщин, во-вторых, каждый вариант слоя имеет свой оптимум. Так, А.С.Верещака и С.В.Касьянов сделали вывод, что "эффективность более толстых покрытий при точении проявляется по мере роста скорости резания. Однако, даже при удовлетворительной жесткости СПИД при скоростях резания 80-120 м/мин, рост толщины покрытия более 7 мкм не приводит к повышению стойкости инструмента вследствие плохой сопротивляемости более толстых покрытий разрушению в условиях выраженных адгезионно-усталостных процессов, свойственных рассматриваемому диапазону скоростей резания. При росте скорости резания более 160 м/мин возникают высокие температуры, резко инициируются коррозионно-окислительные и диффузионные процессы и в большей степени сказывается роль покрытия как барьера диффузионным процессам. Поэтому здесь более эффективны толстые (до 14 мкм) покрытия". В настоящее время достаточно четко установлено, что, например, на инструментах из быстрорежущей стали толщины покрытий не должны превышать 4-5 мкм при непрерывном резании и 2-3 мкм при прерывистом. Для быстрорежущих сталей повышенной теплостойкости рекомендуют повышать толщину покрытия на 2-3 мкм. Рекомендации по назначению толщины слоя для инструмента из твердых сплавов приведены в различных справочниках.

Четвертым признаком группирования является дифференцированная характеристика упрочненного слоя - конкретное сочетание толщин, химического состава и структуры составляющих его слоев. Широко известно, например, что даже незначительное изменение только одного элемента (толщины или химического состава одного из составляющих слоев) позволяет существенно повысить потенциал работоспособности инструментов [1]. Для упрочненных слоев основы важным является оптимальность градиента свойств от сердцевины к поверхности. Технологические особенности получения слоев с измененными свойствами не являются самостоятельными признаками группирования, они лишь обеспечивают служебные характеристики конструкции слоя.

В результате проведенных исследований предложена и реализована на практике методика формирования текущей базы данных вариантов материала режущей части инструмента и метода его поверхностного упрочнения.

Собственно процесс отбора представляет собой последовательность процедур ввода ограничений на применение вариантов, включенных в базу данных, построенную на основе

систематизации, предложенной выше. В каждом структурном элементе принимается решение об исключении тех или иных вариантов. Практически методика реализуется путем последовательной работы с комплектом таблиц, раскрывающих содержание ограничений либо с несложной компьютерной программой, встраиваемой как в САПР РИ, так и в САПР ТП.

Конкретному варианту материала режущей части инструмента присваивается свой код. Используя его, легко обеспечить автоматизированный выбор вариантов из созданной базы данных. При этом процедура отбора в каждом структурном элементе выполняется по единой схеме:

- выбор характеристик факторов, влияющих на выбор;
- принятие решения по возможным альтернативным вариантам содержания структурного элемента;
- окончательный результат отбора.

Например, применение предложенного процесса выбора материала режущей части на примере наиболее развитой, универсальной операции обработки заготовки на станке токарной группы показывает, что только за счет этих процедур возможно повышение эффективности обработки до 10%, так как в токарной операции возможна обработка практически всех групп обрабатываемых материалов в широком диапазоне значений твердости, они могут содержать различные сочетания переходов (точение проходными, фасочными, расточными, отрезными, прорезными, отрезными, фасонными, фасонными тангенциальными резцами, сверление, зенкерование, развертывание отверстий, нарезание наружных и внутренних резьб, накатывание рифлений). Во многих переходах могут быть использованы разнообразные конструкции режущих инструментов как цельных, так и сборных. Режущая часть инструментов, кроме того, может быть изготовлена из инструментальных материалов различных групп, в том числе имеющих поверхностные слои с различными свойствами. Процессы резания могут выполняться в широком диапазоне параметров режима резания. Поэтому именно для токарной операции может быть предложено наибольшее количество возможных вариантов материала режущей части инструмента.

Поэтапное упорядоченное выполнение всех расчетов при проектировании технологии при условии группирования расчетных параметров позволяет учесть все возможные варианты реализации процессов резания (комбинацию параметров режима резания и материала режущей части инструмента) при известных ограничениях по условиям производства и требованиям технологии, а значит, оперативно оценить целесообразность применения отдельных вариантов для дальнейших расчетов на любом этапе проектирования. Структура базы исходных данных для расчетов формируется в соответствии с последовательностью выполнения расчетов и группированием расчетных характеристик.

Выбор альтернативных вариантов материала режущей части инструмента, в отличие от существующих методик, представляет собой не разовую, отдельную процедуру, а упорядоченный процесс ввода ограничений на использование всех возможных марок сердцевины режущей части, а также комбинаций "основа-покрытие" из числа применяемых в условиях данного производства в рамках каждого структурного элемента технологии. Именно такой подход позволил заметно повысить эффективность технологических процессов обработки резанием в массовом и крупносерийном производстве при минимуме понесенных затрат.

Библиографический список

1. **Верещака, А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями / А.С. Верещака. – М.: Машиностроение, 1993. – 336 с.

-
2. Резание материалов. Режущий инструмент / Н.А. Чемборисов [и др.]: учеб. для вузов в 3 т. – Наб. Челны.: ИНЭКА, 2006. – 270 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

I.A. Savin

**FORMATION OF THE DATABASE OPTIONS FOR THE MATERIAL
OF THE CUTTING TOOL AND ITS METHOD OF SURFACE HARDENING**

Kazan national research technical university n.a. Tupolev (Naberezhnochelninsky branch)

Modern mass production machining is characterized by significant volumes of production parts. Efficient operation of a special expensive equipment leads to an intensification of the cutting processes. These processes can be effectively controlled by choosing the optimum combination of properties of tool materials and methods of surface hardening treatment parameters and combinations of cutting. The final selection of the most cost-effective treatment option for an individual is not the cutting process, and for the entire system of relations in the operation.

Key words: tool material, surface hardening, the process of cutting.

УДК 621.912

В.И. Котельников¹, А.О. Краснов², В.П. Кожемякин², А.А. Миронов³

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕТОДА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРОГАЛЬНОМ СТАНКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский военный институт инженерных войск РФ²,
ЦНИИ «Буревестник»³

Цель: Определение изменений поверхностного слоя детали после холодного строгания и термодинамической обработки.

Методика: Обработка плоской поверхности образца из стали 45 была проведена холодным резанием, резанием с нагревом и накатыванием нагретой поверхности обработанной детали роликом при различном давлении. Эксперименты проведены при различных режимах резания ($t = 0,5; 1,0$ и $1,25$ мм $S=200,0; 300,0$ и $500,0$ мм/мин). Режим нагрева поверхности при термодинамической обработке изменялся от 450 до 600°C .

Результаты: В результате было получено доказательство более высокого качества поверхностного слоя детали после резания с нагревом и термодинамической обработки без микро надрывов и трещин.

Ключевые слова: теория резания, холодная обработка металла, резание с нагревом, термодинамическая обработка металла.

Холодная обработка металла резанием характеризуется образованием на поверхности обработанной детали большого количества микротрещин различной величины. Причиной образования микронадрывов в поверхностном слое является пластическая деформация металла в корне стружки при резании. В классической теории резания характер стружкообразования и пластический сдвиг металла трактуется следующим образом.

Как правило, с целью упрощения деформации в срезаемом слое при резании металла рассматриваются в одной плоскости. Кристаллические объединения, назовем их частицами срезаемого слоя, находящиеся на удалении от линии пластического течения CB металла в корне стружки, свободны от напряжений и двигаются по направлению к инструменту с определенной скоростью. По мере приближения к режущему инструменту напряжения в рассматриваемой частице будут возрастать.

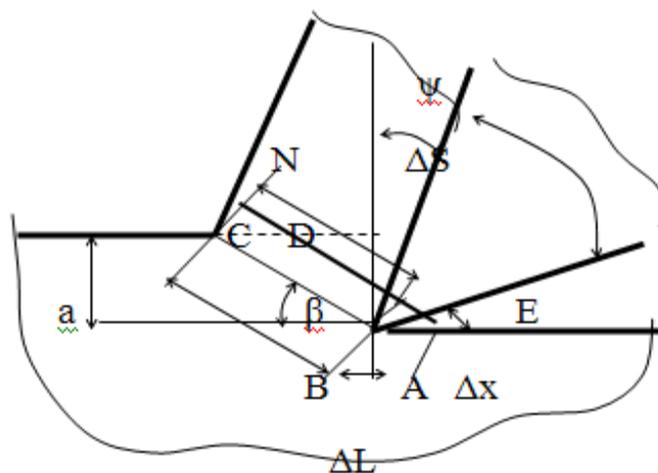


Рис. 1. Схема воздействия режущего клина на металл при резании

В момент, когда напряжения достигнут величины предела упругости, частица начнет

пластически деформироваться. Она получает от действия режущего клина пластическое смещение и меняет направление своего движения. При этом смещении происходит деформация металла (объём $ABCD$ деформируется в объём $EBCN$) (рис. 1).

В результате такой деформации произойдет отделение части металла от детали. Толщина набегающего металла на режущий клин «а» в отделяемой стружке, благодаря пластическому сдвигу, изменится на ΔS . Угол, образованный линией пластического течения частиц металла и направлением набегающего металла на режущий инструмент, получил название угла сдвига и обозначен на рис. 1 буквой β .

Если представить переходную зону пластической деформации в виде параллелограмма $ABCD$ (рис. 1), а линии скольжения в ней принять за прямые, то сдвиг этой зоны произойдет на величину Δx .

Значение ΔS соответствует расстоянию, на которое сдвинулась верхняя сторона квадрата относительно нижней, и называется абсолютным сдвигом. В теории пластических деформаций для характеристики интенсивности сдвига пользуются величиной ε , относительным сдвигом. Он равен отношению абсолютного сдвига ΔS к толщине слоя ΔL , претерпевшего этот сдвиг, т.е. $\varepsilon = \Delta S / \Delta L$. Геометрически ε равен тангенсу угла ψ наклона стороны квадрата к оси z , т.е. $\varepsilon = \operatorname{tg} \psi$.

Элемент срезаемого слоя $ABCD$ под действием режущего клина инструмента деформируется и принимает форму параллелограмма $EBCN$.

В треугольнике CDN - $DN = \Delta x$; $\angle CND = 90^\circ$; $\angle CDN = \psi = \gamma$; $\angle NCD = \beta$;

$$NE = \Delta S; \varepsilon = \Delta S / \Delta x = NE / EA = \operatorname{ctg} \beta + \operatorname{tg} (\beta - \gamma). \quad (1)$$

Анализ формул (1) показывает, что для определения относительного сдвига при определенном угле γ необходимо знать этот угол. Его можно определить по длине стружки. При перемещении инструмента на Δl длина стружки будет Δlc . Из $\triangle ABE$ (рис. 1)

$$\Delta lc / \sin \beta = \Delta l / \sin \delta = \Delta l / \cos (\beta - \gamma) \text{ и } \Delta l / \Delta lc = \cos (\beta - \gamma) / \sin \beta.$$

Отношение $\Delta l / \Delta lc = Kl$ получило название коэффициента усадки стружки:

$$Kl = \cos (\beta - \gamma) / \sin \beta. \quad (2)$$

Данную формулу называют формулой И.А. Тиме. С её помощью можно выразить угол сдвига через коэффициент усадки Kl :

$$Kl = (\cos \beta \cos \gamma + \sin \beta \sin \gamma) / \sin \beta = \operatorname{ctg} \beta \cos \gamma + \sin \gamma,$$

откуда
$$\operatorname{tg} \beta = \cos \gamma / (Kl - \sin \gamma). \quad (3)$$

Несмотря на принятые допущения о замене зоны первичной деформации единственной плоскостью сдвига и идеализации процесса превращения срезаемого слоя в стружку формула Тиме И.А. показывает связь между коэффициентом усадки стружки и углом сдвига β , поскольку отражает условие сплошности материала стружки.

Таким образом, относительный сдвиг при резании зависит от угла сдвига β и переднего угла γ . Угол β можно определить, зная γ . Практически $\varepsilon = 2-5$. Определим, при каком β относительный сдвиг будет минимальным. Для этого возьмем первую производную уравнения (3), приравняем ее к нулю и решим уравнение относительно β :

$$d\varepsilon / d\beta = -\operatorname{cosec}^2 \beta + \sec^2 (\beta - \gamma) = 0. \quad (4)$$

Это условие справедливо при $\beta = 90^\circ - (\beta - \gamma)$. Тогда $[\beta]_{\varepsilon \rightarrow \min} = 45^\circ + \gamma / 2$. Зная относительный сдвиг, можно определить скорость деформации (c^{-1}), которая представляет собой отношение максимальной главной деформации ε_{\max} к её продолжительности $\tau_{\text{деф}}$ в единицу времени, т.е. $V_{\text{деф}} = \varepsilon_{\max} / \tau_{\text{деф}}$.

В случае неравномерной деформации сдвига её скорость или скорость относительного сдвига определяется как относительный сдвиг в единицу времени $V_{\text{деф}} = d\varepsilon / dt$.

От скорости деформации зависит температура, возникшая в результате совершения режущим инструментом работы по сдвигу металла в корне стружки. Наиболее интенсивно

пластическая деформация протекает в узкой зоне, ширина которой принимается за Δx . Время деформации определится из формулы $\tau_{\text{деф}} = \Delta x / \Delta V_c = (\Delta x \cdot K_l) / V$, т.е.

$$V_{\text{деф}} = \varepsilon V / \Delta x K_l. \quad (5)$$

Скорость деформации при резании очень высока. По данным [1], при обработке конструкционных сталей обычного качества $\Delta x = 0,02 - 0,005 \text{ мм}$; $\varepsilon = 2 - 5$; $K_l = 2,0 - 4,0$. При скорости резания $60 \text{ м/мин} = 100 \text{ см/с}$ скорость деформации будет равна $V_{\text{деф}} = 4000 \text{ с}^{-1}$.

Высокие скорости деформации не позволяют установить четкую границу между хрупкими и пластичными материалами, так как один и тот же материал в зависимости от характера напряженного состояния при резании и скорости деформации может вести себя различно. Поскольку полное описание механизма образования стружки сложно, для анализа напряжений и деформаций при резании реальный процесс образования стружки заменяют упрощенной моделью. При этом не принимают во внимание искажение формы полученного сечения реальной стружки и увеличение её ширины, а её поперечное сечение представляют в виде прямоугольника с высотой, равной средней толщине стружки, и шириной, равной первоначальной ширине резания.

При резании металла с нагревом в обрабатываемый металл вводится дополнительное тепло, которое совместно с теплом, образованным за счет совершаемой работы резания, разогревает как деталь, так и сходящую с резца стружку. Именно поэтому экспериментальные замеры температуры нагрева сходящей стружки выше теоретической средней температуры в срезаемом слое металла. Например, средняя температура стружки, получающейся в результате среза слоя толщиной в 4 мм будет:

$$T = (1000 + 800 + 600 + 450) / 4 + \Delta T = 712,5^\circ \text{ С.} + \Delta T,$$

где ΔT – приращение температуры в зоне резания за счет совершенной работы резания. Численное значение приращения температуры можно определить теоретически, прибегая к зависимостям теплопроводности, либо в результате эксперимента замером температуры сходящей с резца стружки.

С учетом приведенных данных пластические свойства стружки в корне стружки при стружкообразовании будут выше, чем у срезаемого слоя перед корнем стружки. Другими словами, процесс пластического деформирования кристаллов на линии скалывания (рис. 1) будет идти в режиме пластического течения не отдельных слоев деформированного металла толщиной Δx , а тончайшим слоем, с размерами сопоставимыми с размерами, отдельных кристаллов.

Скорость V набегающего на резец слоя толщиной «а» срезаемого металла определится как первая производная расстояния Δl по времени Δt . Величина этой скорости численно равна величине скорости деформации или скорости смещения кристаллов в корне стружки вдоль плоскости сдвига V_t и скорости движения стружки V_c толщиной ac , вдоль передней поверхности резца. Движение металла при таком стружкообразовании можно сравнить с потоком жидкости, проходящей последовательно через несколько различных сечений. В соответствии с законом сохранения количества движения секундный расход будет определяться произведением скорости на поперечное сечение потока. В силу того, что стружка при своем движении будет тормозиться силой трения о переднюю поверхность резца, скорость V_c будет отличаться от скорости пластического течения V_t . В то же время пластическое течение вдоль линии сдвига кристаллов идет с очень большими скоростями. Для сохранения равенства потоков скорость течения стружки V_c должна снизиться, а величина толщины стружки – возрасти при неизменной ширине среза «а», равном глубине резания. Данное утолщение стружки на коротком участке, до момента отрыва стружки от передней поверхности резца, наглядно видно при рассмотрении внутренней волнистой поверхности стружки металла, обработанного с нагревом.

При резании с нагревом образуется стружка, имеющая серый металлический цвет с абсолютно гладкой внутренней по отношению к резцу поверхностью.

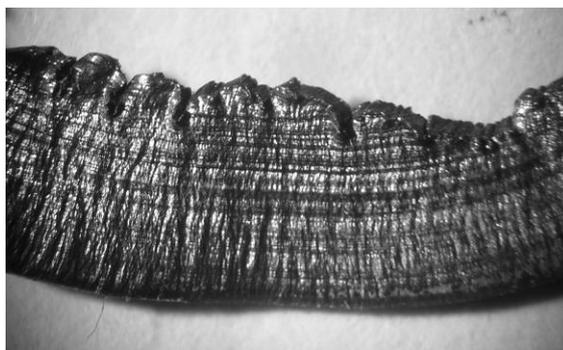


Рис. 2. Фотография стружки, полученной в результате резания ст. 45 с нагревом при $V=47$ м/мин

В результате резания с нагревом происходит срезание слоев металла без образования микро надрывов поверхностного слоя обрабатываемой детали. Проверим это экспериментально.



Рис. 3. Внешний вид строгания нагретой поверхности детали на строгальном станке



Рис. 4. Внешний вид накатывания нагретой поверхности детали роликовым накатником на строгальном станке

Обработка плоской поверхности образца из ст. 45 была проведена холодным резанием, резанием с нагревом и накатыванием нагретой поверхности обработанной детали роликом при различном давлении. Эксперименты проведены на строгальном станке при различных режимах резания ($t = 0,5; 1,0$ и $1,25$ мм $S=200,0; 300,0$ и $500,0$ мм/мин). Режим нагрева поверхности при термодинамической обработке от 450 до 600°C . Режимы накатывания роликом нагретой поверхности те же, что и при холодном строгании. Процесс термодинамиче-

ской обработки был зафиксирован на видео, а образцы сфотографированы. Фотография процесса строгания нагретой поверхности детали на столе строгального станка показана на рис. 3, а фотография процесса накатывания роликом – на рис.4.

Для проведения эксперимента станок был дооборудован деревянным лотком с водой (отчетливо видимым на рис. 3 и 4) для охлаждения резца и ролика в конце рабочего хода инструмента. Экспериментальная проверка проводилась с повторением каждого прохода резца и ролика. Замер температуры нагрева поверхности определялся термопарой касания, тарированной в градусах Цельсия.

После обработки поверхности плоской детали холодным строганием и термодинамической обработкой проводился замер шероховатости поверхности под бинокулярным микроскопом (табл. 1).

Таблица 1

Результаты замеров шероховатости поверхности

Вид обработки	Режимы обработки металла				Параметры шероховатости Ra, мкм
	Температура нагрева поверхности, T °C	Величина подачи инструмента, S, мм/мин	Глубина резания, t мм	Усилие накатывания, кН	
Холодное строгание	-	500	0,5	-	12,5
	-	500	1,0	-	12,5
	-	500	1,5	-	25,0
Строгание нагретой поверхности	450	500	1,5	-	6,3
	500	500	2,5	-	6,3
	550	500	4,0	-	3,2
	600	500	5,5	-	3,2
Поверхностное деформирование нагретой поверхности	450	500	-	1,156	1,25
	500	500	-	1,045	1,25
	550	500	-	0,870	0,8
	600	500	-	0,643	0,8
Поверхностное деформирование холодное	20	500	-	4,023	2,5
	20	500	-	4,560	2,5
	20	500	-	4,730	1,6
	20	500	-	5,380	1,6

В результате проведенного исследования были получены следующие результаты: шероховатость поверхности после холодной обработки строганием Ra = 12,5 – 25,0 мкм, шероховатость поверхности после термодинамической обработки Ra = 1,6 – 2,5 мкм.

Затем измеряли твердость поверхностного слоя на косом срезе. Результаты замеров сведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты замера микро твердости поверхностного слоя

Вид обработки	Замеры микротвердости на глубине среза, HV кг/мм ²				
	0мм	0,02мм	0,04мм	0,06мм	0,08мм
Поверхность обработана холодным строганием	250	230	210	180	140
Нагретая до 500°C поверхность обработана строганием	100	50	30	10	0
Поверхность, полученная деформированием с нагревом до 600°C	150	110	85	54	25
Поверхность, полученная холодным деформированием	300	270	240	200	140

Как правило, после холодной обработки строганием на поверхности образуется наклеп. После ТДО величина наклепа снижается в 1,5–2,0 раза. ППД по нагретой поверхности несколько повышает микротвердость.

Для исследования качества поверхностного слоя после каждого вида обработки образцы разрезались в поперечной плоскости на пластинки толщиной 10 мм. Нарезанные пластинки шлифовались и подвергались исследованию изменений структуры поверхностного слоя под инструментальным микроскопом при увеличении $\times 200$. Структура поверхностного слоя показана на фотоснимке (рис. 5).

Поверхностный слой образцов после строгания имеет характерные микронадрывы, образованные вследствие сдвиговой деформации металла в корне стружки. Поверхностный слой металла после резания с нагревом не содержит этих дефектов. Фотография структуры металла показана на рис. 6.

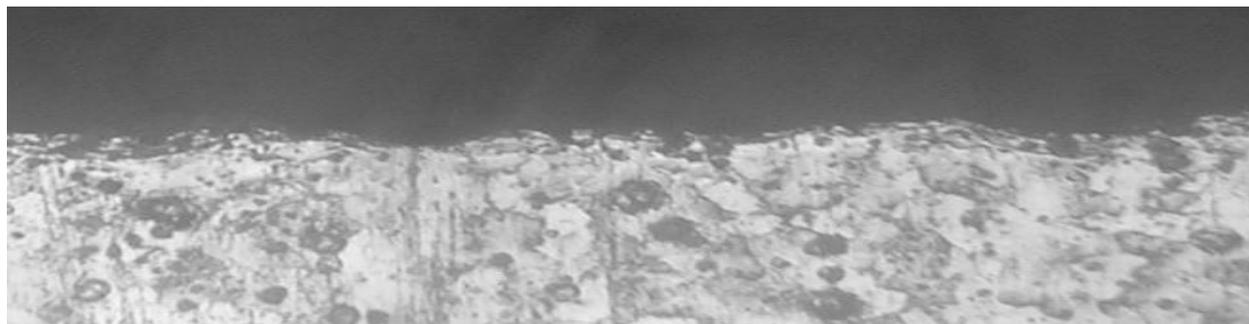


Рис. 5. Фотография поверхности среза детали после холодного строгания ($\times 100$)



Рис. 6. Фотография поверхности среза детали после строгания с нагревом ($\times 200$)

Выводы

1. Процесс строгания нагретого до температур разупрочнения металла характеризуется получением поверхностного слоя детали без микронадрывов с пониженной величиной наклепа.

2. Поверхность детали после ТДО обладает значительно меньшими параметрами шероховатости и не требует дополнительных отделочных операций (например, шлифования).

3. Процесс термодинамической обработки можно ускорить за счет увеличения подачи инструмента, а следовательно, значительно удешевить процесс изготовления деталей.

Библиографический список

1. **Бобров, В.Ф.** Основы теории резания металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. **Грановский, Г.И.** Резание металлов / Г.И. Грановский, В.Г. Грановский. – М.: Машиностроение, 1985. – 389 с.
3. **Талантов, Н.В.** Физические основы процесса резания, изнашивания и разрушения инструмента / Н.В. Талантов. – М.: Машиностроение, 1992. – 240 с.

4. **Старков, В.К.** Дислокационные представления о резании металлов / В.К. Старков. – М.: Машиностроение, 1979. – 160 с.
5. **Котельников, В.И.** Особенности резания металла с предварительным нагревом срезаемого слоя / В.И. Котельников, В.А. Зотова // Современные технологии в машиностроении: VI всероссийская научно-практическая конференция. – Пенза: ПГТУ, 2003. С. 335–339.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

V. I. Kotelnikov¹, S. A. Krasnov², V. P. Kozhemyakin², A.A. Mironov³

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFECTIVENESS OF THE METHOD OF THERMODYNAMIC TREATMENT IN THE PLANER

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y.Alexeev¹,
Nizhny Novgorod military institute corps of engineers RF²,
CRI "Petrel"³

Purpose: Determination of changes in the surface layer of the detail after cold planing and thermodynamical metalcutting.

Methodology: Processing of the flat surface of a sample of the steel 45 (CIS GOST) was carried out with cold cutting, cutting with heating and rolling the heated surface of the machined detail with roller at different pressures. Experiments were conducted at different cutting conditions ($t = 0,5; 1,0$ and $1,25$ mm $S = 200,0; 300,0$ and 500.0 mm / min). Mode of heating surface in the thermodynamic treatment varied from 450 to 600 ° C.

Value: As a result, evidence was obtained of a higher quality of the surface layer of parts after cutting the heating and thermodynamic process without micro-tears and cracks.

Key words: cutting theory, cold-working, cutting with heating, thermodynamical metalcutting.

УДК 621.9

В.В. Беспалов

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ПРОВЕРКИ ВЛИЯНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ, ИЗМЕНЯЮЩИХСЯ ПО СИНУСОИДАЛЬНОМУ ЗАКОНУ ПО УГЛУ Φ И 2Φ НА ПОГРЕШНОСТЬ ЗАЦЕПЛЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Метод однопрофильного контроля при осуществлении непрерывного обката с парным колесом использован в экспериментальной проверке влияния радиального биения и перекаса шевера на погрешность зацепления.

Ключевые слова: погрешность зацепления, циклическая погрешность зубцовой частоты, перекас, однопрофильный контроль, радиальное биение, дисковый шевер, цилиндрические зубчатые колеса

Для силовых быстроходных передач более важным показателем является нарушение кинематического закона движения, возникающее при входе и выходе зубьев в зацепление, так как эти отклонения вызывают циклические погрешности зубцовой частоты, создающие динамические перегрузки при работе передачи, шум и вибрацию при ее эксплуатации [3].

Основным методом контроля кинематической точности зубчатого колеса в передаче является однопрофильная обкатка его с парным колесом.

Метод однопрофильного контроля при осуществлении непрерывного обката с измерительным элементом является типичным случаем комплексного контроля, поскольку получаемый результат дает непосредственно комплексную оценку кинематической точности изделия и характеризует непрерывное изменение погрешностей углового положения контролирующего колеса по углу его поворота [3]. Поэтому в качестве линии зацепления выступает кинематическая погрешность зубчатого колеса.

В работе [2] было показано, что линия зацепления винтовой пары имеет погрешность. Величина погрешности линии зацепления от элементных погрешностей изготовления, заточки и установки дискового шевера впервые рассчитана в работе [1].

Для измерения линии зацепления дискового шевера используется прибор для контроля кинематической погрешности модели БВ-5058:

- типоразмер прибора СЦ-1;
- модули контролируемых колес от 1 до 8 мм;
- диаметры делительной окружности контролируемых зубчатых колес от 20 до 320 мм;
- масса контролируемого изделия не более 40 кг;
- длина вала оправки, устанавливаемой в центрах, от 200 до 300 мм;
- передаточное отношение контролируемых колес от 1:1 до 1:16;
- число оборотов ведущего шпинделя 6 об/мин;
- принцип действия - электронный.

Прибор позволяет контролировать цилиндрические зубчатые колеса внешнего и внутреннего зацепления при непрерывном однопрофильном зацеплении с измерительным или парным колесом (обкат пары колес). Контролируемые зубчатые колеса устанавливаются на ведущий и ведомый шпинделя. На концах обеих шпинделей установлены фотоэлектрические круговые измерительные преобразователи (ФКИП). Корпуса преобразователей связаны с корпусами бабок посредством параллелограммов, позволяющих исключить из результатов измерений погрешности, возникающие от биений концов шпинделей прибора, на которых установлены ФКИП.

Схема работы прибора представлена на рис. 1. В приборе БВ-5058 использован прин-

цип преобразования погрешности пары зубчатых колес, обкатываемых в однопрофильном зацеплении, в колебания фазы электрических сигналов, поступающих с двух фотоэлектрических круговых измерительных преобразователей 4, один из которых жестко связан с ведущим валом 5, а второй - с ведомым 8. На ведущем валу закрепляется зубчатое колесо 6 с числом зубьев z_1 , а на ведомом - зубчатое колесо 7 с числом зубьев z_2 . С обеих ФКИП при их вращении поступают сигналы на два входа электронной схемы прибора. При обкатке измеряемых колес с одинаковым числом зубьев, т.е. $z_1=z_2$, сигналы с ФКИП с одинаковой частотой $f_1=f_2$ поступают на фазометр 9.

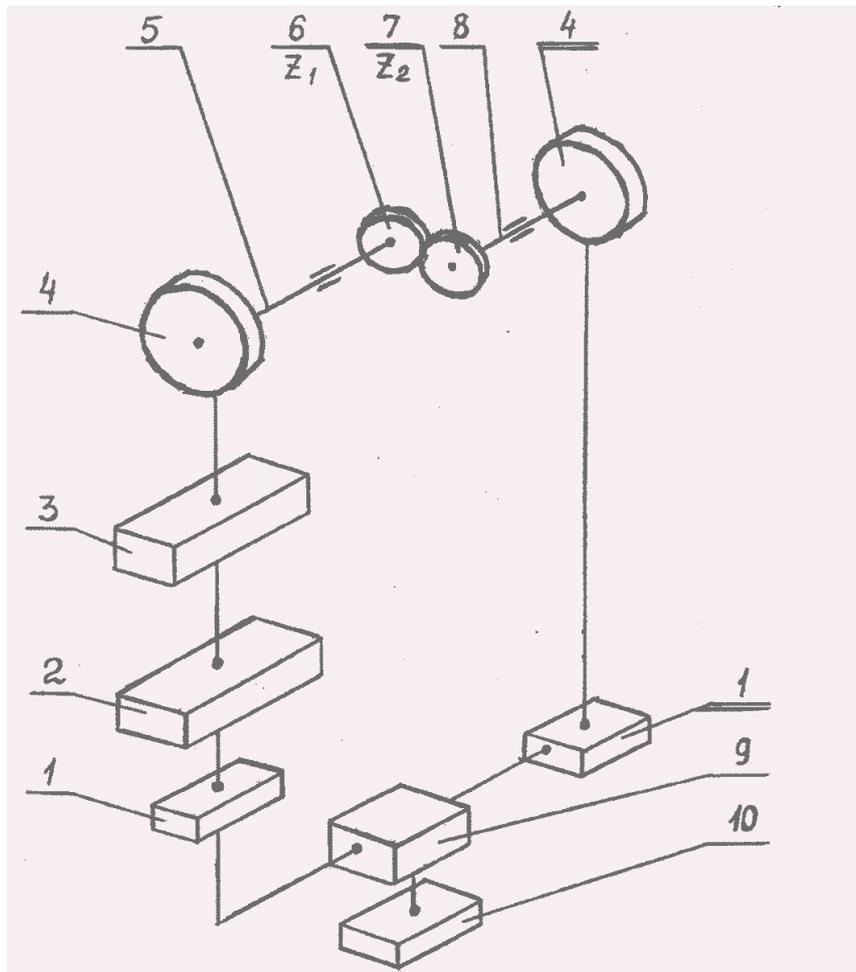


Рис. 1. Схема работы прибора

Сдвиги фаз, возникающие между двумя частота, обусловлены угловым рассогласованием ФКИП, связанных непосредственно с обкатываемыми колесами, т.е. погрешностью обкатываемых колес z_1 и z_2 . Разность фаз записывается электросамописцем 10, и эта запись является графиком кинематической погрешности обкатываемых колес. При $z_1 \neq z_2$ сигналы с ФКИП поступают с разной частотой, т.е. $f_1 \neq f_2$. В этом случае частота, поступающая с ФКИП ведущего обкатываемого колеса, приводится к частоте, поступающей с ФКИП ведомого обкатываемого колеса через умножитель 3 и делитель частоты 2, т.е. сдвиги фаз, возникающие между двумя частотами, обусловлены угловым рассогласованием ФКИП, связанных непосредственно с обкатываемыми колесами, т.е. погрешностью обкатываемых колес z_1 и z_2 . Разность фаз записывается электросамописцем 10, и эта запись является графиком кинематической погрешности обкатываемых колес. При $z_1 \neq z_2$ сигналы с ФКИП поступают с разной частотой, т.е. $f_1 \neq f_2$. В этом случае частота, поступающая с ФКИП ведущего обкатываемого

колеса, приводится к частоте, поступающей с ФКИП ведомого обкатываемого колеса через множитель 3 и делитель частоты 2, т.е.

$$f_1 = \frac{z_1}{z_2} = if_2, \text{ так как } \frac{z_1}{z_2} = i$$

Теперь снова одинаковые частоты $if_1=f_2$ поступают на фазометр, который показывает разность фаз приведенных частот, а самописец регистрирует кинематическую погрешность обкатываемых зубчатых колес.

Для установки различных диапазонов измерения используется регистр масштаба 1, установленный в электронной части прибора.

Для соблюдения статистической устойчивости наблюдаемых значений отклонений параметров принимались следующие меры по обеспечению однородности условий экспериментов:

- 1) все замеры проводились на одном и том же приборе;
- 2) в процессе всех измерений проводилась единая калибровка и настройка прибора;
- 3) все измерения проводились на специально изготовленных оправках, исключающих внесение дополнительных погрешностей.

В работе [1] было показано, что суммарная приведенная погрешность зацепления определяется монотонными кусочно-линейными составляющими, синусоидальными по углу Φ и углу 2ϕ . Суммарная приведенная погрешность может быть разложена на указанные составляющие.

Синусоидальные составляющие по углу ϕ суммарной приведенной погрешности зацепления определяются радиальным и осевым биением шевера, а также радиальной составляющей от перекоса шевера.

Экспериментальная проверка указанной зависимости проводилась за счет изменения радиального биения шевера. Отсутствие перекоса шевера контролировалось. Монотонные составляющие погрешности зацепления на всем протяжении эксперимента оставались постоянными.

Порядок проверки следующий:

1. Выбирается шевер, удовлетворяющий по точности условиям эксперимента.
2. Изменение радиального биения шевера осуществлялось за счет расшлифовки посадочного отверстия.
3. При установке шевера на шпиндель прибора создавались различные необходимые радиальные биения.
4. На приборе для контроля кинематической погрешности БВ-5058 шевер обкатывался с парным зубчатым колесом.
5. Запись кинематической погрешности зубчатой передачи на бумажную ленту (пример записи на рис. 2).
6. Обработка результатов измерений.
7. Сравнение результатов полученных экспериментальным и расчетным путями.

Синусоидальные составляющие по углу 2ϕ суммарной приведенной погрешности зацепления определяются осевой составляющей перекоса шевера.

Выделить синусоидальную составляющую по углу 2ϕ в чистом виде экспериментально не удастся. В связи с этим в данном разделе рассматривается суммарное воздействие перекоса шевера на погрешность зацепления.

Монотонные составляющие погрешности зацепления оставались постоянными на протяжении всего эксперимента.

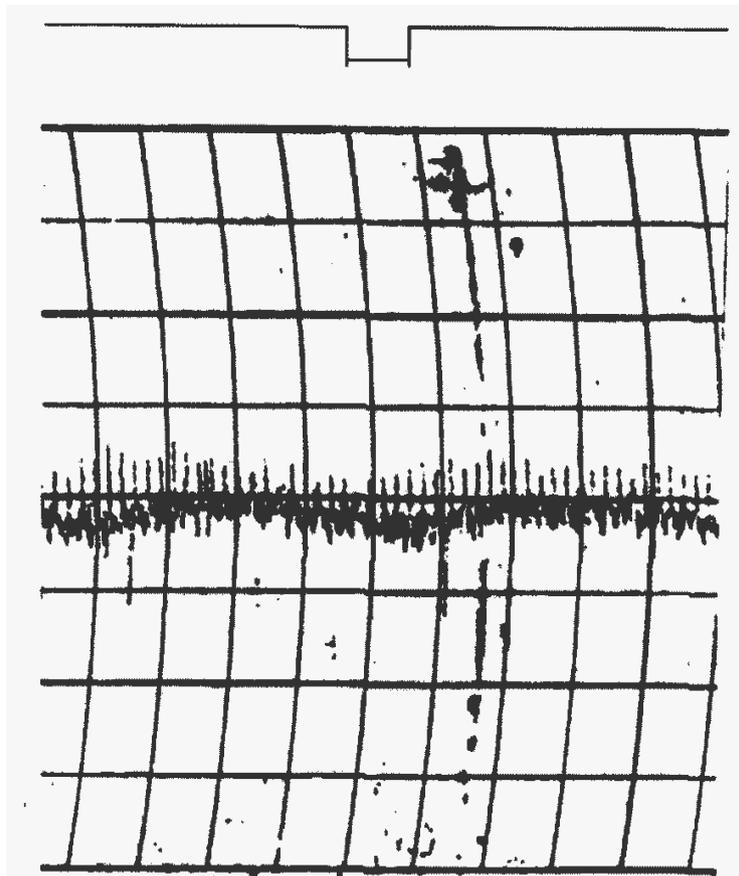


Рис. 2. Влияние радиального биения шевера на погрешность зацепления (правый профиль):
радиальное биение шевера 40 мкм; $F_3=13,8$ мкм

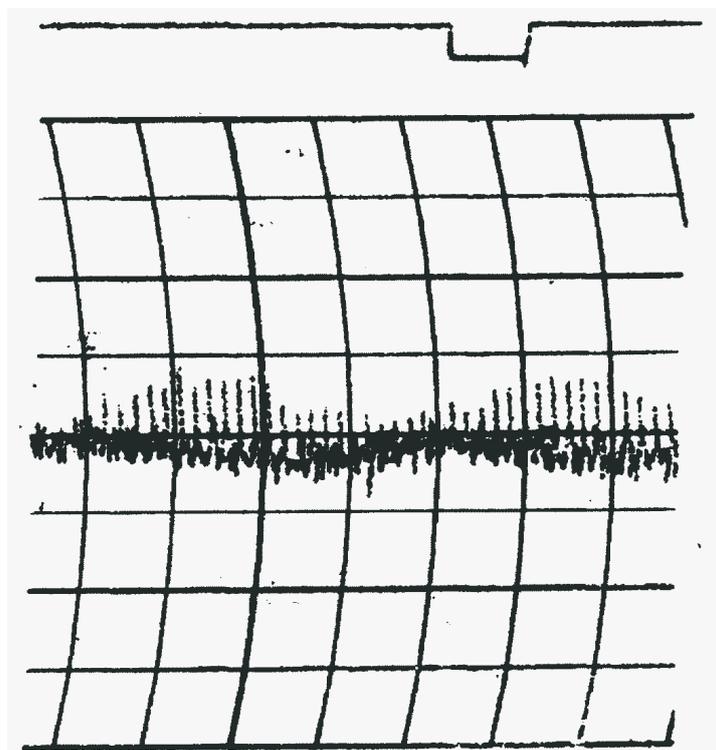


Рис. 3. Влияние перекоса на погрешность зацепления (правый профиль):
перекос 30 мкм; $F_3=14,5$ мкм

Порядок проверки следующий:

1. Выбирается шевр, удовлетворяющий по точности условиям эксперимента.
2. Перекос шевра осуществляется за счет расшлифовки посадочного отверстия.
3. При установке шевра на шпиндель прибора создавались различные требуемые величины перекоса.
4. Обкатка шевра с парным зубчатым колесом на приборе для контроля кинематической погрешности БВ-5058.
5. Запись кинематической погрешности зубчатой передачи на бумажную ленту (пример записи на рис. 3).
6. Обработка результатов измерений.
7. Сравнение результатов полученных экспериментальным и расчетным путями.

На основании разработанной методики появляется возможность экспериментальной проверки влияния погрешностей, изменяющихся по синусоидальному закону по углу φ и 2φ на погрешность зацепления.

Библиографический список

1. **Беспалов, В.В.** Влияние погрешностей дисковых шевров на циклическую погрешность зубцовой частоты цилиндрических зубчатых передач / В.В. Беспалов, В.М. Сорокин // Технологические процессы и оборудование в машино- и приборостроении: Межвуз. сб. научных тр. – Н. Новгород: НГТУ, 1995. С. 92–100.
1. **Полоцкий, М.С.** Повышение точности быстроходных зубчатых передач шевингованием // Труды ЦНИИТМАШ. 1960. № 10. С. 5–63.
2. **Тайц, Б.А.** Точность и контроль зубчатых колес / Б.А. Тайц. – М.: Машиностроение, 1972. –368 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.07.2012*

V.V. Bepalov

METHOD OF EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE EFFECT OF ERRORS THAT VARY SINUSOIDALLY IN ANGLE Φ AND 2Φ ON THE TRANSMISSION ERROR

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

Purpose: Development of sequence of determine the effect of radial runout and shaver cocking on the transmission error.

Design/methodology/approach: It creates a variety of radial runout and cocking. It measures the line of contact. The method of single-flank control is used for rolling action with mating gear.

Findings: This method allows to determine the effect of radial runout and shaver cocking on the transmission error.

Originality/value: The article is of interest to specialists in the manufacture of gears.

Key words: the transmission error, cyclic error of gear-meshing frequency, cocking, single-flank control, radial runout, disc shaver, spur gear.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039

А.В. Варенцов¹, Д.В. Зяблицев¹, Д.Н. Солнцев¹, А.Н. Пронин¹, О.Н. Морозкин²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЛОКАЛЬНЫХ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОТОКА В ТЕПЛО ВЫДЕЛЯЮЩИХ СБОРКАХ РЕАКТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПЛАВУЧЕЙ АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в ТВС реакторной установки плавучей атомной электростанции.

Ключевые слова: ядерный реактор, активная зона, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, дистанционирующая решетка.

Введение

В настоящее время в России ведется строительство плавучей атомной электростанции (ПАТЭС). Данный проект относится к числу инновационных разработок российской энергетики и не имеет аналогов в мире. ОАО «ОКБМ Африкантов» занимается реализацией проекта атомной энергетической установки малой мощности для плавучей атомной электростанции. Проект ПАТЭС позволит российской атомной промышленности предлагать зарубежным заказчикам уникальную технологию в сегменте реакторов малой и средней мощности.

Важной характеристикой ПАТЭС является возможность ее базирования в труднодоступных районах и использования для выработки электричества и тепла. Размещение плавучих атомных теплоэлектростанций наиболее целесообразно в районах, где отсутствуют топливно-энергетические ресурсы или их доставка сопряжена с большими трудностями, в так называемых зонах децентрализованного энергоснабжения (Крайний Север, Дальний Восток России, островные государства Азиатско-Тихоокеанского региона и др.) [1].

Энергоисточником ПАТЭС является реакторная установка (РУ) КЛТ-40С. Требования к ядерным энергетическим установкам обуславливают необходимость обеспечения КЛТ-40С эксплуатационной надёжности и безопасности, а также высоких показателей эффективности работы.

Активная зона данной РУ кассетная и состоит из шестигранных ТВС. Разработанная в ОАО «ОКБМ Африкантов» ТВС для активных зон реактора КЛТ-40С должна соответствовать международным стандартам и требованиям [2]. Для внедрения данной конструкции в активную зону ядерного реактора, необходимо провести комплекс исследовательских работ по обоснованию теплотехнической надёжности данной тепловыделяющей сборки. В связи с этим экспериментальное исследование особенностей формирования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в пучках твэлов ТВС при использовании дистанционирующих решеток является актуальной задачей.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Основным методом изучения гидродинамики сборок твэлов и активных зон реакторов в целом является экспериментальное исследование масштабных и полноразмерных моделей кассет и активных зон на аэро- и гидродинамических стендах [3]. Поэтому исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводились на аэродинамическом экспериментальном стенде (рис. 1) на масштабной модели.

Экспериментальная модель, представляющая собой ТВС реактора КЛТ-40С, выполнена в полном геометрическом подобии и состоит: из шестигранного чехла, 78-ми цилиндрических твэлов-имитаторов, шести цилиндрических СВП-имитаторов, устройства фиксации датчика, трех поясов дистанционирующих решеток.

Выходная часть экспериментальной модели представлена на рис. 1.

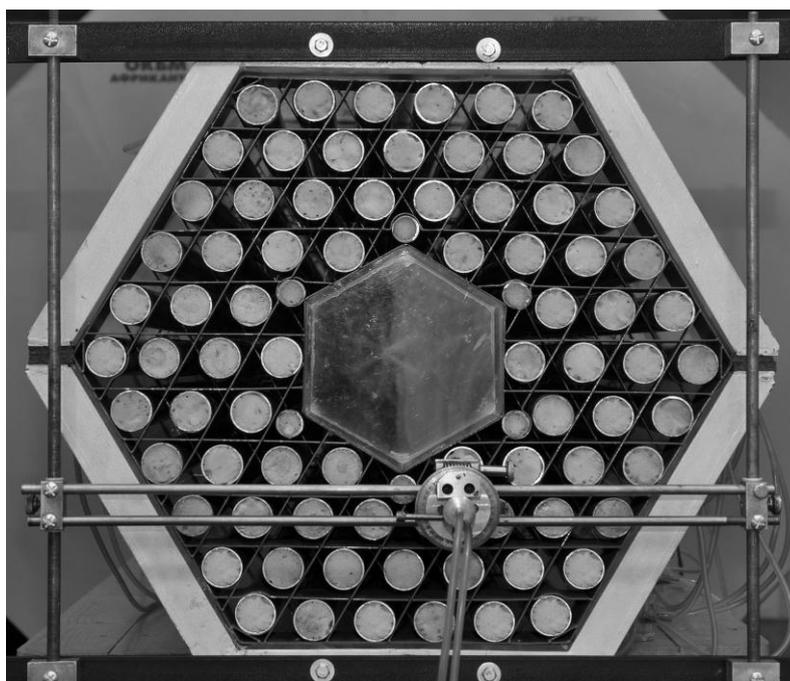


Рис. 1. Выходная часть экспериментальной модели

Исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя заключались в измерении модуля вектора скорости пятиканальным пневмометрическим зондом (рис. 2) внутри трубного пучка экспериментальной модели. Пятиканальный зонд позволяет производить замеры (в среднем около 50 точек) в каждой из ячеек в поперечном сечении исследуемого участка ЭМ.



Рис. 2. Чувствительная часть пятиканального пневмометрического зонда

Для получения полной информации о трехмерном течении потока исследования локальной гидродинамики теплоносителя проводились в трех характерных областях: стандартной области (рис. 3, а), области вытеснителя (рис. 3, б) и периферийной области (рис. 3, в). Каждая область включала в себя определенное количество ячеек, которые разбивались на зоны измерения. В каждой из таких зон замеры проводились в 19 сечениях по длине ЭМ.

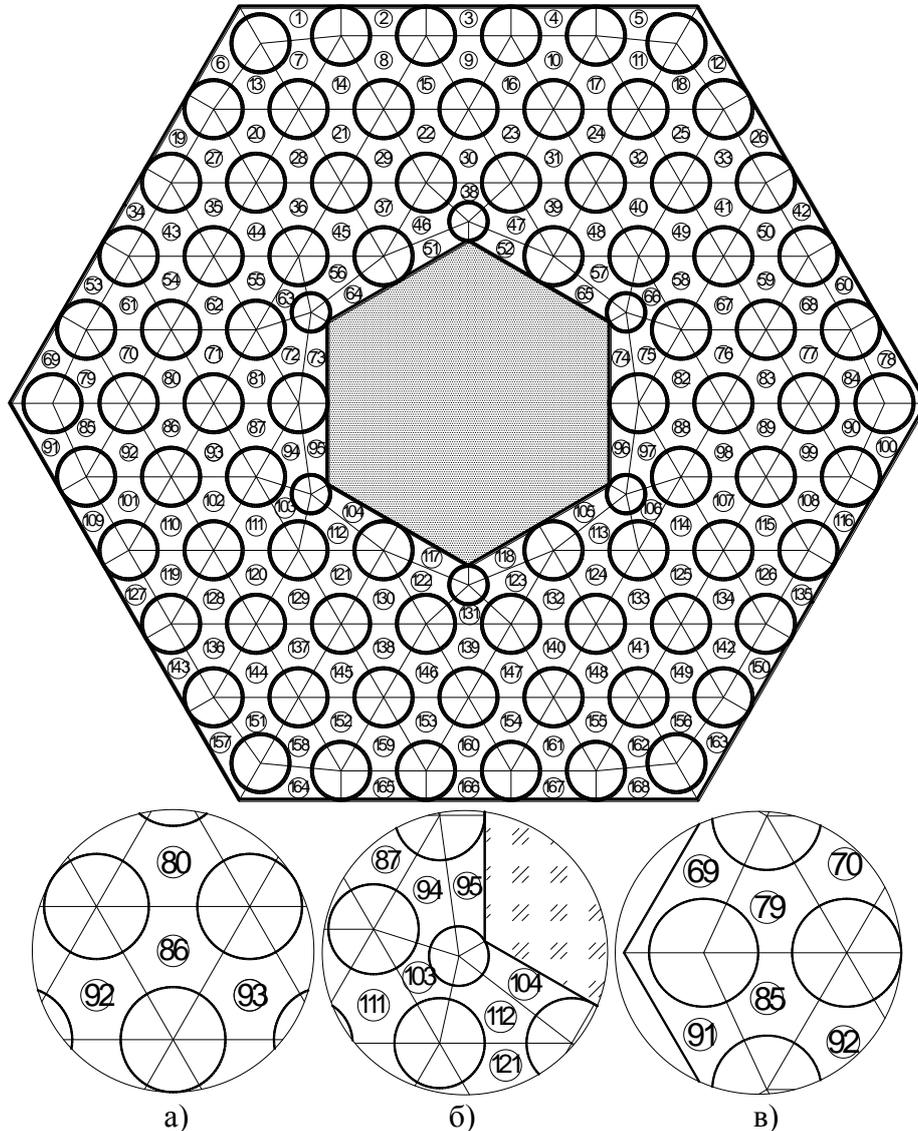


Рис. 3. Расположение ячеек в поперечном сечении экспериментальной модели:
 а – стандартная область; б – область вытеснителя; в – периферийная область

Результаты экспериментальных исследований локальных полей скорости в модели ТВС реактора КЛТ-40С

Экспериментальные исследования локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя проводились на масштабной модели ТВС реактора КЛТ-40С при числах $Re = 90600$. Цель данных исследований заключалась в измерении проекций вектора скорости на оси X , Y , Z в трех характерных областях модели, включающих в себя определенное количество ячеек:

- стандартная область (ячейки № 80;86;92;93);
- область вытеснителя (ячейки № 87;94;95;103;104;111;112;121);
- периферийная область (ячейки № 69;70;79;85;91;92).

Для получения наиболее полного представления о характере течения теплоносителя в рассмотренных областях построены картограммы изотак относительных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} и W_z / \bar{W} для исследуемых областей. Такая форма представления экспериментальных данных позволяет качественно определить основные закономерности течения теплоносителя.

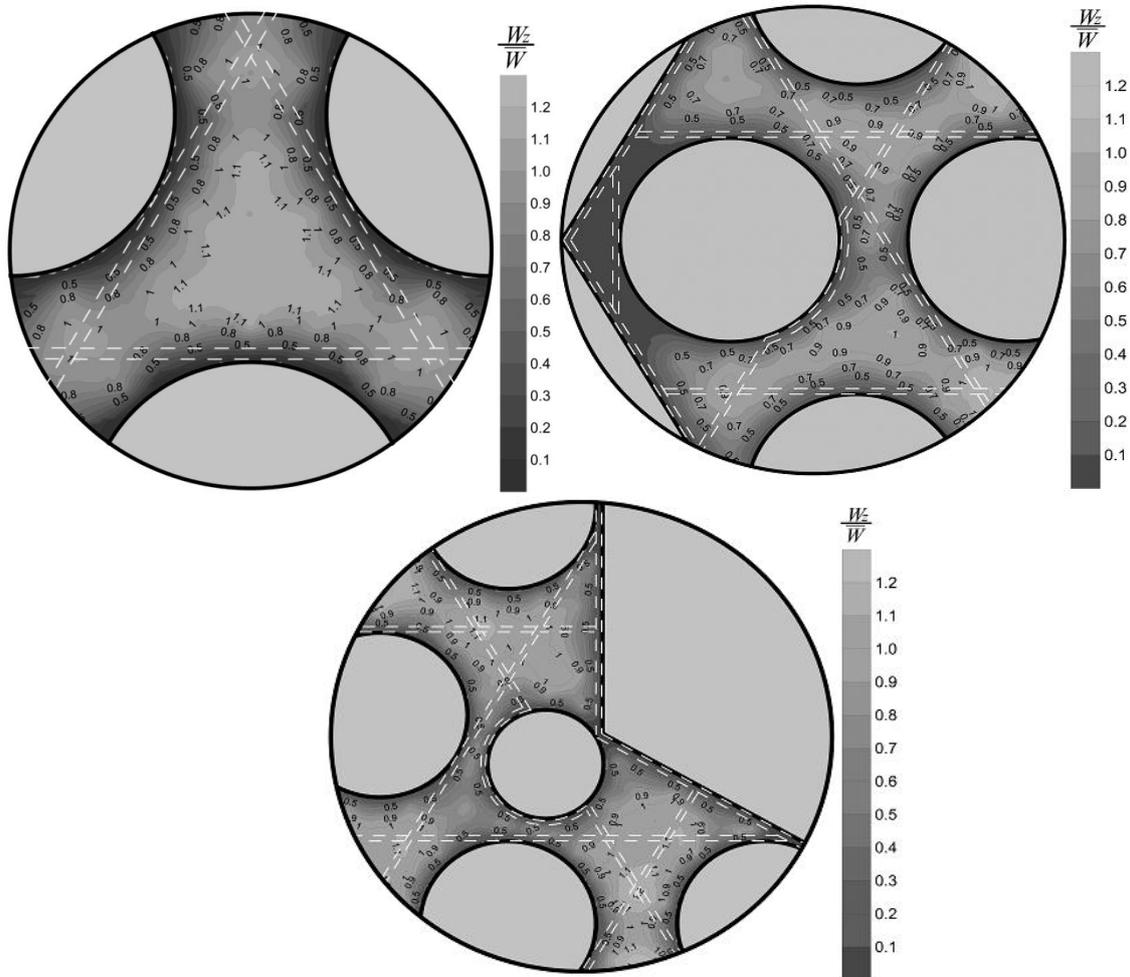


Рис. 4. Картограммы распределения относительных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} и W_z / \bar{W} для зон стандартной, периферийной области и зоны вытеснителя в выходном сечении экспериментальной модели

Анализ гидродинамических величин в трех выбранных областях за ДР ЭМ позволяет определить общие закономерности движения теплоносителя за дистанционирующими решетками ТВС реактора КЛТ-40С. При анализе гидродинамических величин следует учитывать, что каждая область включает в себя определенный набор ячеек, отличающихся площадями проходных сечений.

По результатам распределения проекций абсолютной скорости в стандартной области, области вытеснителя и периферийной области выявлено, что во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей W_x / \bar{W} , W_y / \bar{W} не превышают 5%. Это обуславливается тем, что дистанционирующие решетки, состоящие из пластин, вносят незначительные возмущения в поток теплоносителя, а также тем, что ТВС реактора КЛТ-40С имеет раздвинутый пучок твэлов. Полученные результаты подтверждают также малую интенсивность межъячеечного массообмена потока теплоносителя за дистанционирующими решетками КЛТ-40С.

Из картограмм распределения проекций абсолютной скорости в стандартной области (яч. № 86) видно, что в центре ячейки № 86 наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму (рис. 4). Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения ($W_z / \bar{W} = 1,1 \div 1,2$) от среднерасходной скорости.

В ячейках области вытеснителя значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} распределились следующим образом:

- в ячейках № 95, 104 значения $W_z / \bar{W} = 0,90 \div 1,07$;
- в ячейках № 94, 112 значения $W_z / \bar{W} = 0,95 \div 1,10$;
- в ячейке № 103 значения $W_z / \bar{W} = 0,83 \div 1,00$.

По результатам распределения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} в ячейках области вытеснителя ТВС видно, что значения W_z / \bar{W} на (10–15)% меньше, чем в стандартных ячейках.

Для периферийных ячеек было получено следующее распределение значений аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} :

- в ячейках № 69, 91 значения $W_z / \bar{W} = 0,67 \div 0,84$;
- в ячейках № 79, 85 значения $W_z / \bar{W} = 0,81 \div 1,00$.

В результате распределения аксиальной составляющей вектора скорости W_z / \bar{W} в периферийной области значения W_z / \bar{W} на 20–30% меньше, чем в стандартных ячейках.

Экспериментальные исследования локальных полей скорости в стандартной области, области вытеснителя и периферийной области позволили определить распределение расхода теплоносителя, что играет важную роль при расчете температурного поля в активной зоне реактора.

При анализе расходов через характерные области необходимо учитывать площади проходных сечений ячеек, входящих в данные области.

Ввиду конструктивных особенностей пластинчатой дистанционирующей решетки ТВС реактора КЛТ-40С её пластины по-разному затесняют проходное сечение стандартных ячеек. Ячейка №86 относится к первому варианту затеснения пластинами ДР поперечного сечения, пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «треугольника» (рис. 5, а). Ячейки №80, 92, 93 относятся ко второму варианту затеснения пластинами ДР поперечного сечения, пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «звезды» (рис. 5, б).

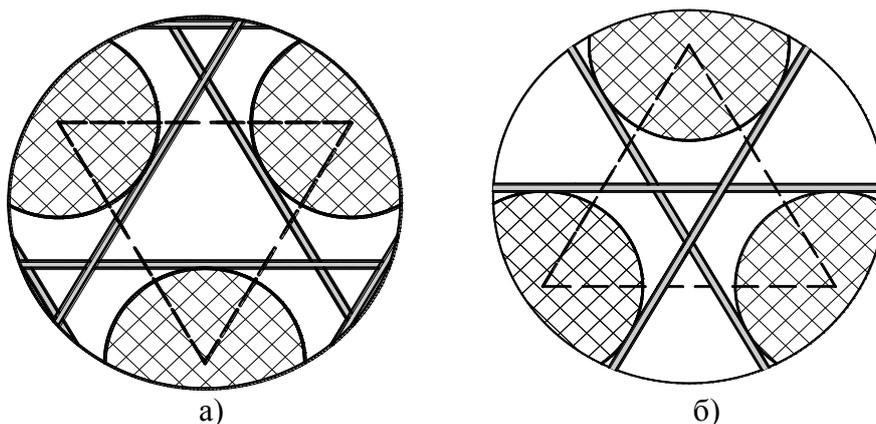


Рис. 5. Затеснение поперечного сечения стандартной ячейки пластинами ДР в виде: а – «треугольника»; б – «звезды»

Сравнение расходов в стандартных ячейках двух вариантов затеснения поперечного сечения пластинами ДР показало, что через ячейки первого варианта затеснения поперечного сечения расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки второго варианта затеснения поперечного сечения.

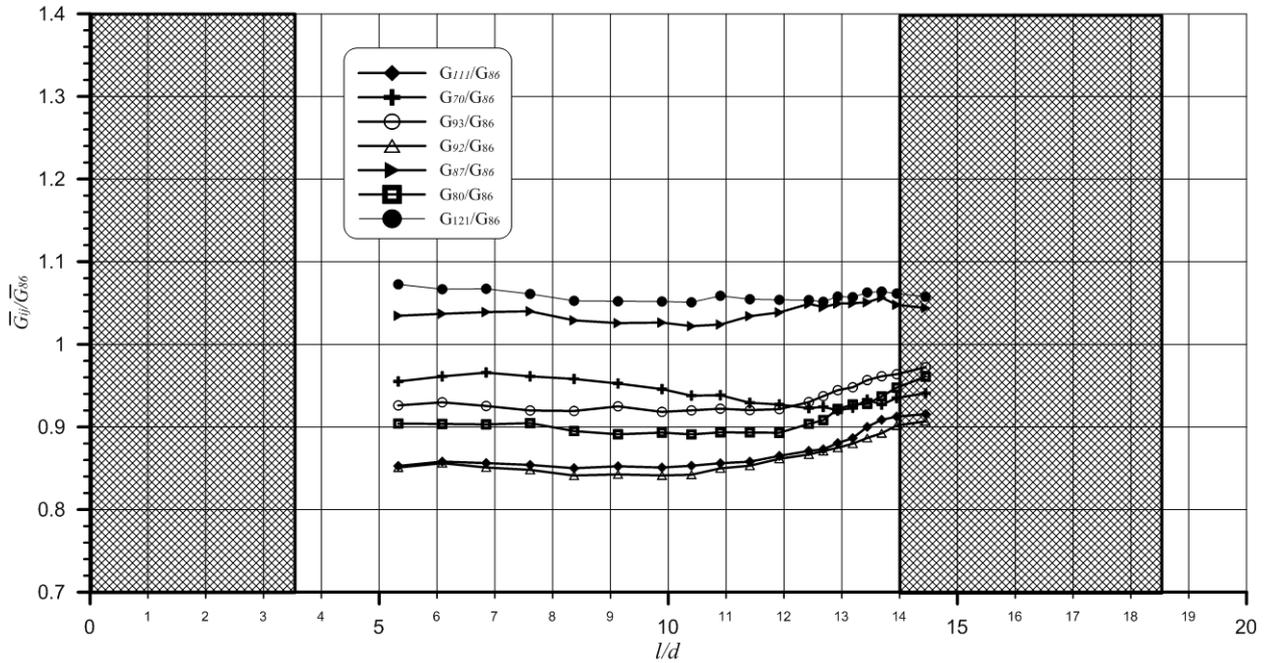


Рис. 6. Отношение распределения расхода теплоносителя через стандартные ячейки с двумя вариантами затеснения поперечного сечения пластинами ДР

Для сравнения расходов теплоносителя через стандартную область и область вытеснителя, а также периферийную область значения расходов в ячейках данных областей отнесились к значению расхода через стандартную ячейку №86.

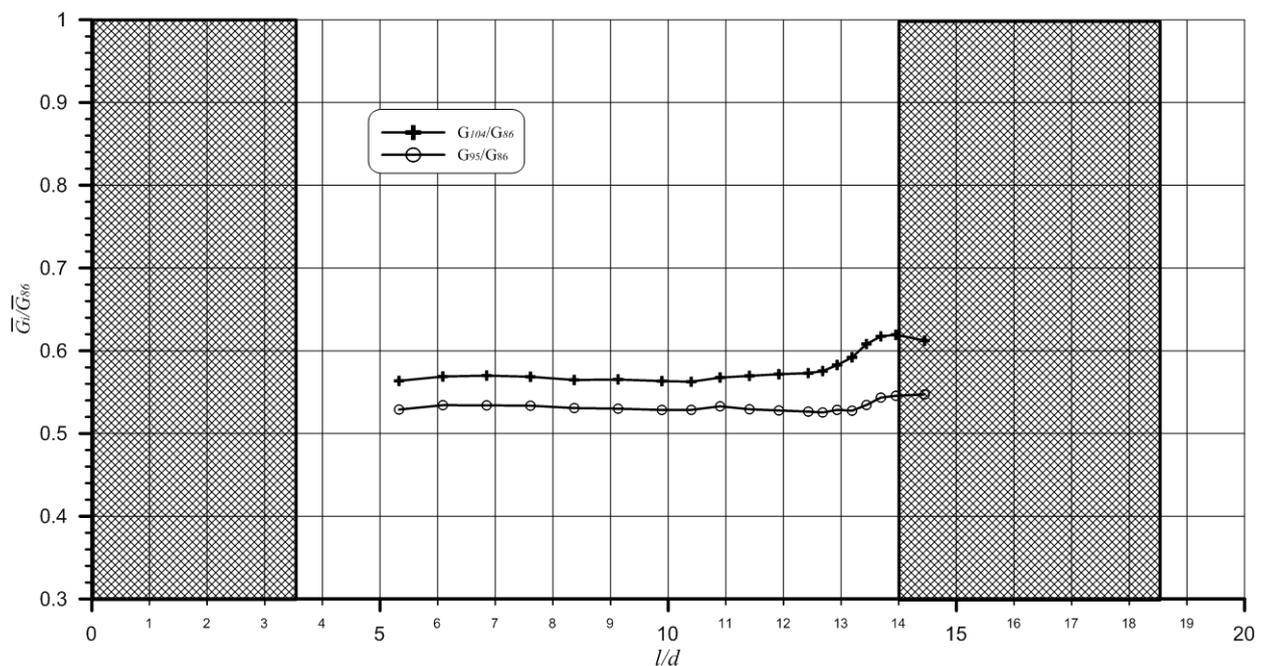


Рис. 7. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки № 95, 104 к стандартной ячейке №86

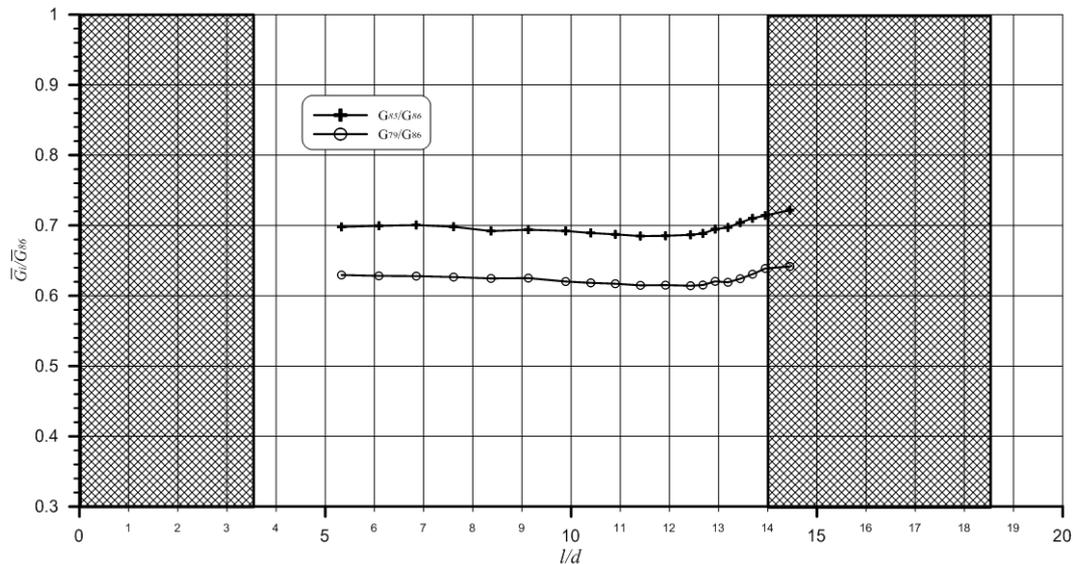


Рис. 8. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки № 69, 91 к стандартной ячейке №86

В результате были получены следующие значения распределения расходов теплоносителя через область вытеснителя (ячейки №95,104) и через периферийную область (ячейки №69, 91). В ячейках области вытеснителя расход составляет 40% по отношению к расходу стандартной ячейки, в ячейках периферийной – 30% от расхода в стандартной ячейке.

Выводы

1. Определены характеристики локальной гидродинамики потока теплоносителя в ТВС реактора КЛТ-40С. По результатам исследований выявлены особенности течения теплоносителя за дистанционирующими решетками, а именно:

а) во всех ячейках ТВС реактора КЛТ-40С поток теплоносителя преимущественно носит осевой характер. Значения относительных поперечных скоростей W_x/\bar{W} , W_y/\bar{W} не превышают 5%;

б) в центрах стандартных ячеек, где пластины дистанционирующей решетки ТВС реактора КЛТ-40С затесняют проходное сечение ячейки в виде «треугольника», наблюдается ярко выраженное ядро потока, имеющее треугольную форму. Значение аксиальной составляющей вектора скорости в ядре потока достигает максимального значения $W_z/\bar{W} = 1,1 \div 1,2$ от среднерасходной скорости;

в) значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z/\bar{W} в ячейках области вытеснителя ТВС реактора КЛТ-40С на (10–15)% меньше значений W_z/\bar{W} в стандартных ячейках;

г) в периферийных ячейках значения аксиальной составляющей вектора скорости W_z/\bar{W} на (20–30)% меньше, чем в стандартных ячейках.

2. Анализ распределения расходов через характерные области модели ТВС реактора КЛТ-40С позволил выявить следующее:

а) через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «треугольника», расход теплоносителя на 10% больше, чем через ячейки, где пластины дистанционирующей решетки располагаются в виде «звезды»;

б) через ячейки области вытеснителя и периферийной области расход теплоносителя на 30–40% меньше, чем через стандартные ячейки ТВС реактора КЛТ-40С.

Обобщена экспериментальная информация и создан банк данных для верификации

CFD-кодов и программ детального поочередного расчета активных зон с ТВС для реактора КЛТ-40С с целью уменьшения консерватизма в расчетах теплотехнической надежности активных зон.

Работа выполнена при поддержке Совета по грантам Президента РФ (грант №МК-3172.2011.8) и гранта Нижегородской области в сфере науки, технологий и техники.

Библиографический список

1. Расчетно-экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя в ТВС реакторной установки КЛТ-40С / Д.В. Доронков [и др.] // Энергия-2012: материалы региональной научно-технич. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых: в 8 т. Иваново. Т. 2. С. 23-26.
2. Экспериментальное исследование локального массообмена и оценка эффективности перемешивания дистанционирующих решеток в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Материалы XXXII Всерос. конф. по проблемам науки и технологий. – М.: МСНТ, 2012. С. 111-113.
3. Исследование массообменных характеристик и эффективности перемешивающих решеток ТВСА-АЛЬФА реакторов ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Труды пятой Российской национ. конф. по теплообмену: в 8 т. М., 2010. Т. 1. С. 177-180.

*Дата поступления
в редакцию 06.08.2012*

A.V. Varentsov¹, D.V. Zyablitshev¹, D.N. Solntsev¹, A.E. Khrobostov¹, O.N. Morozkin²

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FLOW HYDRODYNAMICS IN FUEL ASSEMBLIES OF FLOATING NUCLEAR POWERPLANT REACTOR

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Joint stock company «OKBM Afrikantov»²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics of coolant in the KLT-40S nuclear reactor FA.

Design/methodology/approach: The main method of investigation of hydrodynamics in the nuclear reactor FA is an experimental research of full-size fuel assemblies and cores models on aero- and hydrodynamics stands. Researches of coolant local hydrodynamics are based on measurements of local velocity vectors with five-hole pressure probe inside experimental model.

Findings: Characteristics of local hydrodynamics coolant flow in KLT-40S reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid were revealed. Experimental researches of local velocity fields in standard cells, cells around displacer and peripheral cells of FA allowed to define distribution of coolant expense in FA, what plays important role at calculation of a temperature field in core of the KLT-40S reactor

Research limitations/implications: The special databank was created basing on the experimental results. The data are used for verifying CFD-codes to reduce conservatism on esteeming the KLT-40S reactor heat engineering reliability. The results of the research were accepted and are used now by JSC OKBM Afrikantov.

Originality/value: Originality of this article is in local hydrodynamics of coolant research, and revealing features and conformity of coolant flow in the nuclear reactor FA to physical laws. Therefore we can prove heat engineering reliability of the KLT-40S reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, spacer grid.

УДК 621.37.029.6

**В.В. Бирюков, В.А. Грачев, М.В. Кольцов,
Г.С. Малышев, А.С. Раевский, В.В. Щербаков**

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ В ЛАБОРАТОРИИ МИКРОВОЛНОВОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКИ НГТУ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены методы расчета электромагнитной обстановки. Лучевым методом исследована электромагнитная обстановка в помещении лаборатории. Показана возможность создания квазибезэховой зоны для проведения антенных измерений. Приведены результаты измерений. Предложена методика математической обработки результатов измерений при наличии переотраженных волн.

Ключевые слова: электромагнитная обстановка, безэховая камера, коэффициент безэховости, интерференция.

Введение

Оценка электромагнитной обстановки (ЭМО) (расчет пространственного распределения электромагнитного поля внутри ограниченного пространства) является актуальной задачей. Знать ЭМО нужно для обеспечения норм техники безопасности, решения проблемы электромагнитной совместимости, проведения антенных измерений. Амплитуда поля в каждой точке пространства лаборатории определяется интерференцией большого числа волн, испытавших многократные отражения от различных препятствий, при этом учитывается рассеяние на мелкомасштабных структурах и шероховатых поверхностях, дифракция на острых кромках объектов и т.п. Характер интерференционной картины зависит от частоты излучения, геометрии объектов, расположенных в исследуемом пространстве, электрических и магнитных свойств этих объектов.

В работе исследовалась ЭМО в помещении лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ с целью корректного проведения антенных измерений в диапазоне частот 2–12 ГГц. Для правильного проведения антенных измерений в лаборатории микроволновой электродинамики сначала решалась задача определения основных источников помех лучевым методом. После трассировки лучей определялись направления, откуда в приемную антенну приходили наиболее интенсивные отраженные сигналы. Для создания квазибезэховой области в месте расположения приемной антенны эти направления закрывались поглощающим материалом ECCOSORB VHP-4-NRL, свойства которого описаны в [1]. Коэффициент безэховости в области приемной антенны при этом изменялся от -15Дб до -30Дб. Однако полностью исключить влияние переотраженных сигналов нельзя. Поэтому на основе теории интерференции был разработан алгоритм для выделения интересующей нас составляющей принятого сигнала. Алгоритм основан на решении системы нелинейных уравнений. Для решения таких систем использовали возможности пакета Optimization Toolbox среды MATLAB, в частности, функция `fsolve`. Расчеты показывают, что для хорошего совпадения экспериментальных и теоретических результатов достаточно учесть пять отраженных волн.

Методы расчета электромагнитной обстановки

Из многочисленных публикаций, посвященных данной тематике, можно выделить четыре основных метода расчета ЭМО. Первый - статистический, не требующий подробной информации о помещении, кроме общего описания его типа: производственное здание, гостиница, больница, здание старой постройки и т.п. [2]. Здесь задается эмпирическая зависимость потерь L_p от расстояния d между антеннами:

$$L_p = L_{p0}(d_0) + 10n \lg\left(\frac{d}{d_0}\right), \quad (1)$$

где L_{p0} – потери в децибелах на расстоянии d_0 от излучателя; n – показатель степени, который определяется типом здания. Такая модель характеризуется быстротой расчетов, при выполнении которых требуется определить только расстояние между антеннами – все другие параметры и константы относятся ко всему зданию в целом и задаются предварительно.

Второй – эмпирический, основанный на анализе одного или нескольких лучей, соединяющих передающую и приемную антенны [3]. Здесь учитываются потери во всех препятствиях на пути между приемной и передающей антеннами. Модели второй группы основаны на добавлении к (1) потерь во всех стенках на пути между приемной и передающей антеннами. При этом точный поиск точек отражения сигнала не производится.

Третий – лучевой, в котором используется квазиоптическое представление процесса распространения волн и учитывается отражение от стен помещения и дифракция на границах препятствий [4], [5]. Здесь максимально полно учитывается информация о планировке здания и определяются все возможные пути попадания сигнала из антенны передатчика в антенну приемника. Дифракционные потери сигнала вдоль каждого пути рассчитываются с использованием геометрической теории дифракции, а коэффициенты отражения – с помощью формул Френеля. Возможно также использование эмпирических соотношений, откалиброванных при помощи экспериментальных данных. Основным недостатком моделей третьей группы является их чувствительность к точности исходных данных. В случаях, когда неточно указаны данные о параметрах стен или их местоположение, результаты расчета существенно ухудшаются. Поле очень чувствительно к параметрам модели, используемой при расчетах. Небольшие изменения планировки помещения, расположения объектов внутри помещения или электрических свойств строительных материалов приводит к заметным вариациям структуры поля. В связи с этим в ряде случаев достаточно рассчитать некоторые средние характеристики электромагнитного поля, например, среднее значение принимаемой мощности.

Четвертый – численный, основанный на решении уравнений Максвелла. По сравнению с первыми тремя данный метод является более сложным, требующим больших затрат машинных ресурсов, поэтому его применяют, когда лучевой подход не работает (когда размеры объекта соизмеримы с длиной волны).

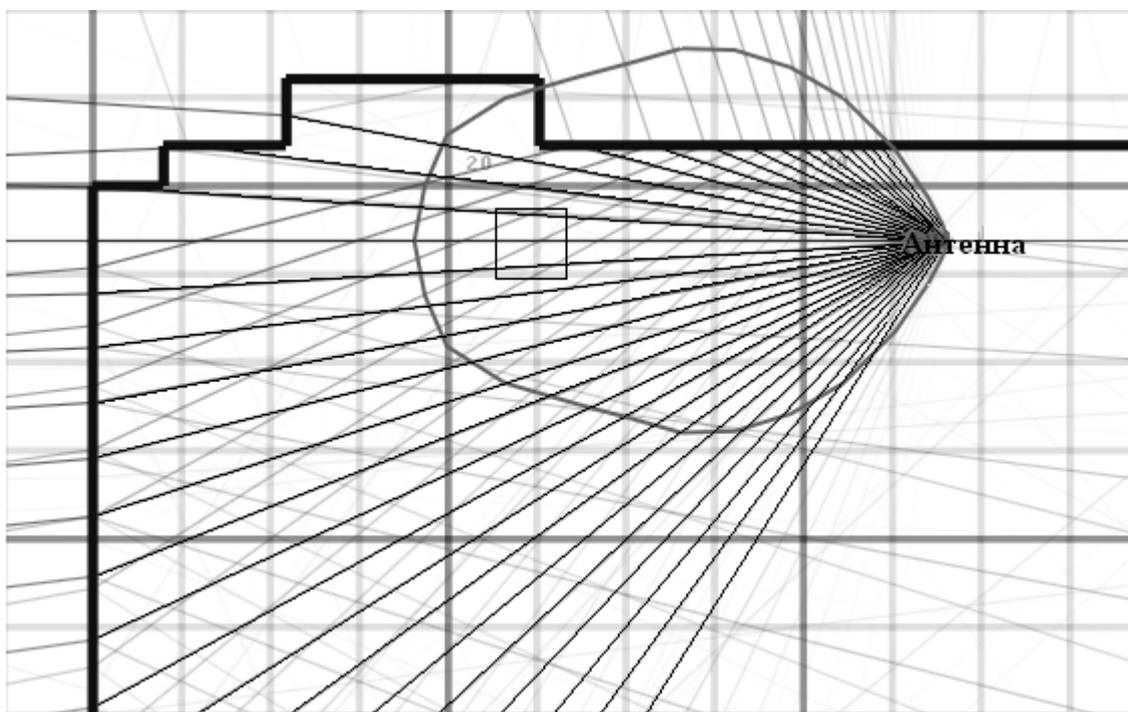
Выбор методики расчета ЭМО зависит от соотношения между длиной волны излучения и размерами исследуемого помещения. Анализ опубликованных результатов теоретических исследований показывает, что в высокочастотной области заданного диапазона частот, когда справедливо приближение геометрической оптики, эффективным методом расчета полей является лучевой. В низкочастотной части диапазона длина волны излучения становится сравнимой с размерами помещения и приближение геометрической оптики не работает. В этом случае целесообразно прибегать к численному решению уравнений Максвелла. В последние годы широкое признание получил метод конечных разностей во временной области (FDTD)[6].

На результаты измерений основных параметров и характеристик антенн оказывает серьезное влияние явление многолучевой интерференции, так как в точку приема помимо основного сигнала приходят волны с различными амплитудами и фазами, отраженные от объектов находящихся вблизи лабораторной установки (пол, потолок, стены, металлические корпуса приборов и т.д.).

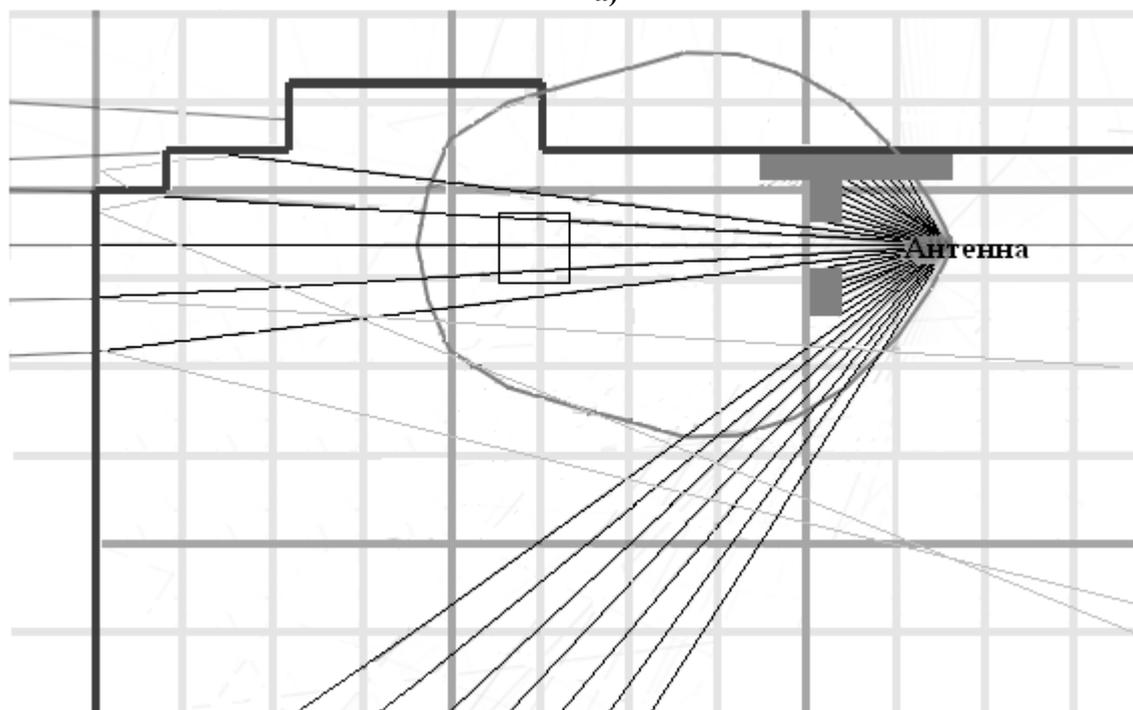
Использование лучевого метода

На рис. 1, а схематично изображено горизонтальное сечение части лаборатории на уровне расположения передающей антенны. Жирными линиями обозначены стены лаборатории и диаграмма направленности (ДН) передающей антенны, в качестве которой использовался открытый конец прямоугольного волновода. Диаграмма направленности передаю-

щей антенны взята из работы [7]. На основе геометрических законов оптики была разработана программа расчета ЭМО лучевым методом для персонального компьютера. Тонкими яркими линиями изображены лучи, идущие от передающей антенны, тонкими бледными – лучи однократно и двукратно отразившиеся от стен лаборатории. Видно, что через область, выделенную квадратным контуром, в которой располагается приемная антенна, проходят лучи прямой и переотраженных волн.



а)



б)

Рис. 1. Применение лучевого метода для анализа ЭМО в лаборатории:
а – без использования поглощающих материалов; *б* – с использованием

Применением специальных экранов, а также за счёт грамотной планировки взаимного расположения приборов в лаборатории можно снизить влияние отраженных сигналов в месте расположения приемной антенны. Поэтому на второй стадии экспериментальных исследований важно было расположить приемник и источник в лаборатории таким образом, чтобы свести к минимуму влияние отражающих поверхностей, которые и являются основной причиной возникновения отраженных сигналов. Для этого были применены блоки из поглощающего материала ECCOSORB VHP-4-NRL. На рис. 1, б показан ход лучей при использовании поглощающих материалов. Прохождение переотраженных лучей через область расположения приемной антенны существенно снижено.

Важным параметром, характеризующим антенные измерения, является коэффициент безэховости [8]. Коэффициент безэховости вычисляется как отношение мощностей рассеянной и прямой волн в апертуре приемной антенны: $КБЭ=10\lg(P_{рас}/P_{пад})$. Для расчета коэффициента безэховости строится распределение интенсивности поля в лаборатории в плоскости, параллельной поверхности земли на уровне антенн. Эта поверхность разбивается на элементарные площадки, в пределах которых мощность СВЧ излучения считается постоянной. Мощность в каждом элементе находится сложением мощностей пришедших в данную точку переотраженных волн. Число учитываемых переотраженных волн было ограничено тремя, так как интенсивность волны, отразившейся четырежды, настолько мала, что не вносит существенный вклад в суммарный результат [6]. Без учета поглотителей коэффициент безэховости составил -15 дБ, а с учетом -30 дБ.

Практическая реализация рабочего места для антенных измерений приведена на рис. 2.

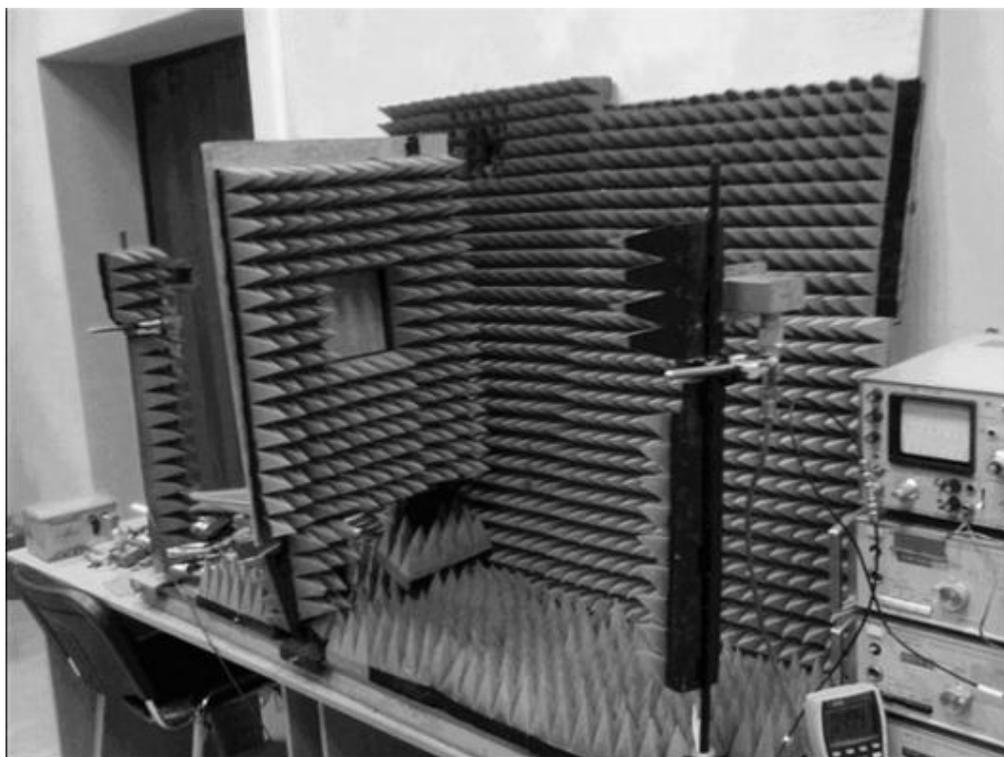


Рис. 2. Рабочее место для антенных измерений в лаборатории

Методика эксперимента

Схема измерительной установки приведена на рис. 3. СВЧ сигнал, модулированный по амплитуде, от генератора СВЧ 4 через направленный ответвитель 5 поступает на передающую антенну 2 и на вход опорного измерительного канала. Передающая 2 и приемная 3 антенны расположены на оптической скамье 1. Обе антенны могут перемещаться и вращаться в двух взаимноперпендикулярных плоскостях.

Опорный канал необходим для контроля за уровнем и стабильностью выходной СВЧ мощности, подаваемой на передающую антенну. В опорном канале модулированный СВЧ сигнал детектируется с помощью детекторной секции 6. Затем низкочастотный сигнал, пропорциональный выходной мощности генератора поступает на вход линейного малошумящего усилителя (МШУ) 8, где он усиливается до уровня, стабильно регистрируемого универсальным цифровым вольтметром 10.

СВЧ сигнал, принятый приемной антенной 3, поступает на вход основного измерительного канала. Принятый сигнал детектируется с помощью детекторной секции 7. Далее, низкочастотный сигнал, пропорциональный СВЧ мощности в точке приема, поступает на вход линейного МШУ 9, где он усиливается до уровня, стабильно регистрируемого универсальным цифровым вольтметром 11.

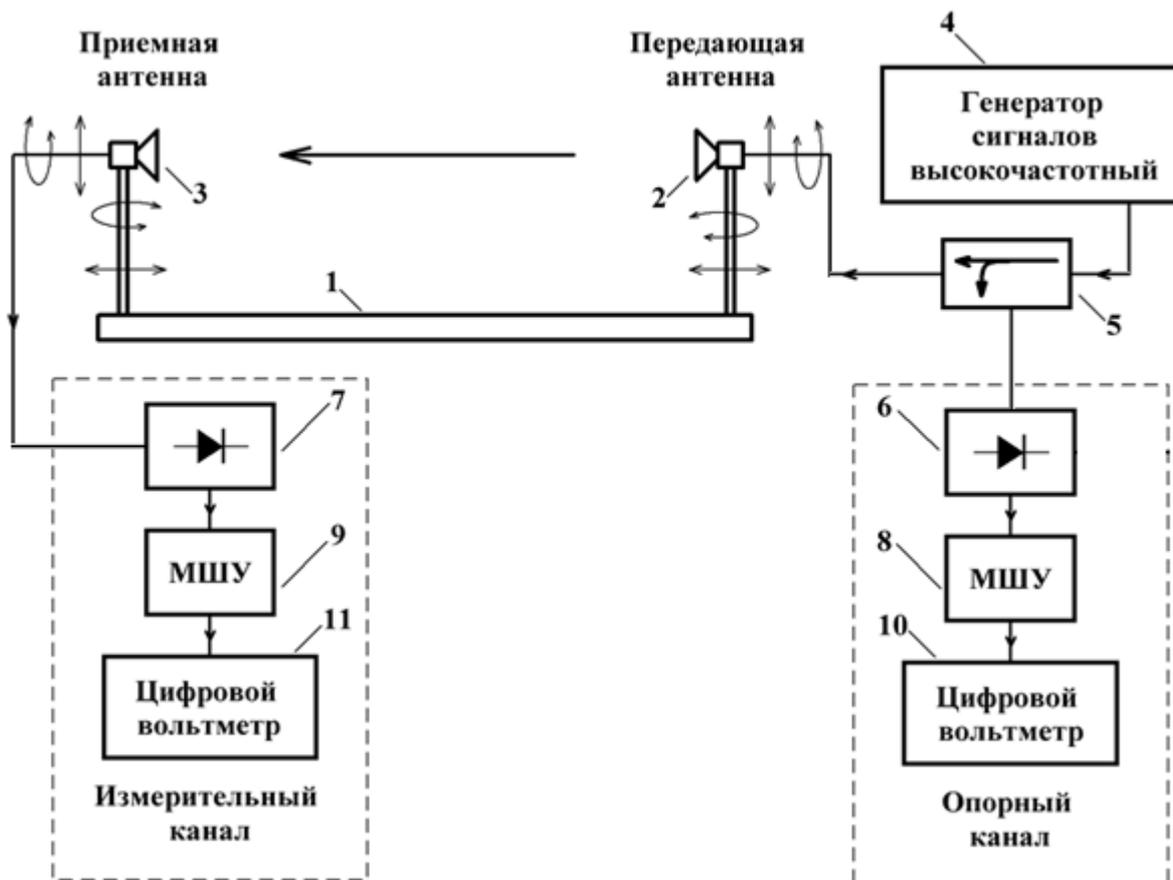


Рис. 3. Схема измерительной установки

Преимущества, которые даёт использование специальных поглощающих покрытий и шторок, становятся ясны из рис. 4 на котором показано распределение интенсивности излучения вдоль измерительной скамьи до и после использования специальных поглощающих и рассеивающих материалов. По оси абсцисс отложено расстояние от источника излучения до приёмника, по оси ординат – напряжение на выходе приёмника, соответствующее интенсивности принятого излучения. Хорошо видно, что использование поглощающих и рассеивающих материалов в лаборатории позволяет получить результаты экспериментальных измерений, близкие к теоретическим. В идеальном случае теоретические кривые должны представлять распределение интенсивности стоячей волны (из-за переотражения волн от приемной и передающей антенн).

Результаты измерения согласуются с результатами лучевого расчета и свидетельствуют о существенном уменьшении коэффициента безэховости при использовании поглощающих покрытий.

Однако полностью исключить влияние переотражённых сигналов нельзя, поэтому возникает задача разработать на основе теории интерференции численный алгоритм для выделения полезной составляющей принятого сигнала. Попытка представить существующее в области приемной антенны поле как интерференцию двух волн является довольно грубым приближением. Однако данная задача может быть решена аналитически, что позволяет оценить вклад основной волны в результирующее поле. Для более точного решения задачи необходим учёт большего числа волн, что приводит к необходимости решения нелинейных систем с большим числом уравнений. Эти системы могут быть решены только численно и имеют множество решений, в том числе и комплексных. Результат решения таких систем существенно зависит от начального приближения. В качестве такого начального приближения предлагается использовать результаты расчета, полученные при решении задачи о двух волнах.

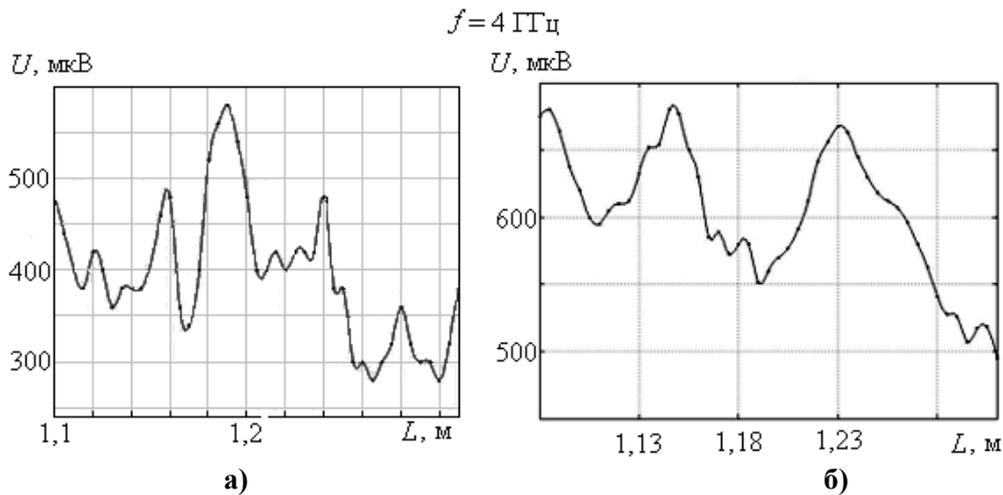


Рис. 4. Распределение интенсивности излучения вдоль измерительной скамьи
a – без поглощающих материалов; *б* – с их использованием

Метод расчета

Рассмотрим случай интерференции двух лучей – прямого луча, прошедшего от источника к приёмнику по прямому пути, и луча, отражённого от электродинамически более плотной среды, например, от измерительной скамьи рис. 5.

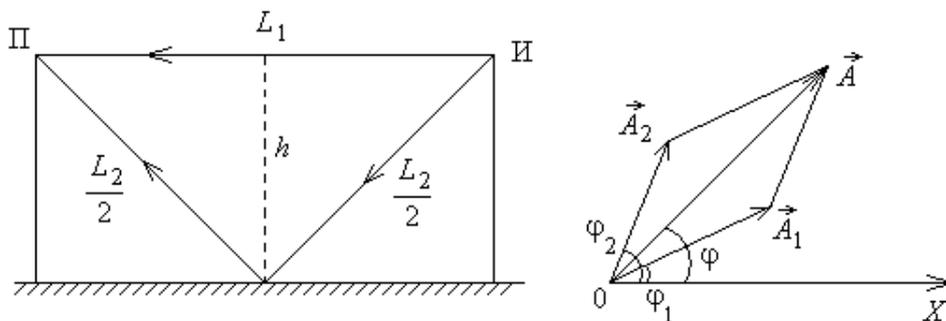


Рис. 5. Задача об интерференции двух волн

Согласно методу векторных диаграмм, амплитуда A волны, полученной при интерференции двух волн с амплитудами A_1 и A_2 , находится по формуле

$$A^2 = A_1^2 + A_2^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2, \quad \varphi_1 = kL_x + \pi, \quad \varphi_2 = kL_0, \quad k = \frac{2\pi f}{c}$$

$$A^2 = A_1^2 + A_1^2 + 2A_1A_2 \cos \Delta\varphi, \quad \Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2,$$

где L_x и L_0 - геометрические пути лучей 1 и 2 соответственно. Дополнительный набег фазы, составляющий π для луча 1, объясняется отражением от электродинамически более плотной среды. Учитывая квадратичность приёмника, в дальнейшем, вместо квадрата амплитуды волны, будем записывать напряжение на выходе приёмника. То есть получим следующие уравнения:

$$\begin{aligned} u &= u_{01} + u_{02} + 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \Delta\varphi = u_{01} + u_{02} + 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (L_x - L_0) + \pi \right] = \\ &= u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (L_x - L_0) \right] \\ u &= u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} \Delta L \right], \quad \Delta L = L_x - L_0 \\ L_x &= \sqrt{L_0^2 + 4h^2}. \end{aligned}$$

Здесь L_x и L_0 - геометрические пути лучей 1 и 2 соответственно; h - расстояние до отражающей поверхности; L_0 - расстояние от источника до приёмника (эта величина нам известна).

Из последнего выражения найдём формулу для координаты m -го минимума. Запишем систему для двух соседних минимумов:

$$\begin{cases} x_{\min}^{(m)} = \frac{2f}{cm} \left[h^2 - \frac{c^2 m^2}{4f^2} \right] \\ x_{\min}^{(m+1)} = \frac{2f}{c(m+1)} \left[h^2 - \frac{c^2 (m+1)^2}{4f^2} \right] \end{cases}$$

Из данной системы можно найти величину h . Значения $x_{\min}^{(m)}$, $x_{\min}^{(m+1)}$ координат двух соседних минимумов известны из результатов эксперимента. Зная величину h , необходимо решить систему:

$$\begin{cases} u_1 = u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (L_{x1} - L_{01}) \right] \\ u_2 = u_{01} + u_{02} - 2\sqrt{u_{01}u_{02}} \cos \left[\frac{2\pi f}{c} (L_{x2} - L_{02}) \right] \end{cases}, \\ L_x = \sqrt{L_0^2 + 4h^2}.$$

Данная система разрешается относительно неизвестных u_{01} и u_{02} .

$$u_{01} = \frac{(u_2 \cos \theta_1 - u_1 \cos \theta_2) \pm \sqrt{-u_1^2 \sin^2 \theta_2 - u_2^2 \sin^2 \theta_1 + 2u_1 u_2 (1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2)}}{2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}, \quad (1)$$

$$u_{02} = \frac{(u_2 \cos \theta_1 - u_1 \cos \theta_2) \mp \sqrt{-u_1^2 \sin^2 \theta_2 - u_2^2 \sin^2 \theta_1 + 2u_1 u_2 (1 - \cos \theta_1 \cos \theta_2)}}{2(\cos \theta_1 - \cos \theta_2)}, \quad (2)$$

$$\theta_1 = \frac{2\pi f}{c} (L_{x1} - L_{01}), \quad \theta_2 = \frac{2\pi f}{c} (L_{x2} - L_{02}).$$

Значения L_{01} , L_{02} и соответствующие им величины u_1 и u_2 напряжений на выходе приёмника известны из эксперимента. При подстановке экспериментальных данных (частоты, положения двух соседних минимумов и соответствующих им напряжений) в выражениях (1) и (2) получаются чисто действительные решения.

Рассмотрим в качестве примера задачу интерференции пяти лучей. Для определённости будем считать, что первый луч является прямым, то есть идёт по прямому пути от источника к приёмнику. Для нахождения фазы и амплитуды возникающих в результате интерференции волн колебаний используем метод векторных диаграмм.

Приведём соотношения, которые определяют зависимость напряжения на выходе приёмника от расстояния между источником и приёмником $u(L_1)$:

$$u = u_{123} + u_{45} + 2\sqrt{u_{123}u_{45}} \left[\cos(\varphi_{45}) \cos(\varphi_{123}) + \sin(\varphi_{45}) \sin(\varphi_{123}) \right],$$

$$\cos \varphi_{45} = \frac{A_{45}^x}{\sqrt{(A_{45}^x)^2 + (A_{45}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{45} = \frac{A_{45}^y}{\sqrt{(A_{45}^x)^2 + (A_{45}^y)^2}},$$

$$A_{45}^x = -\sqrt{u_4} \cos(kL_{x4}) - \sqrt{u_5} \cos(kL_{x5}), \quad A_{45}^y = -\sqrt{u_4} \sin(kL_{x4}) - \sqrt{u_5} \sin(kL_{x5}),$$

$$\cos \varphi_{123} = \frac{\sqrt{u_{12}} \cos(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \cos(kL_{x3})}{\sqrt{(A_{123}^x)^2 + (A_{123}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{123} = \frac{\sqrt{u_{12}} \sin(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \sin(kL_{x3})}{\sqrt{(A_{123}^x)^2 + (A_{123}^y)^2}},$$

$$A_{123}^x = \sqrt{u_{12}} \cos(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \cos(kL_{x3}), \quad A_{123}^y = \sqrt{u_{12}} \sin(\varphi_{12}) - \sqrt{u_3} \sin(kL_{x3}),$$

$$u_{123} = u_{12} + u_3 + 2\sqrt{u_{12}u_3} \left[\cos(\varphi_3) \cos(\varphi_{12}) + \sin(\varphi_3) \sin(\varphi_{12}) \right] =$$

$$= u_{12} + u_3 - 2\sqrt{u_{12}u_3} \left[\cos(kL_{x3}) \cos(\varphi_{12}) + \sin(kL_{x3}) \sin(\varphi_{12}) \right],$$

$$\cos \varphi_{12} = \frac{A_{12}^x}{\sqrt{(A_{12}^x)^2 + (A_{12}^y)^2}}, \quad \sin \varphi_{12} = \frac{A_{12}^y}{\sqrt{(A_{12}^x)^2 + (A_{12}^y)^2}},$$

$$A_{12}^x = \sqrt{u_1} \cos(kL_1) - \sqrt{u_2} \cos(kL_{x2}), \quad A_{12}^y = \sqrt{u_1} \sin(kL_1) - \sqrt{u_2} \sin(kL_{x2}),$$

$$u_{12} = u_1 + u_2 + 2\sqrt{u_1u_2} \cos[kL_{x2} + \pi - kL_1] = u_1 + u_2 - 2\sqrt{u_1u_2} \cos[k(L_{x2} - L_1)],$$

$$u_{45} = u_4 + u_5 + 2\sqrt{u_4u_5} \cos[k(L_{x5} - L_{x4})], \quad k = \frac{2\pi f}{c},$$

$$L_{xi} = \sqrt{L_1^2 + 4h_i^2}, \quad i = 2, 3, 4, 5.$$

Все записанные равенства представляют собой фактически одно выражение, которое задаёт зависимость $u(L_1)$. Данное выражение содержит девять неизвестных - $u_1, u_i, h_i, i=2,3,4,5$. Поэтому нужно записать его для девяти произвольных значений L_1 и соответствующих им напряжений u , которые должны быть получены экспериментально. В результате будет записана система из девяти нелинейных уравнений. Поскольку луч I полагается прямым (идущим по прямой линии от источника к приёмнику), величина u_1 представляет собой основную составляющую принятого сигнала. После того, как все девять неизвестных величин будут найдены, можно построить теоретическую кривую $u(L_1)$ распределения интенсивности вдоль оптической скамьи и сравнить полученный результат с экспериментальными данными.

В качестве начального приближения задавались те данные, которые были получены на предыдущем шаге решения задачи. Так, при решении задачи об интерференции трёх волн использовались данные, полученные при решении задачи о двух волнах. За исходную бралась задача с двумя волнами, которая решается аналитически.

Результаты расчета

Для решения нелинейных систем использовались возможности пакета Optimization Toolbox среды MATLAB. В частности, функция fsolve, которая находит корни (нули) системы нелинейных уравнений. В качестве примера обрабатывались экспериментальные данные, приведенные на рис. 4, б.

Результат решения для случая двух интерферирующих волн: $U_1 = 635,85$ мкВ, $U_2 = 8,08$ мкВ, $h_2 = 9,08$ м. Здесь и в дальнейшем напряжение U_1 соответствует основной волне. Под h_i пони-

мается расстояние до той поверхности, от которой отражается волна с номером i , интенсивности которой соответствует напряжение U_i . На рис. 6, а приведено сравнение экспериментального распределения интенсивности (показано точками) с результатами решения задачи об интерференции двух волн.

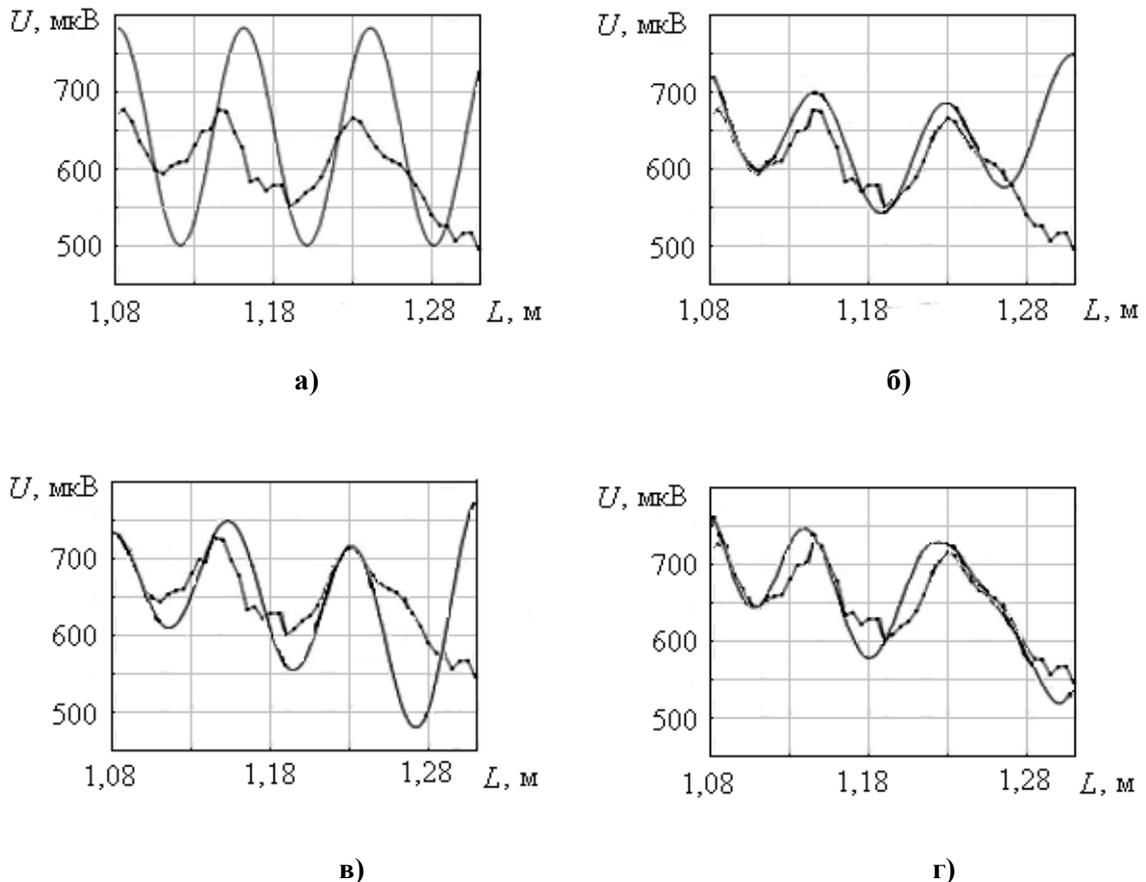


Рис. 6. Сравнение экспериментального распределения интенсивности (показано точками) с результатами решения задачи об интерференции волн:

а – интерференция двух волн; б – интерференция трех волн;
в – интерференция четырех волн; г – интерференция пяти волн

Для случая трёх интерферирующих волн: $U_1=641,20$ мкВ, $U_2=1,29$ мкВ, $U_3=0,56$ мкВ, $h_2=9,0$ м, $h_3=0,50$ м. Результаты решения приведены на рис. 6, б.

На рис. 6, в приведено сравнение экспериментального распределения интенсивности с результатами решения задачи об интерференции четырех волн. Для пяти интерферирующих волн: $U_1=611,98$ мкВ, $U_2=127,22$ мкВ, $U_3=0,19$ мкВ, $U_4=11,59$ мкВ, $U_5=84,15$ мкВ, $h_2=4,15$ м, $h_3=0,57$ м, $h_4=1,99$ м, $h_5=5,99$ м. Результаты решения приведены на рис. 6, г.

Анализ полученных результатов показывает, что по мере увеличения числа учитываемых волн величина интенсивности основной волны сходится к определённому значению, превышая интенсивности переотражённых волн. Рассчитанные в ходе решения задачи расстояния до отражающих поверхностей не превышают максимального расстояния между источником излучения и отражающими поверхностями в лаборатории. Наблюдается хорошее наложение экспериментальной и теоретической зависимостей интенсивности принимаемого сигнала от расстояния между антеннами. Таким образом, в рассмотренном примере основной вклад в формирование интерференционной картины вносят пять волн, а дальнейшее увеличение количества учитываемых переотражённых волн приводит к изменению интенсивности основной волны, не превышающему 1%.

Выводы

В работе описано исследование ЭМО в помещении лаборатории микроволновой электродинамики НГТУ, проведенное для обеспечения корректных антенных измерений в диапазоне частот 2–12 ГГц. Коэффициент безэховости в области приемной антенны составил -30 дБ на частоте 4 ГГц, благодаря применению поглощающего материала ECCOSORB VNR-4-NRL. Предложен алгоритм для выделения основной составляющей принятого сигнала, позволяющий более точно измерять основные параметры и характеристики антенны в лаборатории, не оборудованной специально для антенных измерений.

Библиографический список

1. E&C Anechoic Chambers / <http://www.ecantchoicchambers.com>.
2. **Motley, A. J.**, Radio coverage in buildings / A. J. Motley, J. M. Keenan // Bell System Technical Journal. 1990. V. 8. P. 19–24.
3. **Landstorfer, M.**, Dominant paths for the field strength prediction / M. Landstorfer, G. Wolfle // IEEE 48th International conference on vehicular technology. 1998. P. 552–556.
4. **Huschka, T.**, Ray tracing models for indoor environments and their computational complexity // IEEE 5th International symposium on personal, indoor and mobile radio communications. 1994. P. 486–490.
5. Fast Field Prediction Techniques for Indoor Communication Systems / C. Carciofi [at al.] // 2nd European personal and mobile communications conference. 1997. P. 37–42.
6. Finite-difference time-domain modeling of curved surfaces / T.G. Jurgens [at al.] // IEEE Trans. Antennas Propag. 1992. V. 40. P. 357.
7. **Белов, Ю. И.**, Экспериментальное исследование излучающих свойств открытого конца волновода прямоугольного сечения вблизи проводящих объектов / Ю.И. Белов, Е.Л. Варенцов, И.А.Илларионов // Антенны. 2009. Вып. 12(151). С. 18-27.
8. **Белов, Ю. И.**, Экспериментальное исследование отражений в большой радиобезэховой камере / Ю. И. Белов, А. В. Кашин // Антенны. 2006. N 5. С. 49-61.

*Дата поступления
в редакцию 04.08.2012*

V. Birukov, V. Grachev, M. Koltsov, G. Malyshev, A. Raevskii, V. Sherbakov

RESEARCH OF THE ELECTROMAGNETIC ENVIRONMENTS IN NNSTU MICROWAVE LABORATORY

Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev

The study considered different models for electromagnetic environments calculation and compared their computational complexity.

Ray tracing method has allowed to reveal sources of the reflected waves and partly weaken their influence.

It is possible, for example, to reach conditions for antenna measurements execution indoors usual educational laboratory. The study presented examples of measurements results for initial laboratory and quasi anecho one.

Moreover, the study offered the method of the mathematical processing of measurements results for reduction the reflected waves influence. The method is based on multirays interference analysis.

Key words: electromagnetic environments, anecho camera, anecho factor, interference.

УДК 621.039.5

А.М. Бахметьев, И.А. Былов, Е.А. Звягин, Л. Абрамов

**ПРОГРАММНО-МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ
ДЛЯ ВЕРОЯТНОСТНОГО АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЭНЕРГЕТИКИ
ПРИ РАЗРАБОТКЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ**

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Введение

Электроэнергия присутствует практически во всех сферах жизнедеятельности человека и непосредственно влияет на ее качество, поэтому аварии в сфере производства и передачи электроэнергии наносят непоправимый урон как экономической, так и социальной сферам нашей жизни.

Недавние аварии на объектах энергетики, особенно авария на Саяно-Шушенской ГЭС, остро поставили вопрос об оценке уровня безопасности действующих и проектируемых объектов энергетики, как основы для ее обеспечения и повышения в будущем.

Объекты энергетики, несомненно, представляют собой сложные социотехнические системы, для которых одним из наиболее эффективных методов исследования и, практически, единственным инструментом комплексной оценки безопасности, позволяющим получать качественные и количественные характеристики риска аварий, является вероятностный анализ безопасности. На заседании Совета генеральных и главных конструкторов, ведущих ученых и специалистов в области высокотехнологичных секторов экономики при Председателе Правительства, состоявшемся в декабре 2009 года была поставлена задача обязательного применения методов вероятностного анализа безопасности (ВАБ) при проектировании, эксплуатации и реконструкции объектов энергетики [1].

Вероятностный анализ безопасности получил широкое распространение для оценки безопасности объектов использования атомной энергии. Современные отечественные требования к анализу и обоснованию безопасности ядерных установок, руководства МАГАТЭ предусматривают использование детерминистских и вероятностных методов как необходимого условия полноты исследования безопасности на всех этапах жизненного цикла ядерной установки (ЯУ).

Вероятностный анализ безопасности опасных промышленных объектов представляет собой сложную комплексную задачу системного анализа, выполнение которой невозможно без разработки и использования соответствующего методического и программного обеспечения.

ОАО «ОКБМ Африкантов» обладает большим опытом выполнения вероятностных анализов безопасности ЯУ различного назначения. В настоящей статье представлено описание программно-методического обеспечения для ВАБ, разработанного специалистами предприятия и результаты его прикладного использования.

1. Методические положения по решению задач вероятностного анализа безопасности

При выполнении вероятностного анализа безопасности решаются следующие основные задачи (рис. 1):

- организация выполнения ВАБ (разработка план-графика работ и программы обеспечения качества);
- выбор и группирование инициирующих событий;
- моделирование аварийных последовательностей;
- анализ надёжности систем;

- сбор и анализ исходных данных;
- анализ надёжности персонала;
- количественный анализ;
- интерпретация и представление результатов.

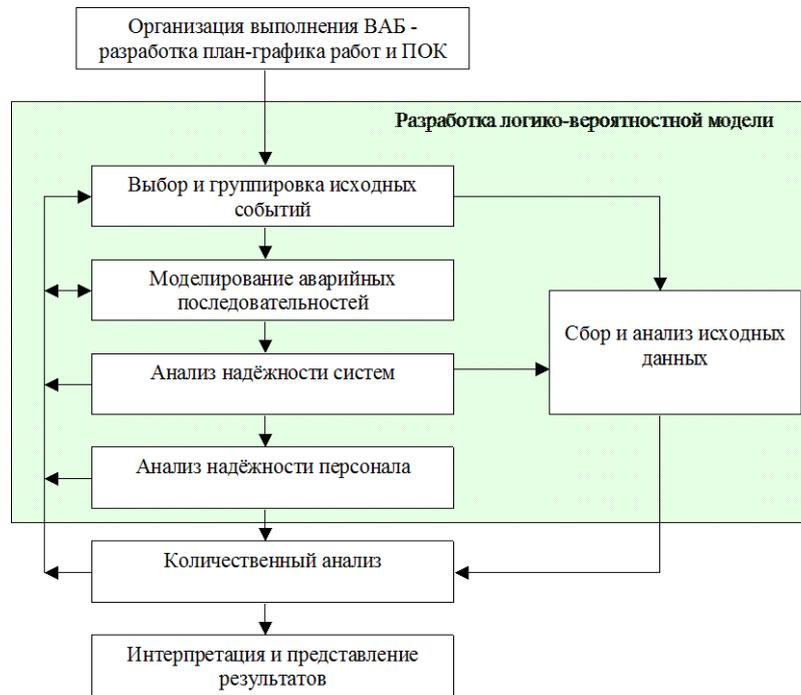


Рис. 1. Основные задачи вероятностного анализа безопасности

Рекомендации по выполнению задач ВАБ для энергоблоков атомных станций представлены в документах МАГАТЭ [2, 3], руководствах по безопасности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору [4, 5]. Однако, данные документы не содержат полного объема методических положений, позволяющих решать задачи вероятностного анализа безопасности.

В развитие требований нормативных документов, руководств МАГАТЭ специалистами ОАО «ОКБМ Африкантов» совместно с ФГУ РНЦ «Курчатовский институт», ФГУ «ГЦНИИ МО РФ» были разработаны руководства и методики по выполнению задач вероятностного анализа безопасности транспортных ядерных установок.

Комплект документов включает общее руководство по проведению вероятностного анализа, в котором определены назначение и область применения разработанных методик, общие положения по организации работ и выполнению задач ВАБ, методики выполнения задач ВАБ, руководство по сбору и анализу данных, структура и содержание банка данных по надёжности элементов оборудования и частотам исходных событий, необходимых для проведения вероятностного анализа безопасности.

Общее руководство дополняется требованиями к программе обеспечения качества при вероятностном анализе безопасности ЯУ. В руководстве сформулированы задачи по обеспечению качества выполняемых работ по трем основным направлениям:

- организация и управление разработкой ВАБ;
- выполнение собственно вероятностного анализа безопасности;
- разработка документации ВАБ.

В отдельном руководстве представлены требования по документированию результатов вероятностного анализа безопасности. Рассмотрены общие и специфические требования к заключительной документации проекта и общие требования к рабочей (детальной) документации по задачам.

Результатом решения задач ВАБ является формирование логико-вероятностной модели ЯУ. Логико-вероятностная модель ЯУ строится по результатам анализа (моделирования) аварийных последовательностей (построения деревьев событий), анализа (моделирования) систем и действий персонала и включает всю совокупность указанных моделей. Исследование сложной логико-вероятностной модели ЯУ невозможно без соответствующего программного обеспечения.

2. Программный комплекс для вероятностного анализа безопасности ЯУ

Основу программного обеспечения для анализа надежности и безопасности ЯУ составляет отечественный программный комплекс для выполнения вероятностного анализа безопасности CRISS. Программный комплекс (ПК) CRISS разрабатывается и совершенствуется в ОАО «ОКБМ Африкантов» в течение последних 20 лет и является первым отечественным программным продуктом, внедренным в практику вероятностного анализа безопасности ЯУ. ПК CRISS различных поколений, начиная с конца 80-х годов, широко использовались как для поддержки проектирования новых установок, так и сопровождения эксплуатации действующих ЯУ.

В настоящее время в эксплуатации находится программный комплекс IV поколения CRISS 4.0 [6]. Программа CRISS 4.0 аттестована Ростехнадзором в 2006 году и эксплуатируется в ОАО «ОКБМ Африкантов», ОАО «Головной институт «ВНИПИЭТ», на Белоярской АЭС, а также используется для поддержки учебного процесса в ИАТЭ (г. Обнинск), Нижегородском государственном техническом университете, Уральском государственном техническом университете (г. Екатеринбург).

Опыт эксплуатации программного средства CRISS 4.0 и его аттестации, нормативное расширение номенклатуры задач вероятностного анализа безопасности определили необходимость дальнейшего развития и совершенствования программы. На базе CRISS 4.0 в 2007–2009 годах разработан программный комплекс CRISS 5.1 [7], с использованием которого могут быть решены задачи полномасштабного вероятностного анализа безопасности различных уровней с использованием методов деревьев отказов и деревьев событий.

Программный комплекс CRISS 5.1 построен на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных с разграничением прав пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется Oracle Database 10g Express Edition.

Программа позволяет:

- накапливать в базах данных информацию о составе систем безопасности, исходных событиях аварий, учитываемых ошибках персонала и показателях надежности оборудования ЯУ, включая параметры моделей учета отказов по общей причине (ООП), частотах исходных событий, регламенте проверок работоспособности элементов систем безопасности;
- управлять реляционными базами данных;
- создавать и редактировать деревья отказов (ДО) с использованием логических операторов «И», «ИЛИ», «М из N»;
- создавать и редактировать деревья событий (ДС);
- проводить качественный и количественный анализ деревьев отказов и деревьев событий с автоматизированным учетом ООП;
- выполнять анализ значимости, чувствительности и неопределенности;
- редактировать минимальные сечения;
- выводить на печать и сохранять в стандартном формате Microsoft Word графические изображения ДО и ДС, результаты качественного и количественного анализа, анализа значимости, чувствительности и неопределенности;
- разрабатывать новые формы отчетов и редактировать имеющиеся;
- разграничивать права доступа пользователей для работы с программой;

- осуществлять оперативную верификацию программы после ее корректировки (модернизации);
- импортировать базы данных и логические модели (деревья отказов и деревья событий) из зарубежных программ (SAPHIRE и Risk Spectrum) для выполнения ВАБ.

В программном комплексе CRISS 5.1 был внедрен усовершенствованный алгоритм генерации минимальных сечений, позволяющий на несколько порядков повысить быстродействие программы, расширены функциональные возможности интерфейса программы. Логика и основные элементы интерфейса программы наследуются у программного средства CRISS 4.0; его внешний вид и функции доработаны с учетом рекомендаций и замечаний пользователей по опыту эксплуатации.

В 2009 году в ОАО «ОКБМ Африкантов» выполнена верификация программы CRISS 5.1. В настоящее время программный комплекс CRISS 5.1 проходит процедуру аттестации в Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору.

С использованием программного комплекса CRISS были выполнены вероятностный анализ безопасности 1 уровня энергоблока № 3 Белоярской АЭС [8] для получения лицензии на продление эксплуатации энергоблока, плавучего энергоблока с реакторной установкой КЛТ-40С [9] для получения лицензии на сооружение и ряду других ЯУ.

Наличие быстродействующей программы для вероятностного анализа позволяет формировать системы мониторинга риска ЯУ в процессе их эксплуатации.

3. Система мониторинга риска «РИМ»

Целью внедрения технологии мониторинга риска является осуществление непрерывной оценки и контроля изменения количественных показателей безопасности, которые могут происходить вследствие возникновения при эксплуатации энергоблока различных событий, приводящих к нарушению нормальной эксплуатации или к изменению конфигурации (структуры) систем безопасности вследствие вывода в плановый или неплановый ремонт их компонентов.

Разрабатываемая в ОАО «ОКБМ Африкантов» система мониторинга риска (СМР) «РИМ» обеспечивает поддержку решения следующих задач:

- оценка в режиме реального времени вероятностных показателей безопасности (вероятностей повреждения активной зоны и большого выброса радиоактивных веществ за пределы энергоблока) в различных состояниях установки и для различных типов исходных событий;
- оценка допустимого времени вывода в ремонт или на техническое обслуживание определенного набора оборудования, т.е. времени существования определенных конфигураций систем энергоблока;
- сравнение различных вариантов и оптимизация регламента технического обслуживания и ремонтов при условии выполнения ограничений на показатели безопасности (перераспределение работ между различными состояниями энергоблока, сокращение объема работ, уточнение допустимого времени вывода в ремонт при работе реактора на мощности и др.);
- определение наиболее критичных эксплуатационных процедур с точки зрения безопасности и подготовка рекомендаций по их совершенствованию;
- анализ и ранжирование по значимости событий «предшественников аварий» с целью принятия дополнительных мер защиты к наиболее критичным событиям;
- развитие широко распространяющегося в США и других странах подхода к принятию решений по объему эксплуатационных процедур на основе информации о риске;
- обоснование перед надзорными органами изменений в технических решениях и регламенте эксплуатации энергоблока;
- ранжирования по значимости для безопасности различного оборудования;
- обучение персонала АС в части значимости для безопасности различных систем и со-

бытий; планирования процедур технического обслуживания и ремонта без существенного снижения уровня безопасности;

- вспомогательные задачи по обеспечению хранения необходимых баз данных.

Логико-вероятностные модели энергоблока разрабатываются с помощью программного комплекса для выполнения ВАБ CRISS 5.1.

Система мониторинга риска «РИМ» построена на базе архитектуры «клиент-сервер» с использованием единой администрируемой базы данных с разграничением прав пользователей на внесение изменений. В качестве СУБД используется Oracle Database 10g Express Edition.

Предусмотрен обмен информацией между СМР «РИМ», информационно-поисковой системой «Источник-БН», программным комплексом для ВАБ CRISS 5.1 и системой планирования технического обслуживания и ремонтов Белоярской АЭС.

В ИПС «Источник-БН» накапливается актуальная информация по надежности элементов СВБ и интенсивностям исходных событий, что позволяет актуализировать соответствующую базу данных СМР. Связь с СПТОР обеспечивает систему мониторинга риска актуальной информацией о текущем состоянии оборудования и планируемых техническом обслуживании и ремонтах.

По результатам выполненных проработок и обсуждения с персоналом Белоярской АЭС в ОАО «ОКБМ Африкантов» в конце 2010 года будет разработана версия системы мониторинга риска «РИМ» для опытно-промышленной эксплуатации на энергоблоке № 3 Белоярской АЭС.

4. Система аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ

Для обеспечения надежности и безопасности ЯУ фундаментальное значение имеет реализация процесса систематического, всестороннего исследования (мониторинга) опыта эксплуатации ЯУ, причин и условий возникновения нарушений нормальной эксплуатации оборудования и установок, уточнения прогнозов и выработки мер по предотвращению нежелательных событий. В федеральных нормах и правилах, рекомендациях МАГАТЭ сформулированы требования по решению отмеченных задач.

Для выполнения этих требований для всех действующих ЯУ и ответственного оборудования разработки ОАО «ОКБМ Африкантов» на базе семейства ИПС «Источник» созданы системы аналитического мониторинга надежности и безопасности [10, 11].

Система аналитического мониторинга представляет собой постоянно действующую человеко-машинную систему, обеспечивающую:

- сбор информации в определенном формате;
- создание компьютерной базы данных в рамках ИПС;
- анализ полученных данных с оценкой показателей надежности, индикаторов безопасности, тенденций их изменения;
- выработку рекомендаций по результатам анализа, анализ эффективности внедряемых мероприятий;
- поддержку эксплуатирующей организации по вопросам обобщения информации, автоматизированной подготовки регулярных сообщений (отчетов по эксплуатации);

Система аналитического мониторинга надежности и безопасности энергоблока с реакторной установкой БН-600 разработана и внедрена ОКБМ совместно с Белоярской АЭС на базе ИПС «Источник-БН». В ИПС «Источник-БН» за период с начала эксплуатации энергоблока до текущего момента времени создана база данных по надежности оборудования реакторной установки БН-600, по готовности энергоблока БН-600, по нарушениям в работе БН-600, включая информацию по неплановым случаям отключений петель и срабатываниям аварийной защиты. Накопленные данные регулярно актуализируются и используются при подготовке ежегодных отчетов по авторскому сопровождению эксплуатации установки БН-600. Информационно-поисковая система, наряду с ОКБМ, установлена на Белоярской АЭС, между предприятиями формируется электронный обмен данными. В дальнейшем планируется интеграция работы ИПС "Источник-БН" с системой поддержки технического обслужива-

ния и ремонта Белоярской АЭС в части обеспечения информационного взаимодействия систем, предусматривается расширение номенклатуры накапливаемых данных с увеличением функциональных возможностей ИПС применительно к задачам, решаемым Белоярской АЭС.

Аналитический мониторинг надежности и безопасности ЯУ атомных судов осуществляется ОКБМ с использованием ИПС «Источник-С». ИПС «Источник-С» внедрена на судах ФГУП «Атомфлот». В ИПС «Источник-С» создана база данных по надежности оборудования ЯУ, фактическим моделям эксплуатации ЯУ, нарушениям в работе ЯУ и др. База данных охватывает период с начала эксплуатации установок, постоянно обновляется и актуализируется по результатам эксплуатации. ИПС «Источник-С» используется эксплуатирующей организацией для автоматизированного формирования сообщений о срабатывании аварийной защиты реактора, месячных донесений и годовых отчетов по эксплуатации ЯУ.

При формировании системы аналитического мониторинга надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 ОАО «ОКБМ Африкантов» была разработана ИПС система «Источник-Н». Для обеспечения функционирования системы аналитического мониторинга надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 был разработан, согласован с АЭС и утвержден ОАО «Концерн Росэнергоатом» «Регламент сбора, анализа и использования эксплуатационных данных по надежности насосного оборудования» и была проведена опытно-промышленная эксплуатация системы [12]. С учетом положительных результатов опытно-промышленной эксплуатации системы Регламент функционирования системы был введен в эксплуатацию приказом ОАО «Концерн Росэнергоатом».

Информационно-поисковая система «Источник-Н» разработана ОАО «ОКБМ Африкантов» на базе СУБД Oracle, построена по архитектуре «клиент-сервер» и поддерживает большое количество пользователей. В ИПС используется универсальный формат данных для сбора информации по опыту эксплуатации оборудования. Система обеспечивает структурированное хранение информации, систематизацию и обработку данных, имеет развитую систему поиска и обмена данными.

В ИПС «Источник-Н» создана база данных по надежности ГЦН АЭС с реакторами РБМК и ГЦН БН-600 за период с начала эксплуатации по настоящее время.

Заключение

1. Применение методов вероятностного анализа безопасности при проектировании, эксплуатации и реконструкции объектов энергетики требует разработки соответствующего программно-методического обеспечения.

2. ОАО «ОКБМ Африкантов» разработано, аттестовано и используется при проектировании и сопровождении эксплуатации ЯУ программно-методическое обеспечение для анализа надежности и безопасности.

3. Разработанное отечественное программно-методическое обеспечение способно решать задачи:

- полномасштабного вероятностного анализа безопасности различных уровней;
- мониторинга риска в процессе эксплуатации ЯУ;
- аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ и ответственного оборудования.

4. С использованием программно-методического обеспечения разработки ОАО «ОКБМ Африкантов»:

- разработаны вероятностные анализы безопасности 1-го уровня для реакторной установки БН-600 энергоблока № 3 Белоярской АЭС и плавучего энергоблока с реакторной установкой КЛТ-40С для поддержки процесса лицензирования;
- совместно с эксплуатационным персоналом Белоярской АЭС разработана и готовится к опытно-промышленной эксплуатации на станции система мониторинга риска;

- реализована и внедрена на Белоярской, Курской, Смоленской и Ленинградской АЭС система аналитического мониторинга надежности и безопасности ЯУ и ответственного оборудования.

Библиографический список

1. Протокол заседания Совета генеральных и главных конструкторов, ведущих ученых и специалистов в области высокотехнологичных секторов экономики при Председателе Правительства от 07 декабря 2009 г. № 4, г. Москва.
2. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessment of Nuclear Power Plants (level 1). Safety Series №50-P-4, IAEA, Vienna, 1992.
3. Procedures for Conducting Probabilistic Safety Assessments of Nuclear Power Plants (Level 2) Safety Series №.50-P-8. IAEA, Vienna, 1995.
4. Рекомендации по выполнению вероятностного анализа безопасности атомных станций уровня 1 для внутренних иницируемых событий. РБ-024-02 //Федеральный надзор России по ядерной и радиационной безопасности. -М., 2002.
5. Основные рекомендации к вероятностному анализу безопасности уровня 2 атомных станций с реакторами типа ВВЭР РБ-044-09 // Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору. -М., 2009.
6. **Бахметьев, А.М.** К вопросу о системном исследовании безопасности ядерных установок с использованием вероятностных методов / А.М. Бахметьев, И.А. Былов // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2006. №1.
7. Совершенствование программного обеспечения для проведения вероятностного анализа безопасности ядерных установок / А.М. Бахметьев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2008. №2.
8. Использование ВАБ при обосновании продления срока эксплуатации энергоблока с реактором БН-600 / П.С. Антипин [и др.] // Безопасность окружающей среды. 2009. № 2.
9. Вероятностный анализ безопасности плавучей АТЭС с водо-водяным реактором КЛТ-40С / А.М. Бахметьев [и др.] // Практика разработки ВАБ и использования их результатов для действующих и вновь проектируемых АЭС с ВВЭР: материалы научно-технич. конф. – М., 2002.
10. О системе мониторинга надежности и безопасности установки БН-600» / А.М. Бахметьев [и др.] // Изв. вузов. Ядерная энергетика. 2006. № 1.
11. Система аналитического мониторинга надежности насосного оборудования АЭС / А.М. Бахметьев [и др.] // Доклады на научной сессии НИЯУ МИФИ-2010. – Обнинск: ИАТЭ, 2010.
12. Регламент сбора, анализа и использования эксплуатационных данных по надежности насосного оборудования № НД/329 от 16 марта 2006 г. – М.: Росэнергоатом, 2006.

Дата поступления
в редакцию 04.08.2012

А. Бахметьев, И. Былов, Е. Звягин, Л. Абрамов

METHODS AND SOFTWARE FOR POWER UTILITIES PROBABILISTIC SAFETY ASSESSMENT UNDER DESIGN AND OPERATING

Joint stock company «OKBM Afrikantov »

Purpose: Safety analysis of power utilities as complex socio-technical systems is important and urgent problem. Probabilistic safety assessment (PSA) is one of the most effective tool for quantitative safety assessment of such utilities.

Design/methodology/approach: Probabilistic safety assessment methods are widely used for safety assessment of nuclear utilities. PSA development under design and operating of nuclear utilities is a regulatory requirement.

Findings: JSC «Африкантов ОКБМ» has an wide experience in PSA development for nuclear utilities of different purposes. OKBM specialists worked out software for all PSA tasks fulfillment during nuclear utilities design and operation.

Research limitations/implications: The present study provides description of CRISS PSA software, RIM risk monitor and reliability and safety monitoring system Istochnik.

Originality/value: Above-mentioned PSA software used for safety analysis of OKBM designed nuclear utilities and may be used for safety analysis of power utilities.

Key words: probabilistic safety assessment, software, reliability, safety

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.855

Г.К. Рябов¹, В.С. Леонтьева¹, Ю.В. Федосеев²

О МЕХАНИЗМЕ ПЕРЕДВИЖЕНИЯ БЕСКОЛЕСНОЙ ВИБРОПЛИТЫ

«Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева»¹,
ОАО «Завод им. Дегтярева»²

Рассмотрены уравнения движения виброплиты и определены условия передвижения плиты. Определены оптимальные соотношения сдвига фаз вращающегося груза и перемещения плиты в вертикальном и горизонтальном направлениях. Определены условия работы, обеспечивающие наибольшее ударное воздействие на опорную поверхность.

Ключевые слова: виброплита, расчетная схема, система уравнений, резонанс, колебания, ударный импульс, виброуплотнение, битум, ремонт, дорога.

Виброплита представляет собой компактное и мобильное устройство с двигателем внутреннего сгорания мощностью до 3–4 кВт, предназначенное для ремонта асфальтированных дорог с помощью трамбовки битума в образовавшихся небольших выбоинах. Упрощенная расчетная схема устройства представлена на рис. 1.

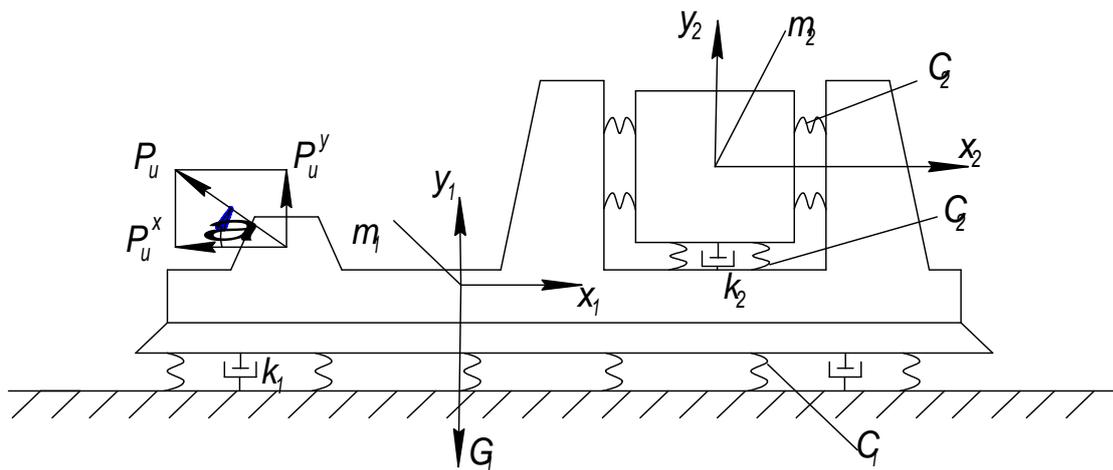


Рис. 1. Расчетная схема виброплиты:

m_1, m_2 – масса плиты и двигателя соответственно; c_1, c_2 – жесткости грунта и элементов соединения двигателя с плитой; k_1, k_2 – коэффициенты неупругого сопротивления; P_δ – центробежная сила вибратора; P_δ^x, P_δ^y – горизонтальная и вертикальная составляющие P_δ ; x_1, x_2 и y_1, y_2 – оси координат перемещения плиты и двигателя по горизонтали и вертикали; ω – угловая скорость вращения неуравновешенной массы вибратора

Система уравнений элементов плиты записывается в виде

$$\begin{aligned} m_1 \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_2(x_1 + x_2) + k_2(\dot{x}_1 + \dot{x}_2) &= m_\delta r_\delta \delta^2 \cos \omega t - (G_1 + G_2) f; \\ m_1 \frac{d^2 y_1}{dt^2} + c_1 y_1 - c_2(y_1 - y_2) + k_1 \dot{y}_1 - k_2(\dot{y}_1 - \dot{y}_2) &= m_\delta r_\delta \omega_2 \sin \omega t; \\ m_2 \frac{d^2 x_2}{dt^2} + c_2(x_2 - x_1) + k_2(\dot{x}_2 - \dot{x}_1) &= 0; \\ m_2 \frac{d^2 y_2}{dt^2} + c_2(y_2 - y_1) + k_2(\dot{y}_2 - \dot{y}_1) &= 0, \end{aligned} \quad (1)$$

где t – текущее время; m_δ и r_δ – масса центробежного груза и радиус смещения центра массы центробежного груза от оси вращения; f – коэффициент трения плиты по грунту; G_1 и G_2 – вес плиты и двигателя.

При составлении уравнений движения сделаны следующие предварительные допущения: не принимаются во внимание качательные движения элементов системы, а также нелинейность упругих элементов.

Расчетная схема и система уравнений движения плиты и двигателя рассмотрены в работе [4]. Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что вибрации двигателя негативно отражаются на эффективности работы виброплиты. В связи с вышеизложенным двигатель устанавливается на специальных резиновых упругих элементах с прогрессивной характеристикой и с максимально возможным демпфирующим действием.

Поэтому вибрация двигателя в рабочей резонансной зоне по сравнению с амплитудой колебаний плиты незначительная [3], и при предварительной оценке скорости передвижения виброплиты могут не учитываться.

Тогда система дифференциальных уравнений движения плиты принимает вид:

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c_2 x_1 + k_2 \dot{x}_1 = m_\delta r_\delta \omega^2 \cos \omega t - (G_1 + G_2) \cdot f; \\ m_1 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + (c_1 - c_2) \cdot y_1 + (k_1 - k_2) \dot{y}_1 = m_\delta \cdot r_\delta \cdot \omega^2 \sin \omega t; \end{cases} \quad (2)$$

Передвижение виброплиты обеспечивается при отклонении плиты в горизонтальном направлении в период, когда она оказывается в верхнем положении и не касается грунта. Тогда уравнения (2) принимают вид

$$\begin{cases} m_1 \cdot \frac{d^2 x_1}{dt^2} + c \cdot x_1 + k \cdot \dot{x}_1 = P_\delta^x; \\ m_1 \cdot \frac{d^2 y_1}{dt^2} + c \cdot y_1 + k \cdot \dot{y}_1 = P_\delta^y. \end{cases} \quad (3)$$

где \tilde{n} и k – эквивалентные жесткость и коэффициент демпфирования, определяемые экспериментально. Выражения (3) представляют собой самостоятельные независимые друг от друга дифференциальные уравнения, решения которых определяются функциями

$$\begin{aligned} x_1 &= x_{1\tilde{n}\delta} \beta_x \cos(\omega t - \theta_x); \\ y_1 &= y_{1\tilde{n}\delta} \beta_y \sin(\omega t - \theta_y). \end{aligned} \quad (4)$$

где $x_{1\tilde{n}\delta}$ и $y_{1\tilde{n}\delta}$ – горизонтальные и вертикальные отклонения от статического воздействия сил соответственно P_δ^x и P_δ^y .

Коэффициенты β_x и β_y , учитывающие периодичность действия указанных сил, определяются по формулам [1, 2]:

$$\beta_x = \frac{\left|1 - \frac{\omega^2}{p_x^2}\right|}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p_x^2}\right)^2 + \left(2\gamma_x \frac{\omega}{p_y}\right)^2}};$$

$$\beta_y = \frac{\left|1 - \frac{\omega^2}{p_y^2}\right|}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{p_y^2}\right)^2 + \left(2\gamma_x \frac{\omega}{p_y}\right)^2}}, \quad (5)$$

где γ_x и γ_y – коэффициенты демпфирования. В зависимости от характера перемещений, согласно опытным данным [1, 2] $\gamma_x = 0,3$ для горизонтальных перемещений и $\gamma_y = 0,1$ для вертикальных. Фазовые углы θ_x и θ_y рекомендуются определять по формулам:

$$\theta_x = \arctg \frac{2\gamma_y \omega / p_x}{1 - \omega^2 / p_x^2};$$

$$\theta_y = \arctg \frac{2\gamma_y \omega / p_y}{1 - \omega^2 / p_y^2}, \quad (6)$$

Согласно опытным данным, при принятых допущениях имеем равные частоты собственных колебаний $p_x = p_y = \sqrt{c/m_l}$.

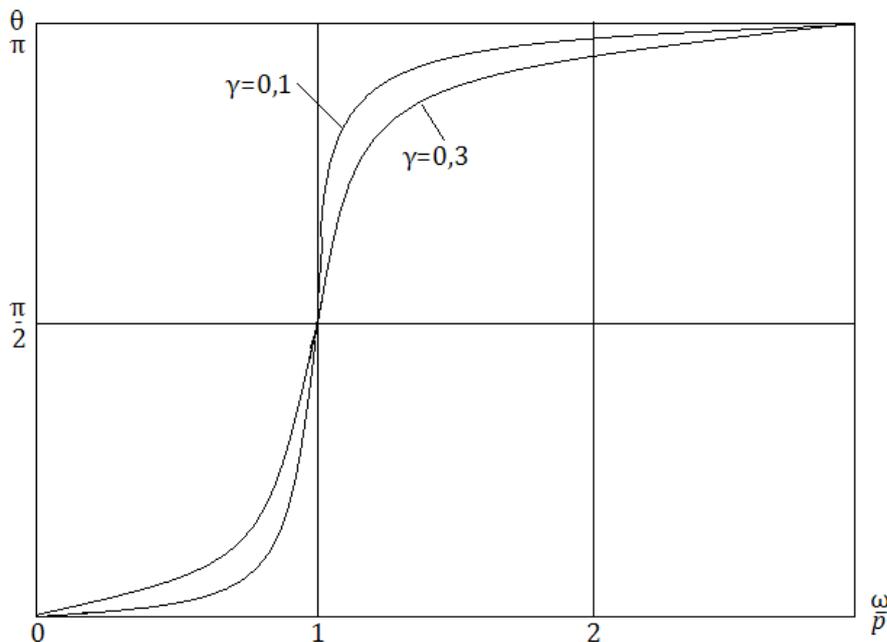


Рис. 2. Изменение фазового угла

При переходе через резонанс амплитуды колебаний плиты меняют свой знак на об-

ратный, что учитывается при построении графиков ее перемещений. Величина фазового угла θ зависит от отношения $\frac{\omega}{p}$ и величины γ . Так, в частности, на графике рис. 2 показано его изменение при $\gamma_x=0,3$ и $\gamma_y=0,1$ [3]. Отсюда видно, например, что при $\frac{\omega}{p}=1,0$, $\theta_x = \theta_y = \frac{\pi}{2}$.

Тогда графики перемещений плиты по осям x и y будут происходить по уравнениям

$$\begin{aligned} x_1 &= -x_{1a} \cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) = x_{1a} \sin \omega t; \\ y_1 &= -y_{1a} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) = y_{1a} \cos \omega t. \end{aligned} \tag{7}$$

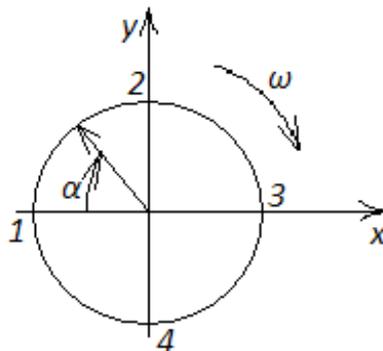
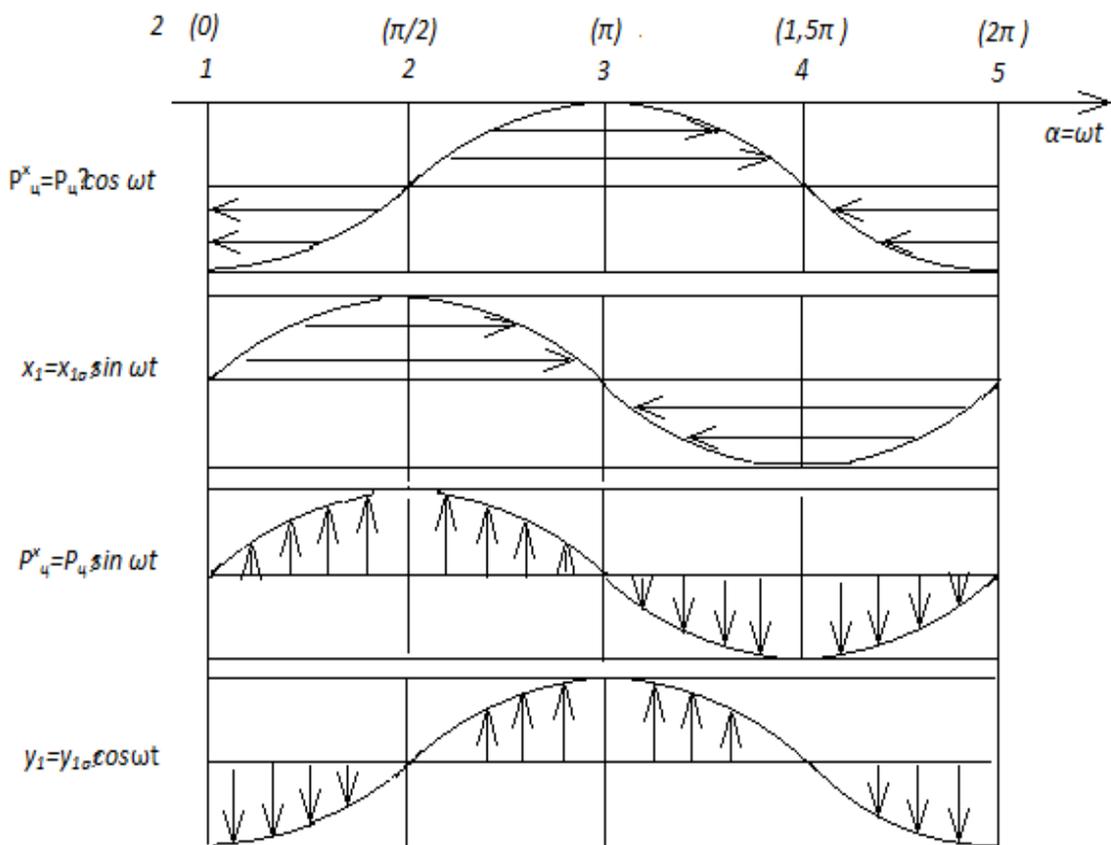


Рис. 3. Положение плиты в зависимости от углового положения центробежного груза

В то время как возмущающие силы будут действовать согласно выражениям

$$\begin{aligned} P_{\delta}^x &= P_{\delta} \cos \omega t; \\ P_{\delta}^y &= P_{\delta} \sin \omega t. \end{aligned} \quad (8)$$

На рис.3 представлены графики $P_x = f(\omega t); P_y = f(\omega t); x_l = f(\omega t); y_l = f(\omega t)$ при $\frac{\omega}{p} = 1,0$.

По приведенным графикам представляется возможным определить текущее положение плиты в зависимости от углового положения центробежного груза. Так, например, в период от 0 до $\frac{\pi}{\omega}$ на плиту действует центробежная сила P_{δ}^y вверх.

Через четверть периода от $\frac{\pi}{2\omega}$ до $\frac{\pi}{\omega}$ плита начинает подниматься вверх и занимает верхнее положение до момента $\frac{1,5\pi}{\omega}$.

В этот же период горизонтальная составляющая центробежной силы P_{δ}^x воздействует на плиту, и она через последующие четверть периода начинает перемещаться в горизонтальном направлении с момента $\frac{2\pi}{\omega}$ до $\frac{3\pi}{\omega}$.

Все остальное время плита находится в нижнем положении в прижатом к асфальту состоянии. Поэтому горизонтальная составляющая P_{δ}^x , направленная в обратную сторону, гасится силой трения плиты о грунт, и плита в обратном направлении не перемещается.

Вычислим ударный импульс, действующий на плиту в горизонтальном направлении за период от $\frac{\pi}{2\omega}$ до $\frac{1,5\pi}{\omega}$.

$$I_x = \int_{\frac{\pi}{2\omega}}^{\frac{3\pi}{2\omega}} P_{\delta}^x \cos \omega t = -2 \frac{P_{\delta}}{\omega}. \quad (9)$$

Этот импульс переходит в количество движения виброплиты, направленное по горизонтали

$$k_x = (m_1 + m_2) V_x. \quad (10)$$

Приравняв I_x величине k_x , получаем

$$(m_1 + m_2) V_x = 2 \frac{P_{\delta}}{\omega} 2m_y \kappa_y \omega \quad (11)$$

Отсюда получаем

$$V_x = \frac{2m_y \kappa_y \omega}{m_1 + m_2} \quad (12)$$

Так, в частности, при $\omega = 600 \frac{\text{рад}}{\text{с}}$; $m_y = 2 \text{ кг}$; $r_y = 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}$; $m_1 = m_2 = 47 \text{ кг}$ получаем

$$M = 2,75 \frac{\text{кг}}{\text{ч}}.$$

При известной амплитуде колебаний представляется возможным вычислить ускорения, получаемые плитой по формуле $a_x = x_{1a} \omega^2$. На рис. 4 приведена графическая зависи-

мость $x_{1a} = f(\omega)$. Кроме того, на (рис. 4, б) приведены в виде квадратных точек опытные данные по ускорениям плиты.

Из сравнения расчетных значений с опытными данными следует, что расчетные значения достаточно близко совпадают с опытными данными.

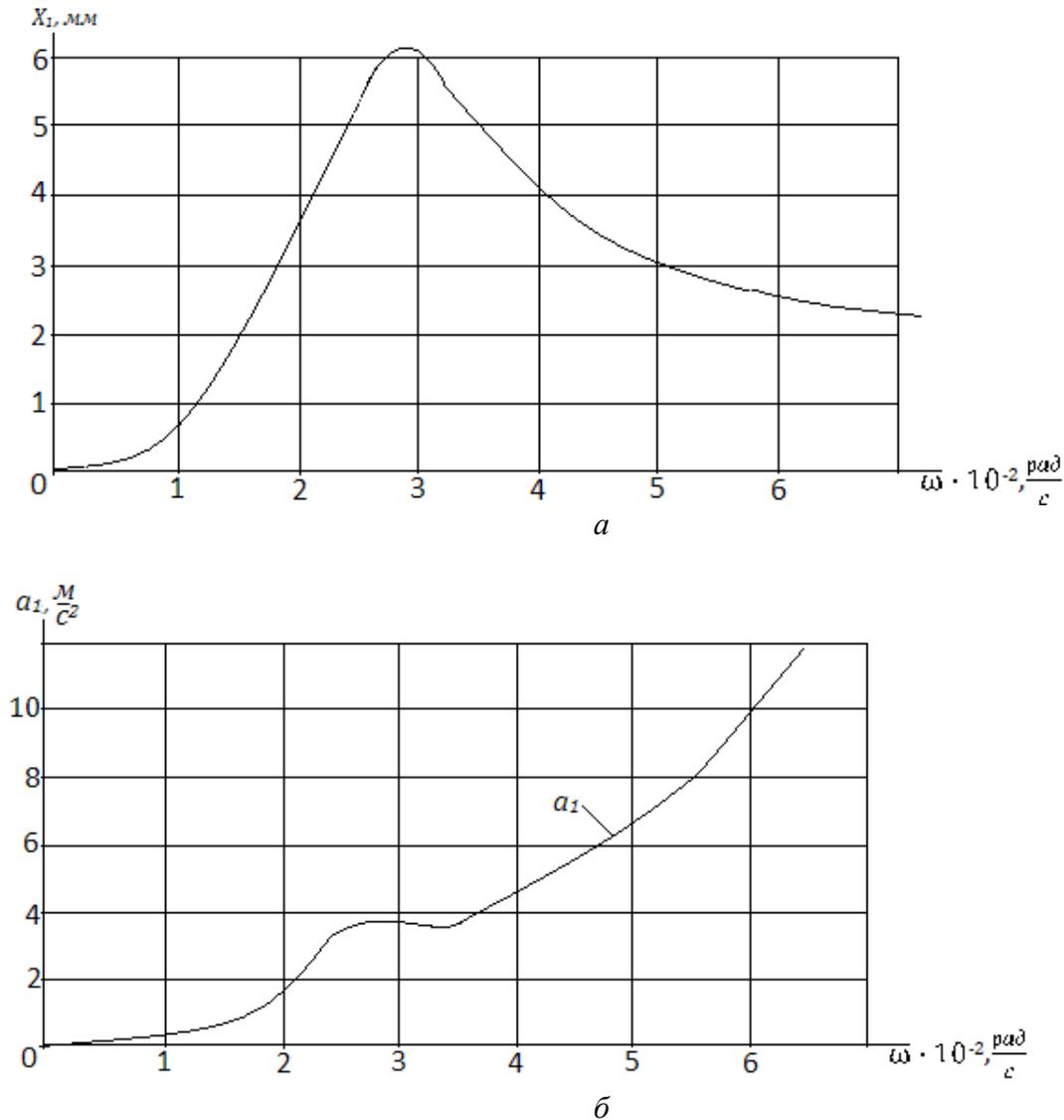


Рис.4. Зависимость перемещений и ускорений виброплиты:
а - перемещения, б - ускорения

Выводы

1. Из анализа механизма передвижения виброплиты следует, что основной причиной передвижения виброплиты является определенное соотношение по времени сдвига фаз вращения центробежного груза и перемещения плиты в вертикальном и горизонтальном направлениях.

2. Наиболее благоприятным условием для перемещения виброплиты является резонансный режим вблизи от резонанса, когда имеет место смещение фаз возмущающей силы относительно перемещения виброплиты, равное $\frac{\pi}{2}$.

3. Режим работы, указанный в п. 1 и 2, является также наиболее благоприятным для обеспечения наибольшей силы удара плиты по битуму, что следует из анализа фаз смещения вертикальной составляющей силы вибратора и вертикальных перемещений плиты.

Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Колебания в инженерном деле: [пер. с англ.] / С.П. Тимошенко, Д.Х. Янг, У. Уивер. – М.: Машиностроение, 1985. – 472 с.
2. Пановко, Я.Г. Основы прикладной теории колебаний и удара / Я.Г. Пановко. – М.: Машиностроение, 1976. – 320 с.
3. Рябов, Г.К. Проблемы вибрации в транспортной технике / Г.К. Рябов, О.Ю. Недро, Д.А. Бодров. – Ковров; КГТА, 2009. – 108 с.
4. Рябов, Г.К. Предварительная оценка параметров колебаний виброплиты / Г.К. Рябов, В.С. Леонтьева, В.П. Рогов / Камские чтения. – Набережные Челны: КГИЭА, 2011. С. 93–97.

Дата поступления
в редакцию 09.07.2012

G.K. Ryabov¹, V.S. Leontieva¹, Y.V. Fedoseev²

ABOUT THE MOVEMENT MECHANISM OF WHEELLESS VIBROPLATE

Kovrov state technological academy n.a. V.A. Degtaryov¹,
Public Corporation “The Plant n.a. V.A. Degtaryov”²

Purpose: The theoretical investigation of the wheelless vibroplate movement. Full-load conditions determination for securing the maximum striking force to the ground surface. Optimum proportion researching between the phase shifting of revolving charge and vibroplate in vertical and horizontal directions.

Design/methodology/approach: The study is based on theoretical analysis of differential equations that describes the process of wheelless vibroplate movement. The main constructive parameters of the vibroplate are included into mathematical model.

Findings: It is possible to apply the research results for preliminary estimation of the wheelless vibroplate movement mechanism and determination of optimum proportion between the phase shifting of the revolving and sliding motion.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of wheelless vibroplate theory.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of theoretical research of wheelless vibroplate movement mechanism that could have a good practical application during the vibroplate design stage.

Key words: vibroplate, design scheme, equations system, resonance, vibrations, impact momentum, bitumen, repairing, road.

УДК 629.113

Л.Н. Орлов¹, П.С. Рогов¹, А.С. Вашурин¹, А.В. Тумасов¹, Н.Ф. Феокистов²**ОЦЕНКА НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ КАРКАСА КУЗОВА АВТОБУСА
ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Инновационные технологии»²

Показаны результаты расчётной оценки пассивной безопасности автобусов. Выполнены расчётные исследования секций типового кузова автобуса в условиях опрокидывания. Представлены различные варианты моделирования условий нагружения. Показаны преимущества и недостатки различных вариантов представления моделей кузовов автобусов.

Ключевые слова: безопасность автобуса, конечно-элементный анализ, опрокидывание, несущая способность.

Проблема предотвращения дорожно-транспортных происшествий (ДТП) является весьма актуальной для каждой страны мирового сообщества. ДТП с участием автобусов характеризуются серьёзными травмами и ранениями, получаемыми пассажирами во время аварии. Хорошо известно, что опрокидывание – один из наиболее опасных видов ДТП, хотя происходят они не так часто, как лобовое или боковое столкновения. Тем не менее, в соответствии со статистикой, процент погибших и тяжело раненых людей больше в случаях опрокидывания, чем в других видах аварийных ситуаций. Повышение пассивной безопасности автобусов возможно и может быть достигнуто за счет применения прочных и безопасных кузовных конструкций.



Рис. 1. ДТП с опрокидыванием автобусов

Хорошо известно, что любая автобусная конструкция должна поглощать энергию удара и сохранять необходимое жизненное пространство для пассажиров в процессе опрокидывания. Все эти требования регламентированы Правилами ЕЭК ООН №66, которые допускают как экспериментальное исследование поведения конструкции автобуса, так и компьютерное моделирование условий опрокидывания. За последние 10 лет был приобретен достаточный опыт в испытании и расчете кузовных конструкций автобусов [1–4]. В то же время следует отметить несколько ключевых проблем, с которыми может столкнуться инженер в процессе проектирования кузова и оценки его пассивной безопасности:

- достоверное моделирование процесса опрокидывания автобуса с минимальными затратами времени для качественной оценки механизма разрушения кузова автобуса;

- анализ прочности и безопасности различных вариантов конструкций и выбор наиболее рационального варианта.

Эти проблемы могут быть решены способами конечно-элементного анализа и соответствующего программного обеспечения, которые дают возможность анализировать возможное поведение конструкции под нагрузкой на основе результатов расчетов моделей, имеющих различную степень проработки и детализации:

- упрощенная конечно-элементная модель кузова автобуса (преимущественно используются стержневые элементы), которая может быть использована на начальных этапах проектирования для проведения оценки влияния отдельных силовых элементов конструкции на ее пассивную безопасность;
- детальная (полная) конечно-элементная модель кузова автобуса (преимущественно используются тонкостенные оболочечные элементы), которая описывает все особенности конструкции и может быть использована для сертификации автобуса на соответствие требованиям Правил ЕЭК ООН №66.

Процесс опрокидывания может быть смоделирован различными способами:

- нагружение угла крыши неподвижной модели статической или динамической эквивалентной нагрузкой, создаваемой жесткой плитой, совершающей поступательное движение;
- динамическое нагружение угла крыши неподвижной модели жесткой плитой, совершающей вращательное движение;
- имитация опрокидывания модели под действием силы тяжести.

Очевидно, что использование различных типов моделей и вариантов имитации опрокидывания может привести к различным результатам, но все они могут быть использованы инженерами на различных стадиях проектирования, доводки и сертификации автобуса. В данной работе показаны преимущества и недостатки различных методов моделирования, которые могут быть использованы для расчётной оценки пассивной безопасности автобусов.

Объектами расчетных исследований были типовые конструкции секций кузова автобуса (рис. 2, 3). Каркас каждой секции состоит из стальных труб, которые имеют прямоугольное тонкостенное сечение. Были разработаны два варианта конечно-элементных моделей (КЭМ) секции: упрощённые КЭМ (используются только стержневые элементы) и подробные (используются оболочечные элементы). Для каждой модели назначались одинаковые механические характеристики стали с упругопластической кривой деформация-напряжение.

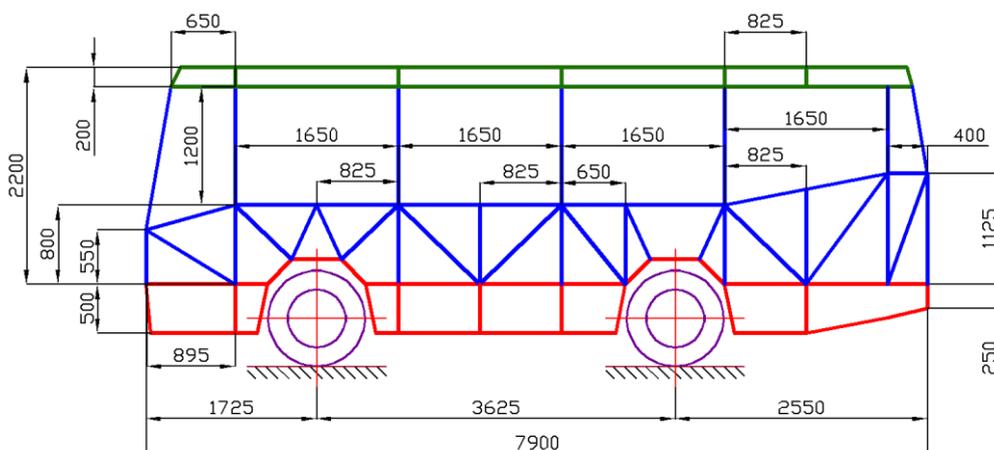


Рис. 2. Типовая схема каркаса автобуса

Условия нагружения для рассматриваемых моделей были идентичными: КЭМ нагружались параллельно движущейся жёсткой плитой. Каждая КЭМ была закреплена у основания в нескольких зонах. Угол α между жёсткой плитой и секцией был рассчитан в соответ-

ствии с методикой опрокидывания автобусов по требованиям Правилами ЕЭК ООН №66 и соответствует углу контакта кузова с жёсткой поверхностью при опрокидывании с уступа высотой 800 мм. Движение жёсткой плиты было определено зависимостью перемещения $S(t)$ (рис. 4), таким образом, что скорость плиты монотонно возрастает с постоянным ускорением. Данный способ нагружения не позволяет достоверно симитировать процесс опрокидывания, но такие условия можно считать приемлемыми для сравнительного анализа результатов.

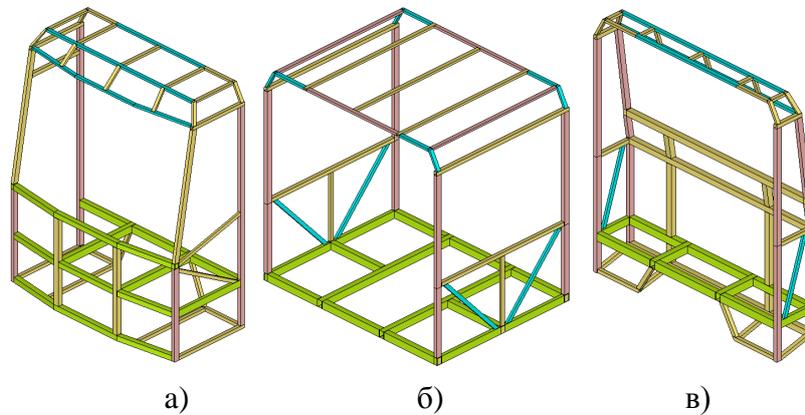


Рис. 3. Секции кузова автобуса:
а – передняя; б – средняя; в – задняя

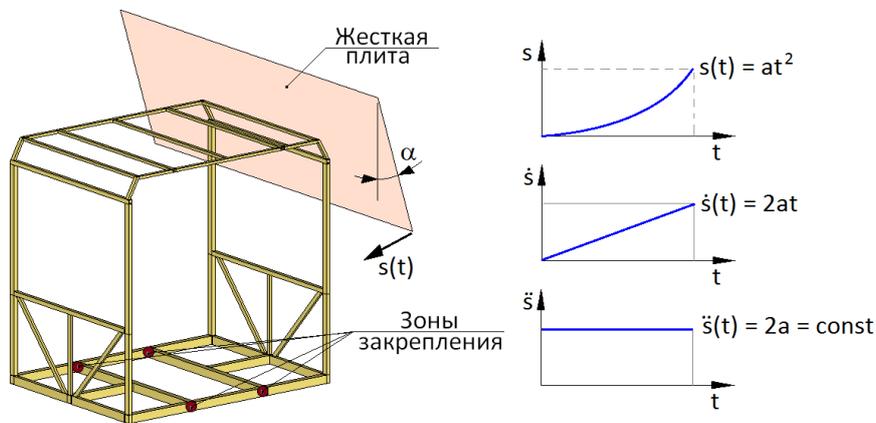


Рис. 4. Схема нагружения расчетной модели

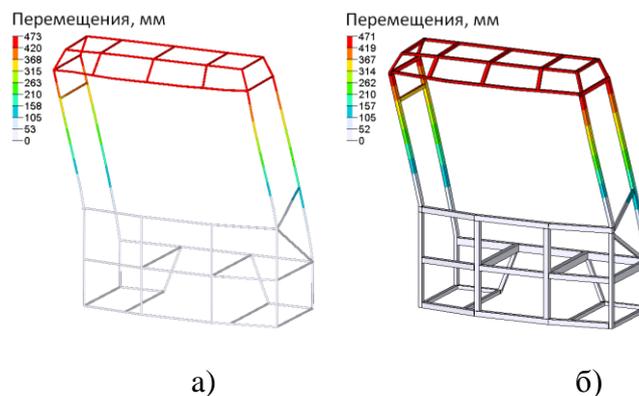


Рис. 5. Перемещения упрощенной (а) и подробной (б) КЭМ

Очевидно, что суммарные перемещения для упрощённой и подробной моделей оказываются схожими (рис. 5). Это можно объяснить характером приложенной нагрузки. В то же время усилия в зоне контакта плиты с элементами КЭМ для различных вариантов моделей отличаются (рис. 6). Из графиков видно, что упрощённая (стержневая) КЭМ имеет более высокую несущую способность (на 10–30%), чем аналогичная подробная КЭМ, состоящая из оболочечных элементов.

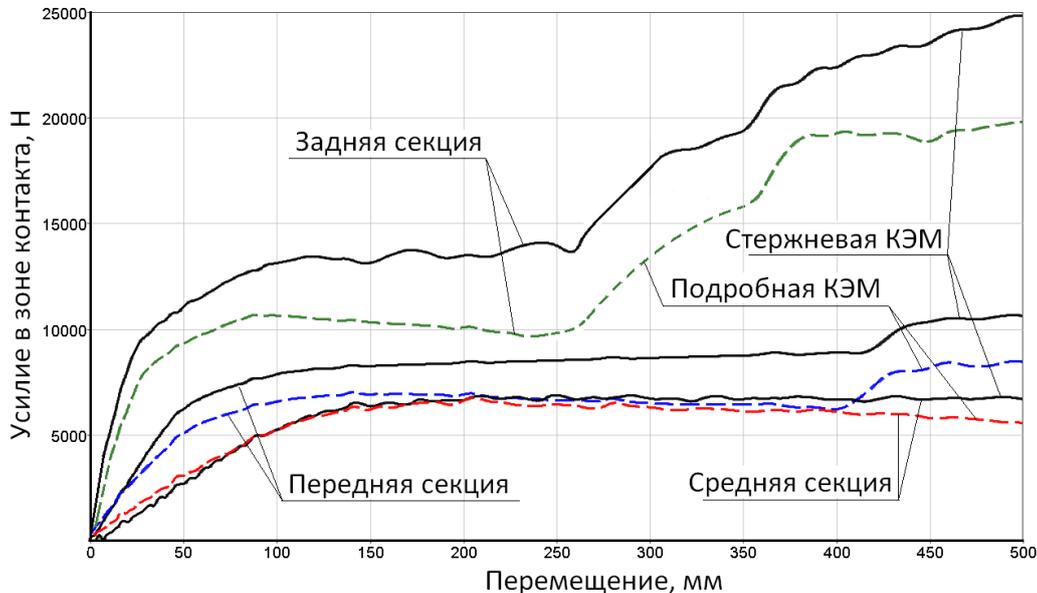


Рис. 6. Графики изменения усилия в зоне контакта в зависимости от перемещения жёсткой плиты

Разница в несущей способности различных КЭМ объясняется особенностью деформирования различных типов элементов. Стержневые элементы не позволяют имитировать пластические деформации тонкостенных стенок поперечных сечений, которые отчетливо видны при расчете подробной КЭМ (рис. 7).

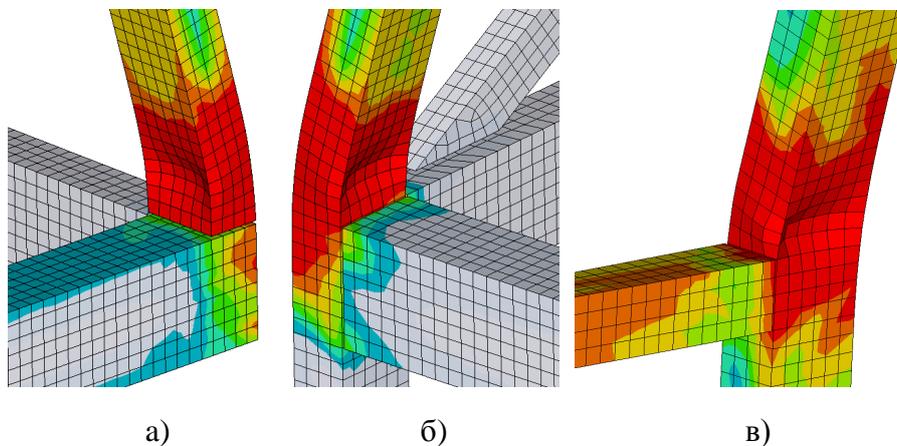


Рис. 7. Локальные пластические деформации фрагментов подробной модели:
а – передняя секция; б – средняя; в – задняя секция

Особый интерес представляет сравнительный анализ поведения упрощённой и подробной конечно-элементных моделей всего кузова автобуса в условиях, имитирующих опрокидывание. На рис. 8 показана схема опрокидывания автобуса в соответствии с Правилами ЕЭК ООН №66. Центр масс автобуса S_{bus} перед контактом с жёсткой плитой совершает вращательное движение. Предположив, что центр масс автобуса будет двигаться по круговой

траектории радиуса R как до удара, так и после него, была предложена эквивалентная схема нагружения, имитирующая опрокидывание автобуса. В этом случае модель каркаса автобуса деформируется под действием энергии жесткой стенки, совершающей вращательное движение. В этом случае центр масс нагружающей плиты C_{RW} должен повторять траекторию дуги, радиусом R . Необходимое положение C_{RW} может быть достигнуто изменением геометрических и физических свойств жесткой плиты, в частности за счет варьирования массы участков DE и EF .

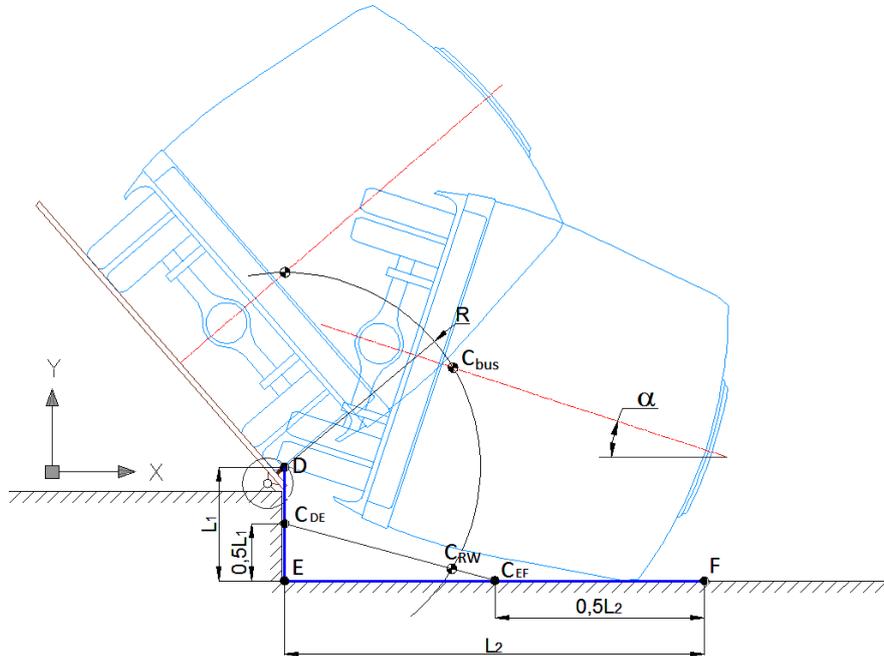


Рис. 8. Схема опрокидывания автобуса
(в соответствии с требованиями Правил ЕЭК ООН №66)

На основе данных по моменту инерции жесткой плиты и энергии удара при опрокидывании возможно оценить начальное значение угловой скорости ω жесткой плиты (рис. 9, а). В этом случае каркас автобуса должен быть закреплён в основании, а жесткая плита в центре вращения. Результаты расчета по такому упрощенному варианту моделирования условий опрокидывания показаны на рис. 9, б.

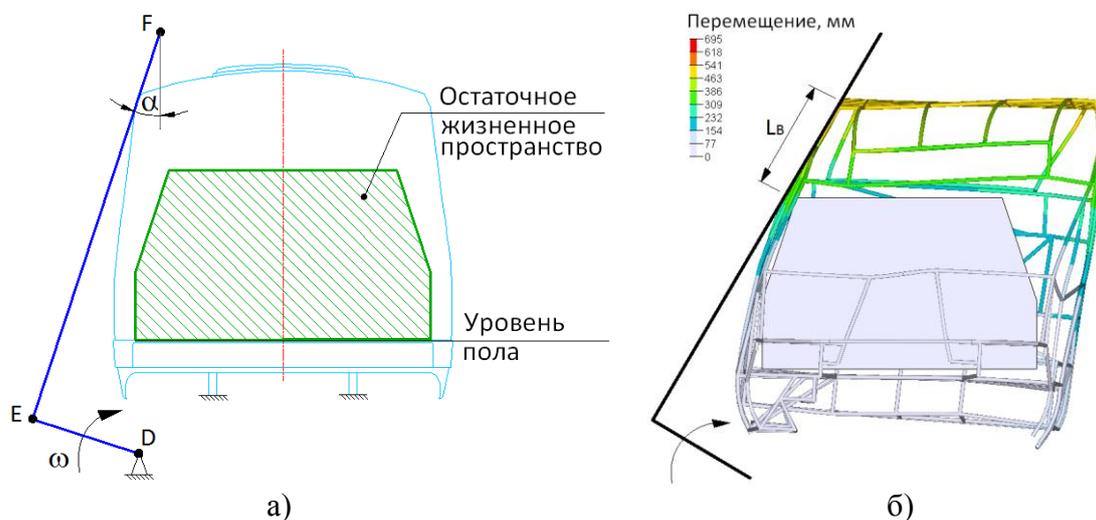


Рис. 9. Эквивалентная схема динамического нагружения автобуса:
а - имитация вращательного движения кузова при опрокидывании автобуса;

б – результаты конечно-элементного анализа

На рис. 10 показаны результаты моделирования, полученные для двух вариантов расчета, в которых кузов автобуса был представлен стержневыми элементами (упрощенная модель) и оболочечными элементами (подробная модель). Анализ результатов подтверждает выводы: упрощенная модель имеет более высокую несущую способность (на 10–30%) по сравнению с аналогичной подробной моделью.

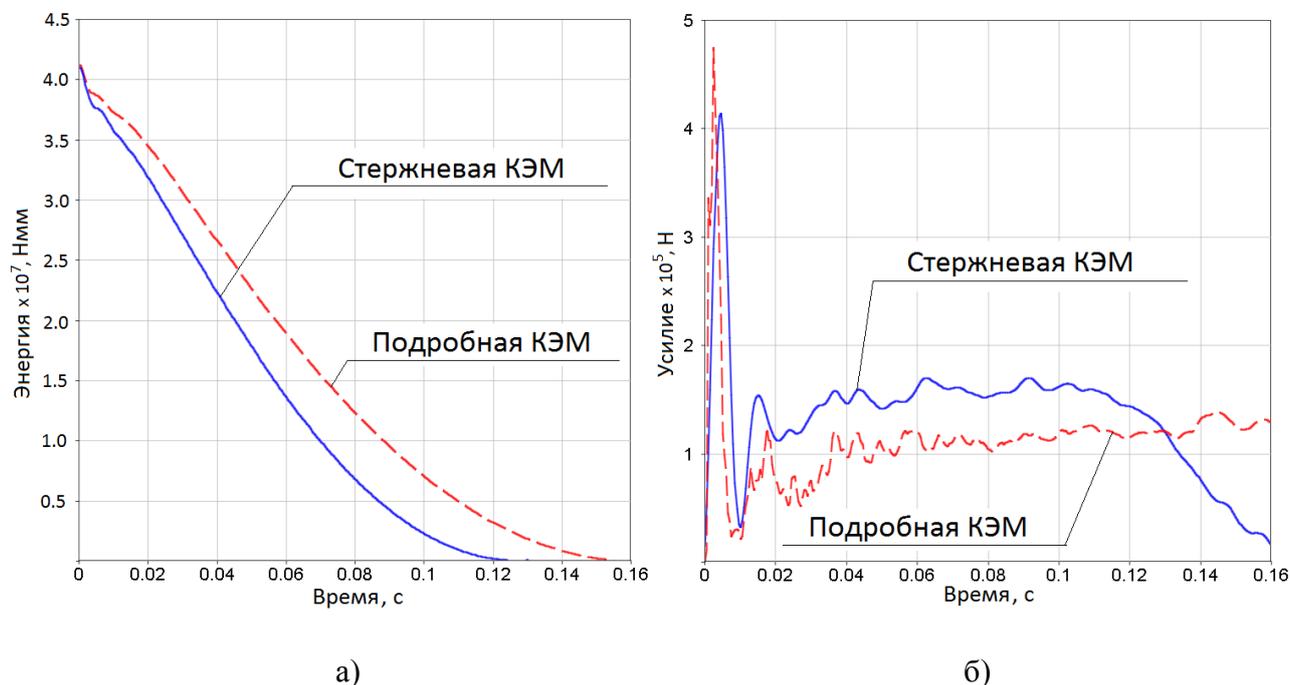


Рис. 10. Графики изменения энергии удара и разрушающей нагрузки:
а – график изменения энергии удара; *б* – диаграмма контактной силы

По результатам расчетов можно сделать вывод о том, что упрощенную конечно-элементную модель рационально использовать на начальной стадии проектирования, когда инженер должен анализировать несколько вариантов конструкции и оценивать влияние различных конструктивных изменений на несущую способность автобуса. Это позволяет минимизировать временные затраты на разработку и расчет модели. Тем не менее, завышенная несущая способность стержневых моделей не позволяет использовать их для окончательной оценки безопасности автобуса, поэтому результаты моделирования, полученные с использованием упрощенной конечно-элементной модели, должны быть уточнены в дальнейшем при расчете подробной модели.

Библиографический список

1. **Ganesh, B.** Rollover Strength Prediction of Bus Structure Using LS-DYNA 3D / B. Ganesh, Gadekar, S. Kshirsagar, C. Anilkumar // Altair CAE Users Conference, Aug. 2005, Taj Westend, Bangalore.
2. **Elitok, K.** An Investigation on the Rollover Crashworthiness of an Intercity Coach, Influence of Seat Structure and Passenger Weight / K. Elitok, M A. Guler, B. Byram // 9th International LS-DYNA User Conference. USA. Dearborn, Michigan. 2006.
3. **Csiszár, A.** Rollover Safety Increase and Adequacy for Buses due to Laboratory Tests and Simulations / A. Csiszár, S. Vincze-Pap // Automobile for the Future: 11th European Automotive Congress. – Budapest: Eötvös University Congress Centre, 2007.

4. **Hashemi, S.M.R.** Strength of Super-Structure UN-ECE R66 Rollover Approval of Coaches based on Thin-Walled Framework Structures / S.M.R. Hashemi, A.C. Walton, K. Kayvantash // Int. J. Vehicle Structures & Systems, 2009. №1(4). P. 78-84.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

L.N. Orlov¹, P.S. Rogov¹, A.S. Vashurin¹, A.V. Tumasov¹, N.F. Feokistov²

**THE ESTIMATION OF BUS STRUCTURE BEARING CAPACITY
ON BASIS OF SIMULATION RESULTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Ltd. "Innovative Technology"²

Purpose: The developing of computational methods of estimating of bus bearing capacity at the different stages of the design process.

Design/methodology/approach: The computational research based on finite element method with using of different types of simulation models: simplified that is based on beam type elements and complicated that is based on shell type elements.

Findings: It is possible to apply the research results for estimation of passive safety of buses structures in rollover conditions.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of bus design and estimation of bus passive safety.

Originality/value: The main peculiarity of the study is executing of comparative analysis between simulation results that were received for simplified and detailed models.

Key words: bus passive safety, finite element simulation, rollover, bearing capacity.

УДК 629.113

А.М. Грошев¹, С.Ю. Костин¹, Ю.П. Трусов¹, Г.А. Коникина¹, П.В. Середа²**ИССЛЕДОВАНИЕ ТОРМОЗНЫХ СВОЙСТВ АВТОБУСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ И ДАННЫХ ДОРОЖНЫХ ИСПЫТАНИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Группа ГАЗ²

Приведены результаты исследований тормозных свойств автобуса ПАЗ. Описаны подходы, использованные при проведении дорожных испытаний и компьютерного моделирования, имитирующего условия реальных испытаний. Представлен сравнительный анализ результатов, полученных при моделировании процесса торможения автобуса и в условиях дорожных испытаний.

Ключевые слова: активная безопасность, моделирование, дорожные испытания, тормозной путь, замедление.

Проблеме повышения активной безопасности транспортных средств всегда уделяется большое внимание. В последнее время наиболее актуальным становится вопрос применения и совершенствования интеллектуальных систем помощи водителю, позволяющих минимизировать последствия ошибок, допускаемых человеком в процессе управления транспортным средством. Наибольшее распространение и практическое внедрение получили системы электронного контроля устойчивости (ЭКУ), снижающие вероятность возникновения заносов и опрокидываний [1]. Проект новой редакции правил ЕЭК ООН №13 (Пересмотр 6, Поправка 1) предусматривает регламентацию особых требований к транспортным средствам, оснащенным функцией обеспечения устойчивости транспортного средства (добавление 12, прил. 21). В соответствии с текстом документа, эффективность функции контроля траектории движения и/или устойчивости к опрокидыванию механических транспортных средств и прицепов категорий М, N и O может быть определена как в процессе дорожных испытаний, так и при помощи компьютерного моделирования. При этом аттестация применяемых средств моделирования должна быть проведена на основе сопоставлений результатов расчетов с данными реальных испытаний транспортного средства.

В настоящее время существует широкий спектр компьютерных программ, позволяющих имитировать различные условия движения автомобиля и воспроизводить алгоритмы работы интеллектуальных систем активной безопасности. Одной из таких программ является *SDK-Simulation*, используемая в практике научно-исследовательского центра компании Кнорр-Бремзе (Будапешт, Венгрия). Данная программа обладает значительным функционалом и обеспечивает высокоточное моделирование условий движения различных категорий транспортных средств [2].

В системах ЭКУ используется принцип автоматического управления тяговыми и тормозными моментами на колесах, таким образом, эффективность системы во многом зависит от эффективности тормозной системы. С точки зрения моделирования движения автомобиля и имитации работы системы ЭКУ важно в первую очередь обеспечить достоверное моделирование любых процессов торможения, в том числе и без воздействия интеллектуальной системы. Таким образом, обоснование возможности применения тех или иных средств моделирования для оценки эффективности ЭКУ должно включать в себя сопоставление различных вариантов расчетов и экспериментов, имитирующих возможные дорожные ситуации: торможение, смена полосы движения, вход в поворот и др.

В данной статье представлены результаты сравнительного анализа результатов моделирования торможения автобуса, полученных с использованием программы *SDK-Simulation*, с данными дорожных испытаний. Исследования выполнены сотрудниками Автомобильного института НГТУ при поддержке Испытательной лаборатории НГТУ и Группы ГАЗ. Объем

том исследования являлся автобус ПАЗ-4234-05 (рис. 1). Дорожные испытания проводились на автополигоне ГАЗ.



Рис. 1. Автобус ПАЗ-4234-05

Для определения параметров движения автобуса использовалась современная измерительная система *RaceLogic VB20SL3 20Hz GPS Data Logger With Slip, Pitch and Roll Angle*. Принцип работы системы основан на использовании *GPS* технологий. На крышу автомобиля устанавливаются магнитные антенны (рис. 2), которые обеспечивают связь со спутником и позволяют зафиксировать скорость транспортного средства, ускорение (по двум осям), траекторию движения, угол крена и угловую скорость поворота (рис. 3).



а)

б)

Рис. 2. Автобус ПАЗ-4234-05:

а – блок сбора данных системы *RaceLogic*; б – схема установки антенн на крыше автобуса

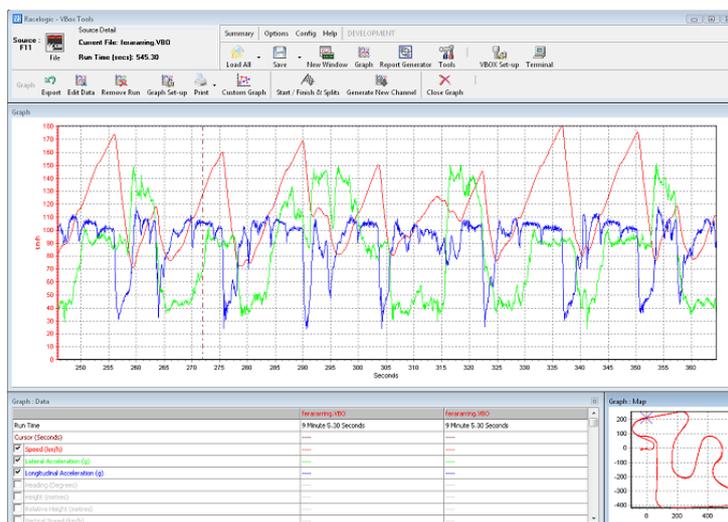


Рис. 3. Интерфейс программного обеспечения *RaceLogic*

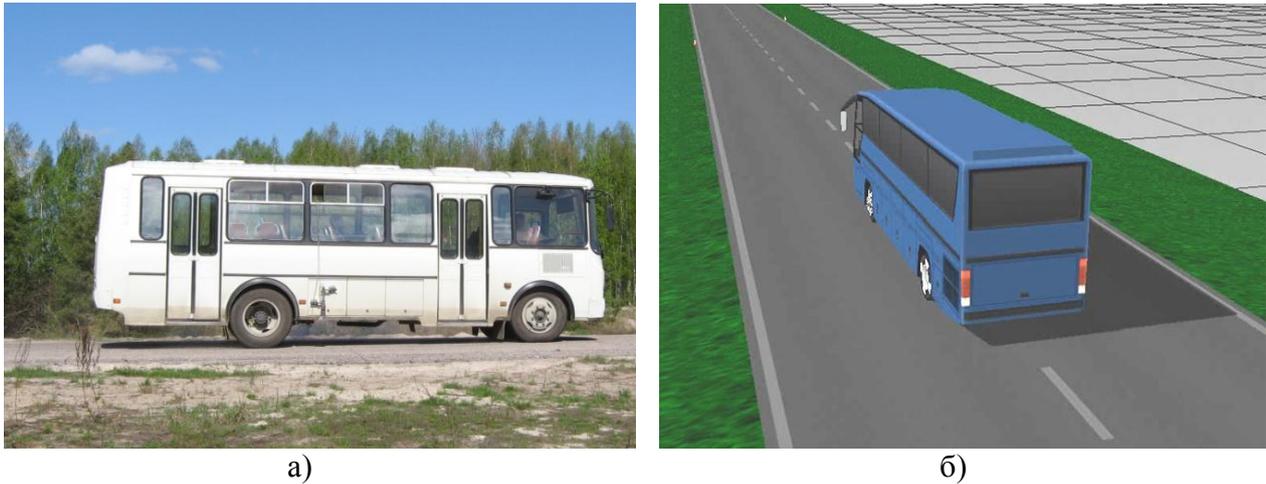


Рис. 4. Исследование процесса торможения:
а – дорожные испытания; *б* – компьютерное моделирование

На рис. 4 показаны фрагменты экспериментальных и расчетных исследований. На рис. 5 – рис. 7 показаны графики изменения продольного замедления автобуса при торможении. Сплошными линиями показаны данные, зафиксированные в ходе натурных испытаний, пунктирными – данные компьютерного моделирования. В табл. 1 приведены значения тормозного пути для разных начальных скоростей торможения.

Таблица 1

Значения тормозного пути для различных начальных скоростей торможения

Начальная скорость торможения V_0 , км/ч	Тормозной путь, м		Расхождение, %
	испытания	моделирование	
40	13,77	12,12	11,96
50	18,65	18,01	3,43
60	27,93	25,25	9,59



Рис. 5. Графики изменения замедления при торможении со скорости 40 км/ч



Рис. 6. Графики изменения замедления при торможении со скорости 50 км/ч

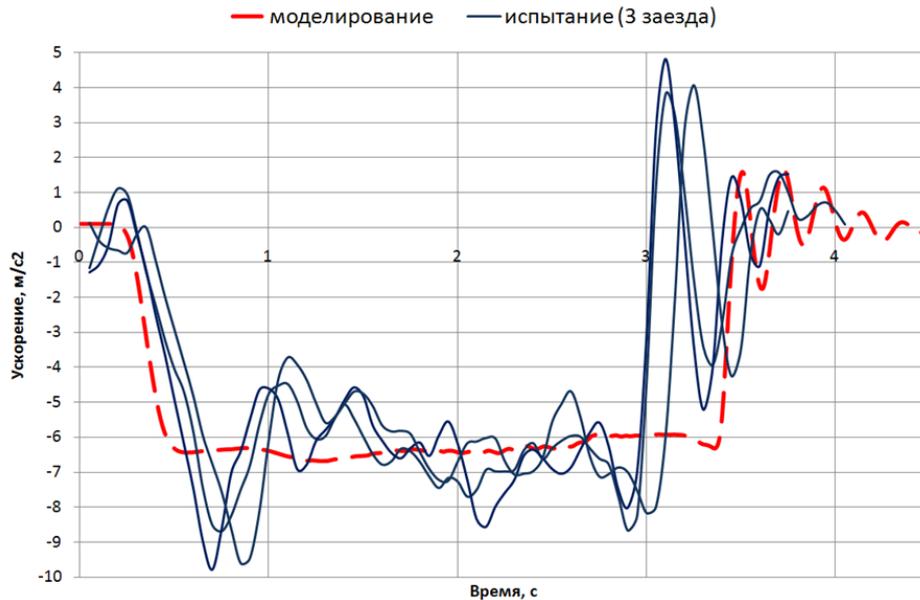


Рис. 7. Графики изменения замедления при торможении со скорости 60 км/ч

Анализ данных показывает, что результаты экспериментальных исследований и компьютерного моделирования имеют хорошую сходимость. Расхождение по значениям тормозного пути не превышает 3–12%. Кривые изменения замедления в процессе торможения, полученные при расчете, полностью повторяют кривые, построенные по данным дорожных испытаний. Тем не менее, следует отметить, что виртуальная модель имеет лучшие показатели тормозных свойств, чем реальное транспортное средство. Это объясняется тем, что в модель заложен идеальный алгоритм работы тормозной системы и электронного блока антиблокировочной системы (АБС). Реальная тормозная система и ее компоненты имеют целый ряд особенностей, которые достаточно сложно воспроизвести в компьютерной модели. В этой связи целесообразным является расширение возможностей компьютерного моделирования путем перехода к комплексному имитационному моделированию, в котором можно было бы симитировать не только условия движения транспортного средства, но и реальные процессы, происходящие в автокомпонентах. Наиболее перспективным является использо-

вание программно-аппаратного комплекса (ПАК), включающего в себя: реальные компоненты автомобиля, специальный измерительный комплекс, современное программное обеспечение. Такой подход позволяет моделировать поведение транспортных средств с учетом особенностей работы реальных агрегатов и блоков управления [3].

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

- разработана имитационная модель автобуса ПАЗ 4234-05 в программном комплексе *SDK-Simulation*, учитывающая основные параметры конструкции транспортного средства;
- сравнение результатов компьютерного моделирования и дорожных испытаний показало хорошую сходимость. Расхождение значений тормозного пути при разных начальных скоростях торможения не превышает 3–12%;
- разработанная имитационная модель автобуса и результаты исследований могут быть использованы при разработке методики оценки свойств активной безопасности транспортных средств по результатам имитационного моделирования, которая имеет важное практическое значение на этапах проектирования и доводки автомобилей.
- для повышения точности имитационного моделирования необходимо использование программно-аппаратного комплекса, обеспечивающего физическое моделирование работы тормозной системы транспортного средства.

Библиографический список

5. **Тумасов, А.В.** Применение электронных систем курсовой устойчивости на коммерческом транспорте российского производства / А.В. Тумасов, А.М. Грошев, Л. Палкович // Журнал ААИ. 2010. №1. С. 34–37.
6. **Тумасов, А.В.** Исследование свойств активной безопасности транспортных средств методом имитационного моделирования / А.В. Тумасов [и др.] // Журнал ААИ. 2011. №2. С. 34–37.
7. **Тумасов, А.В.** Применение программно-аппаратных комплексов для оценки тормозных свойств транспортных средств по результатам имитационного моделирования / А.В. Тумасов [и др.] // Труды НГТУ. 2011. №3 (88). С. 114–118.

Дата поступления
в редакцию 06.07.2012

A.M. Groshev¹, S.Y. Kostin¹, Y.P. Trusov¹, G.A. Konikova¹, P.V. Sereda²

RESEARCHING OF BUS BRAKING CHARACTERISTICS ON THE BASIS OF SIMULATION AND ROAD VEHICLE TEST DATA

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.Y. Alexeev¹,
Group GAZ²

Purpose: The estimating of bus behavior in braking conditions on the basis of computer simulation results and its comparison with experimental data.

Design/methodology/approach: The simulation study based on dynamic analysis method with using of SDK-software that allows take into account main vehicle parameters, road conditions and driver behavior. The experimental research was made in real road conditions with using of RaceLogic measurement system.

Findings: It is possible to apply the research results for preliminary estimation of bus braking characteristics on the basis of simulation results and road test data.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the field of vehicle active safety and estimation of effectiveness of active safety systems.

Originality/value: The main peculiarity of the study is original approach of computer simulation of vehicle behavior that could have a good practical application during the vehicle design stage.

Key words: active safety, simulation, road test, braking distance, deceleration.

УДК 629.113

Л.В. Барахтанов¹, В.В. Беляков¹, Д.А. Галкин²,
А.С. Зайцев³, Д.В. Зезюлин¹, В.С. Макаров¹

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОПОРНОЙ ПРОХОДИМОСТИ МНОГООСНЫХ КОЛЕСНЫХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
ООО «Военно-промышленная компания», г. Москва²
ООО «Военно-инженерный центр»³

Рассматриваются результаты экспериментально-теоретических исследований опорной проходимости многоосных колесных машин в различных условиях передвижения. Проанализирована возможность использования существующих математических моделей для оценки опорной проходимости специальных многоосных колесных машин. Произведена оценка сходимости результатов расчетных и экспериментальных исследований. Проанализировано влияние различных вариантов конструкционной конфигурации ходовой части многоосных колесных машин на сопротивление движению и тягово-сцепные свойства. В соответствии с проведенными экспериментально-теоретическими исследованиями сделан ряд выводов о выборе рациональных параметров пневмоколесных движителей с точки зрения повышения эффективности использования исследуемых машин.

Ключевые слова: опорная проходимость, специальные многоосные транспортные средства, бездорожье, результаты экспериментальных исследований.

Изменившаяся геополитическая обстановка и опыт множества локальных конфликтов последнего десятилетия при одновременном сокращении численности личного состава армий наглядно показали, что специальным подразделениям очень часто приходится действовать в отрыве от основных сил и вести борьбу с небольшими, мобильными и хорошо вооруженными группами противника. В результате в создавшихся условиях каждая отдельно взятая единица специальной техники таких подразделений должна быть высокоманевренной и обладать высокой проходимостью. Именно в соответствии с подобными требованиями и разрабатываются многоосные колесные многоцелевые машины, способные высокоэффективно решать современные специальные задачи.

В рамках данной статьи проводится экспериментальная и теоретическая оценка влияния параметров ходовой части машин данного класса (рис.1) на опорную проходимость. Для количественной оценки проходимости различных машин по грунтам в рамках данной работы используется показатель проходимости [1]

$$\Pi = \varphi - f, \quad (1)$$

где φ – максимальная удельная сила тяги по сцеплению машины с опорной поверхностью; f – коэффициент сопротивления качению.

Необходимо отметить, что по этим показателям в Автомобильном институте НГТУ накоплен богатый экспериментальный материал, поэтому существует возможность произвести оценку адекватности используемых математических моделей. Далее проводится анализ результатов экспериментальных исследований опорной проходимости машины многоцелевого назначения ГПИ 3901 (рис.2). Данная машина была создана для исследований ОНИЛВМ НГТУ в рамках хоздоговоров с «ВНИИТРАСМАШ» (Санкт-Петербург) в период с 1982 г. по 1989 г. До 1983 г. работы велись под общим руководством научного руководителя лаборатории вездеходных машин Рукавишника С.В., а затем под руководством Барахтанова Л.В. Экспериментальные исследования опорной проходимости машины ГПИ-3901 были проведены при участии сотрудников ОНИЛВМ Белякова В.В., Козлова В.С., Курнева В.И., Масленникова В.А. [1-3].



Рис. 1. Многоосные колесные машины:
а – БТР-60; б – БТР-70; в – БТР-80; з – БТР-90

При разработке и изготовлении ходового исследовательского макета ГПИ-3901 особое внимание было обращено на то, чтобы заложенные в нем возможности обеспечивали выполнение поставленных задач исследования. Для этого ходовая часть машины сделана регулируемой. Имеется возможность изменять как колесную формулу, так и отношение базы к колесам, а также осуществлять движение с различными радиусами поворота. Наряду с этим, предусмотрена регулировка давления воздуха в шинах, установка сдвоенных колес, средств повышения проходимости, широкопрофильных шин и легких гусениц.



Рис. 2. Ходовой полноразмерных макет колесного шасси ГПИ-3901

В табл. 1 представлена краткая техническая характеристика полноразмерного ходового исследовательского макета колесного шасси с бортовым поворотом ГПИ-3901.

Таблица 1

Техническая характеристика макета ГПИ-3901

Параметр, агрегат, размер и т.п.	Значение параметров и размеров, тип агрегата
Тип машины	колесная полноприводная с бортовым способом поворота
Колесная формула	изменяемая: 8x8, 6x6, 4x4
Полная масса, кг	до 9500±100 (с экипажем, аппаратурой, балластными грузами)
Колея, мм	2550
База, мм: с колесной формулой 8x8 6x6 4x4	3800...4350 2540...4350 1250...4350
Дорожный просвет, мм	450
Максимальная мощность, л.с. (кВт)	2x115 (2x84,50) при 3200 мин ⁻¹
Максимальный крутящий момент, кгм (Нм)	2x29 (2x284,40) при 2000...2200 мин ⁻¹
Давление в шинах, кг/см ³	0,5–2,5

Экспериментальные исследования проводились в различные периоды года на ровных, горизонтальных участках песчаных и заснеженных полей; на заболоченных поверхностях; а также на ровном прямолинейном участке асфальтового шоссе. В ходе исследований при различных вариантах ходовой части макета определялись сила сопротивления движению и сила тяги по сцеплению. Методика проведения испытаний и структурно-функциональная схема соединения измерительно-регистрирующей аппаратуры подробно описаны в работах [2]. Фрагменты испытаний ходового макета ГПИ-3901 в условиях полигона представлены на рис. 3.

Примеры результатов экспериментальных исследований по оценке влияния параметров движителя на показатели опорной проходимости ГПИ-3901 представлены на рис. 4 и рис. 5. Анализируя имеющиеся материалы необходимо отметить, что величины коэффициентов сопротивления движению f и сцепления практически не зависят от колесной формулы и коэффициента базы. Значения их существенно зависят от давления воздуха в шинах. Исследования макета ГПИ-3901 показали, что снижение давления воздуха в шинах с 0,25 до 0,05 МПа ведет к уменьшению силы сопротивления движению на 10-15% на песке и снеге, на твердых грунтах величина его несколько (5-10%) увеличивается из-за возрастания гистерезисных потерь. Проведенные исследования показали, что на деформируемых грунтах снижение давления воздуха в шинах с 0,25 до 0,05 МПа ведет к росту коэффициента сцепления на 10-30% на дерне, на 10-20% на песке и на 10-15% на снеге.

По результатам замеров силы сопротивления движению макета ГПИ-3901 с одно- и двухскатным вариантом ходовой части построены графики (рис.4). Анализ их показывает, что сопротивление движению по песку возрастает с увеличением давления воздуха в шинах. Так, независимо от варианта ходовой части макета, изменение давления воздуха в шинах от 0,05 до 0,25 МПа ведет к возрастанию силы сопротивления движению в 1,8-2 раза. Это обусловлено тем, что, несмотря на снижение гистерезисных потерь в шинах, увеличение давления воздуха ведет к возрастанию давлений колеса на грунт, глубины следа и работы деформации грунта. Сила сопротивления движению макета с двухскатными колесами в среднем на 12-20% больше, чем с односкатными. Это связано, прежде всего, с увеличением ширины следа и возрастанием из-за этого работы на деформацию грунта.



а)

б)



в)

г)



д)

ж)

з)



и)

к)

л)



м)

н)

о)

Рис. 3. Фрагменты исследовательских испытаний ходового макета ГПИ – 3901:

а – общий вид (8x8) при разном L/B ; б – испытания на снежной целине; в – общий вид (6x6) при разном L/B ; г – ладометрирование (определение распределения нагрузки по колесам); д – испытания на широкопрофильных шинах, ж - испытания на колесах со сдвоенными шинами, з – испытания по снежной целине с ленточными уширителями колес; и – испытания с ленточными уширителями колес на пересеченной местности; к – испытания с резинокордными уширителями; л – испытания с съемными грунтозацепами на песчаной целине; м – боковой сдвиг макета на луговине; н – макет с легкой звенчатой гусеницей, преодоление песчаного подъема; о – опорные площадки циклического действия

Если проанализировать варианты ходовой части макета со сдвоенными и одиночными колесами по показателю проходимости (рис.5), становится ясно, что применение двухскатного колесного движителя для улучшения проходимости не перспективно на машинах, оснащенных шинам с регулируемым давлением. С изменением давления воздуха в шинах для двухскатного варианта показатель проходимости практически не изменяется, тогда как для односкатного варианта имеет место возрастание его при снижении давления. Так, при давлении воздуха в шинах, равном 0,05 МПа для относительного варианта макета показатель проходимости на 20-25% больше, чем для двухскатного варианта. В тоже время при давлении воздуха в шинах 0,25 МПа показатель проходимости двухскатного варианта на 16-22% больше для односкатного варианта макета.

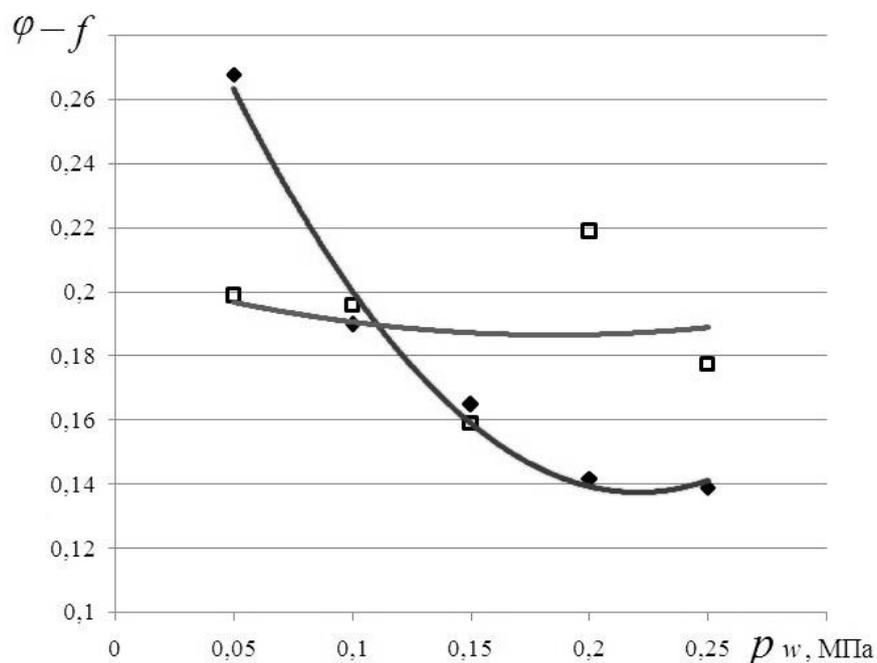


Рис. 5. Зависимость показателя проходимости машины от давления воздуха в шинах модели И-112 на песчаном грунте:

◆ – одиночное колесо; □ – сдвоенное колесо

Необходимо учитывать также следующие недостатки, возникающие при установке сдвоенных колес: увеличение полной и неподрессоренной массы машины; увеличение её габаритной ширины, ухудшение плавности хода; возрастание динамических нагрузок в ходовой части. Отсюда можно сделать вывод, что применение движителя с двухскатными колесами в качестве средства повышения проходимости для машин с бортовым способом поворота нецелесообразно.

Установка на макет ГПИ-3901 колес с широкопрофильными шинами типа 1200x500-508 не дала ощутимых результатов для повышения проходимости. Это объясняется тем, что нагрузка на колесо макета примерно втрое меньше паспортного значения её для шины. Вследствие этого деформации шин практически не происходят (даже при очень малых давлениях воздуха) и площадь контакта их с полотном пути лишь незначительно возрастает по сравнению с одинарными шинами типа 13.00-18.

Снижение давления воздуха в шинах 1200x500-508 до 0,06 МПа обеспечивает сцепление колес с песком, равное сцеплению шин типа 13.00-18 при давлении воздуха в них 0,05 МПа. При этом сопротивление движению макета на широких шинах больше примерно на 5%.

Таким образом, применение широкопрофильных шин модели 1200x500-508 в качестве средства повышения проходимости полноприводных КМ с полной массой до 10-12 т не пер-

спективно. Шины этого типа целесообразно использовать на машинах с полной массой 20-25 т.

В основу теоретических исследований в рамках данной статьи приняты математические модели движения автомобиля по деформируемому грунту и снегу, разработанные и успешно используемые в 21 НИИ МО РФ [10] и НГТУ им. Р.Е. Алексева [4-9]. С использованием данных математических моделей проведена расчетная оценка опорной проходимости специальных многоосных колесных машин при движении по сыпучему песку, свежевспаханному суглинку и снежной целине. Результаты проведенных теоретических исследований представлены на рис. 6 – рис. 11.

Расчетной оценке опорной проходимости подвергались многоосные машины различных весовых категорий (от 10000 до 23000 кг). В процессе расчетов задавалось минимально допустимое давление воздуха в шинах как обоснованное средство обеспечения уровня максимальной подвижности [11-14] специальных машин в условиях бездорожья.

Расчеты проводились для автомобилей с соответствующими ТУ значениями полной массы и ее распределения по осям при движении с заблокированным межосевым приводом. Полученные данные, прежде всего, подтверждают результаты ранее выполненных работ в ОНИЛВМ НГТУ. На рис.6 представлены примеры сравнения экспериментальных данных с результатами расчета показателей проходимости ТС в условиях песчаной и заснеженной местностей при минимальном давлении воздуха в шинах ($p_w=0,05$ МПа).

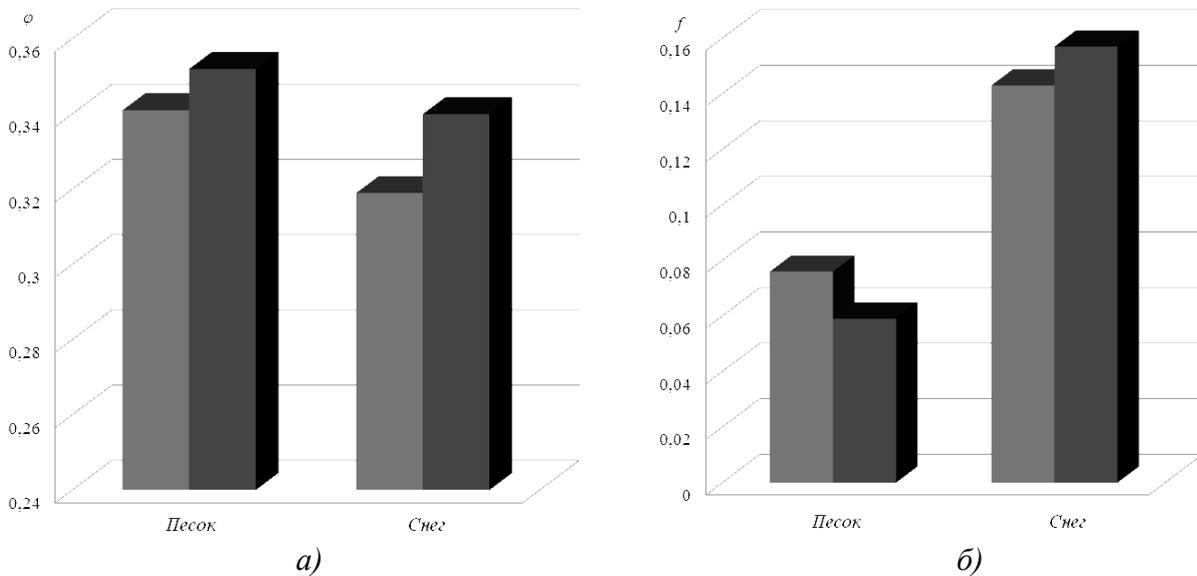


Рис.6. Сравнение расчетных данных с результатами экспериментальных исследований макета ГПИ-3901 на разных опорных основаниях при минимальном давлении воздуха в шинах $p_w=0,05$ МПа:

a – наибольшая удельная сила тяги по сцеплению; *б* – удельное сопротивление движению;

■ – эксперимент; ■ – расчет

Из рис. 7– рис. 10 видно, что наиболее тяжелым режимом работы многоосных колесных машин является их движение в условиях заснеженной местности. Для определения эффективности влияния размеров колеса на проходимость многоосной колесной машины по снегу в рамках данной работы проведены теоретические исследования, результаты которых даны на рис. 11. Приведенные данные свидетельствуют о том, что с увеличением наружного диаметра шины (рис. 11, б) происходит наиболее интенсивное возрастание запаса силы тяги при глубине снега 0,7–0,9 м. При меньшей глубине снежной целины (0,5 и 0,6 м) увеличение ширины профиля шины (рис. 11, а) обеспечивает большую величину запаса силы тяги и интенсивность ее возрастания.

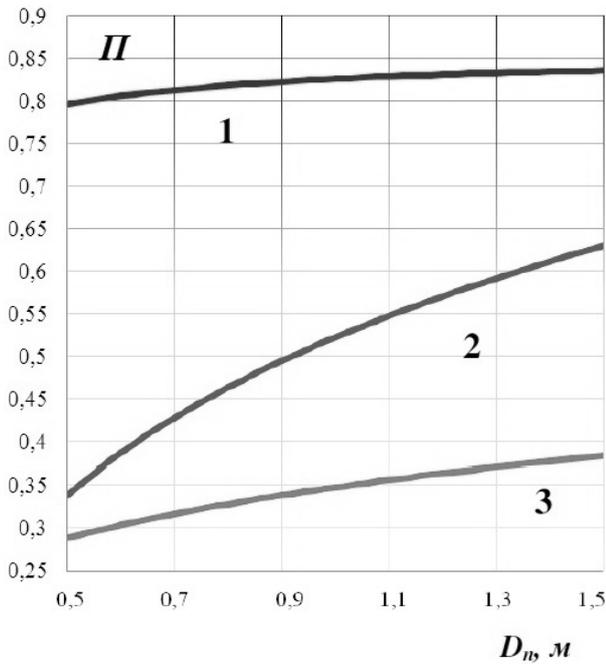


Рис. 7. Зависимость максимальной удельной силы тяги на крюке машины ($m_a=10\ 000$ кг) от диаметра колеса при $B_{ш}=\text{const}$ на разных опорных основаниях: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – снег

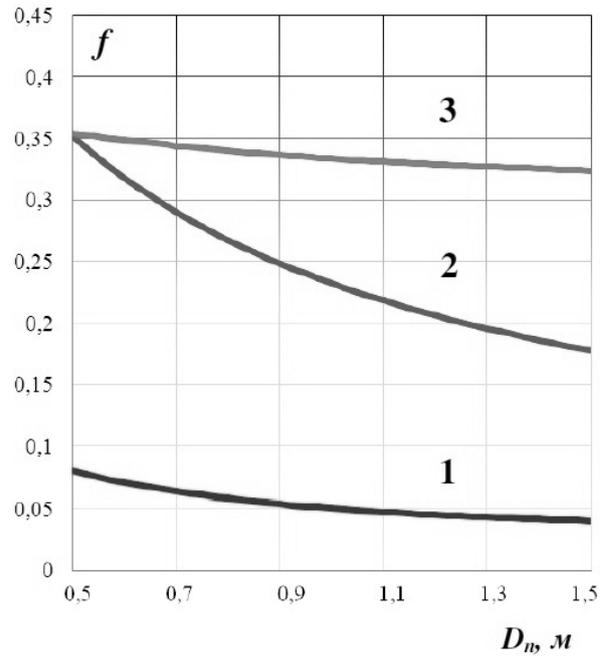


Рис. 8. Зависимость коэффициента сопротивления качению машины ($m_a=10\ 000$ кг) от диаметра колеса при $B_{ш}=\text{const}$ на разных опорных основаниях: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – снег

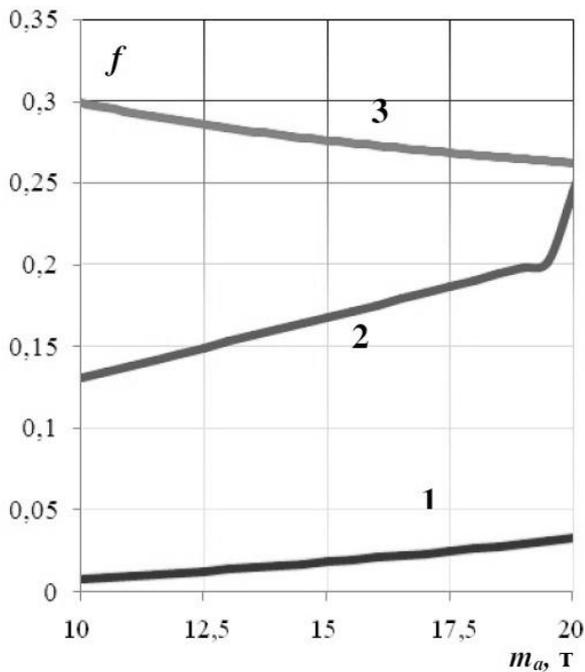


Рис. 9. Зависимость коэффициента сопротивления качению машины при $B_{ш}=\text{const}$ и $D_n=\text{const}$ от полной массы ТС на разных грунтах: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – снег

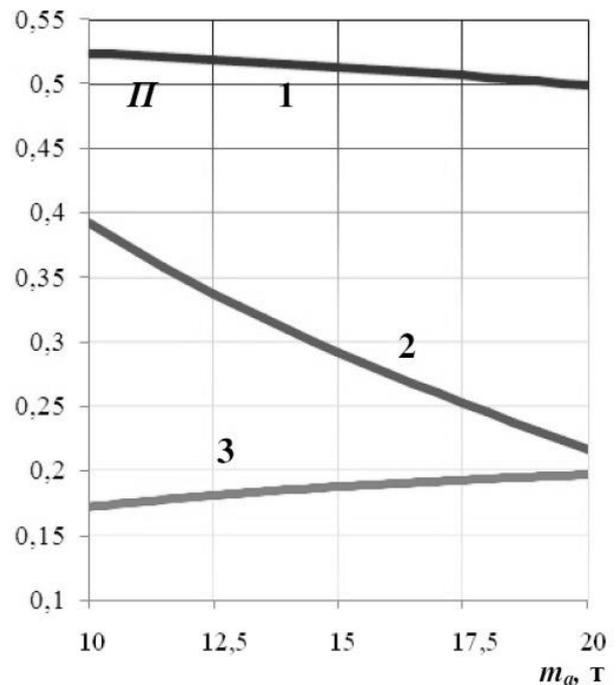


Рис. 10. Зависимость максимальной удельной силы тяги на крюке машины при $B_{ш}=\text{const}$ и $D_n=\text{const}$ от полной массы ТС на разных грунтах: 1 – песок; 2 – суглинок; 3 – снег

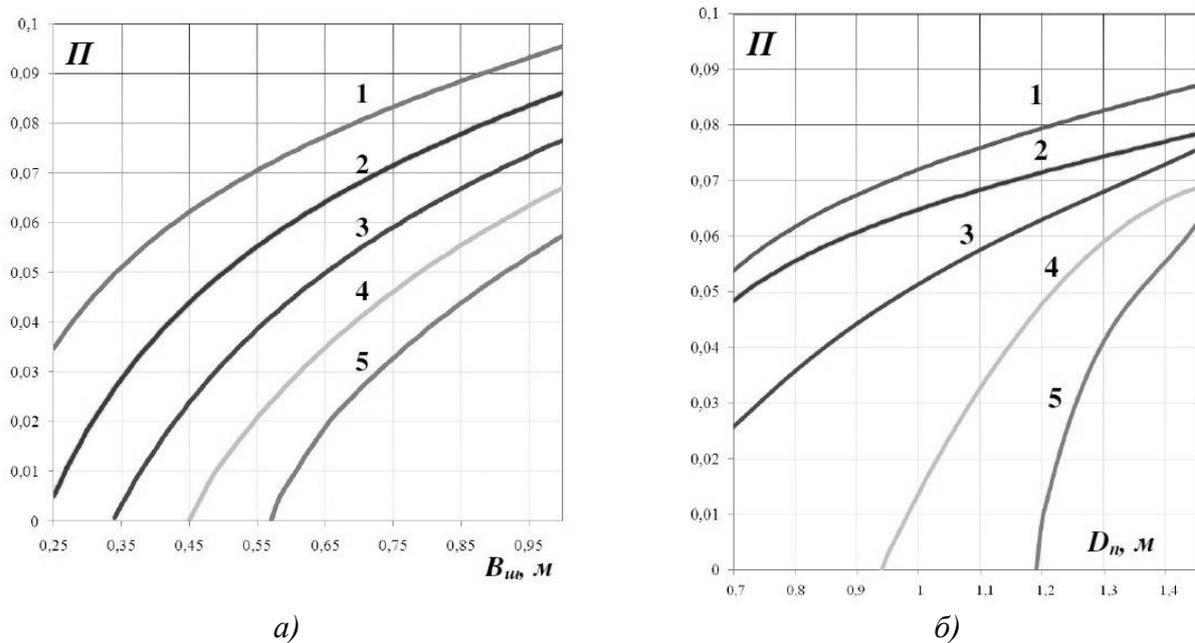


Рис. 11. Влияние размеров шин на величину запаса удельной силы тяги на крюке многоосного транспортного средства с полной массой 13,5 т при давлении воздуха 0,05 МПа:

а – ширины профиля шины $B_{ш}$ при $D_n = \text{const}$; *б* – наружного диаметра D_n при $B_{ш} = \text{const}$; глубина снега H : 1 – 0,5 м; 2 – 0,6 м; 3 – 0,7 м; 4 – 0,8 м; 5 – 0,9 м

Таким образом, в рамках данной работы проанализировано влияние различных вариантов конструкционной конфигурации ходовой части многоосных колесных машин на их опорную проходимость в различных условиях движения. В соответствии с проведенными экспериментально-теоретическими исследованиями сделан ряд выводов о выборе целесообразных геометрических параметров пневмоколесных движителей с точки зрения повышения эффективности использования исследуемых машин.

Библиографический список

1. Вездеходные транспортно-технологические машины; под ред. В.В. Белякова, А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛАН, 2004. – 960 с.
2. **Гончаров, К.О.** Экспериментальные исследования многоосной колесной машины / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. Вып. 12. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/164456.html>, свободный.
3. **Гончаров, К.** Проходимость многоосных колесных машин по снегу / К. Гончаров, В. Макаров, В. Беляков // LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 220 с.
4. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. – 161 с.
5. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. изд-во, 1986. – 191 с.
6. **Аникин, А.А.** Теория передвижения колесных машин по снегу / А.А. Аникин, В.В. Беляков, И.О. Донато. – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 240 с.
7. **Макаров, В.** Расчет проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу / В. Макаров, В. Беляков // LAP Lambert Academic Publishing GmbH & Co. 2012. – 160 с.
8. Оценка эффективности специальных транспортных средств при движении по снегу / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 156–166.
9. **Гончаров, К.О.** Влияние экскавационно-бульдозерных эффектов возникающих при криволинейном движении колеса на сопротивление качению / К.О. Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Наука и образование: электронное научно-техническое издание. 2010. Вып. 6. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/145884.html>, свободный.
10. **Наумов, А.Н.** Оценка конструктивных и эксплуатационных параметров автомобилей на

- показатели их опорной проходимости / А.Н. Наумов. автореферат дисс. ... канд. техн. наук: 05.05.03. М., 2008. – 23 с.
11. Подвижность специальных транспортных средств по дорогам типа «stone-road» / В.В. Беляков [и др.]. // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №1. С. 143–151.
 12. **Вахидов, У.Ш.** Математическое описание дорог типа «stone-road» Современные проблемы науки и образования / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.В. Беляков. 2012. № 3; URL: www.science-education.ru/103-6376 (дата обращения: 05.06.2012).
 13. **Вахидов, У.Ш.** Определение характеристик микропрофиля в поймах рек Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Макаров, В.С. Беляков // Интеллектуальные системы в производстве. 2011. №1. С. 82–87.
 14. **Вахидов, У.Ш.** Моделирование трасс движения транспортных средств, характерных для территории Северного Кавказа / У.Ш. Вахидов, В.С. Беляков, В.С. Макаров // Изв. вузов. Машиностроение. 2011. №7. С. 24–26.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

**L.V. Barakhtanov¹, V.V. Belyakov¹, D.A. Galkin²,
A.S. Zaytsev³, D.V. Zezyulin¹, V.S. Makarov¹**

EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATIONS OF PASSABILITY MULTI-AXIS WHEELED VEHICLES

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Ltd. «Military Industrial Company» (Moscow)²,
Ltd. «The military engineering centre» (Nizhny Novgorod)³

Subject/topic/purpose: Experimental and theoretical investigations of the influence of parameters of multi-axis wheeled vehicles on passability.

Methodology of work: Assessing the impact of various options of structural configuration of the chassis on the resistance and traction characteristics of multi-axis wheeled vehicles.

Results/application: The ability to use existing mathematical models for assess of passability of special multi-axis wheeled vehicles was analyzed. The estimation of the convergence of the results of theoretical and experimental studies was made. The results are important for the activity of research laboratories and automotive companies involved in the design of multi-axis wheeled vehicles.

Findings: According to the results of experimental and theoretical investigations it was established that the most heavy duty mode of operation of multi-axis wheeled vehicles of various weight categories is their movement in a snow-covered terrain. The number of recommendations about the choice of rational parameters of wheels in terms of efficient use of multi-axis wheeled vehicles was proposed.

Key words: passability, special multi-axis wheeled vehicles, terrain, results of measurements.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.5.01

НГУЕН ДЫК ТХИНЬ

СОЗДАНИЕ ФЛОТА СКОРОСТНЫХ ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ ДЛЯ СРВ. ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ТИПА ПАССАЖИРСКИХ СУДОВ ДЛЯ СРВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается вопрос о создании флота скоростных пассажирских судов и выборе оптимального типа судов для Вьетнама. Рассмотрены вопросы актуальности создания флота скоростных пассажирских судов для Вьетнама, приведен анализ морских маршрутов во Вьетнаме и их пассажирского потока в настоящее время.

Ключевые слова: Вьетнам, оптимальный тип пассажирских судов, матрица принятия решения, морские пути во Вьетнаме, СВП, катамараны, СПК, экранопланы.

Актуальность создания флота скоростных пассажирских судов для СРВ

Развитие транспортных средств характеризуется неуклонным увеличением их скоростей. В настоящее время наблюдается интенсивное развитие скоростных судов различного назначения. Они используются для перевозок пассажиров, контейнеров и автомобилей, в военных целях и т.д. В настоящее время класс скоростных судов является одним из наиболее развивающихся.

Судостроение в плане социально-экономического развития Вьетнама – одна из активно развивающихся и имеющих значительную государственную поддержку отраслей промышленности.

Вьетнам - страна в юго-восточной Азии, расположенная на полуострове Индокитай. С востока и юга Вьетнама омывается Южно-китайским морем. Большая территория моря, протяженная прибрежная зона, богатство островов делают водный транспорт важным для страны.

Во Вьетнаме есть множество красивых мест вдоль побережья, что безусловно, привлекает огромное количество туристов. Использование скоростных судов является отличным вариантом для перевозки людей вдоль побережья, что может стать наиболее выгодным и прибыльным делом. В настоящее время в стране эксплуатируются пассажирские суда, но они низкоскоростные и устаревших модификаций.

Общая длина береговой линии равна 3260 км. Вьетнам располагается на морском пути от Индийского океана к Тихому. Это дополняется развивающейся и постоянно совершенствующейся инфраструктурой, которая состоит из системы морских портов, внутренних и международных аэропортов, сетей государственных и трансазиатских транспортных путей. Однако удобных для судоходства бухт и заливов мало. В настоящее время линии вдоль всего побережья только начали развиваться, поэтому постройка и ввод в эксплуатацию скоростных пассажирских судов – актуальная проблема для СРВ.

Типы скоростных судов

При проектировании скоростных судов важно повышение их гидродинамической эффективности. Одним из возможных путей повышения гидродинамической эффективности является снижение сопротивления воды движению судна.

Увеличение скорости судов стало возможным только при создании судов, использующих новые принципы движения, а именно:

- движение на подводных крыльях;
- глиссирование;
- движение на воздушной подушке;
- движение с использованием экранного эффекта;
- многокорпусные суда (катамараны, трёхкорпусные суда).

Приведем кратное описание рассматриваемых судов.

Суда на воздушной подушке

Под судном на воздушной подушке подразумевается транспортное средство, предназначенное для эксплуатации над водой, способное двигаться также над относительно ровной поверхностью суши, льдом, заболоченной поверхностью, подъемная сила у которого полностью или частично создается областью избыточного давления воздуха под его днищем, генерируемой специальными воздухонагнетателями, установленными на судне.

Вначале СВП появились исключительно как альтернатива скоростному водному транспорту. Однако в процессе их развития к высокой скорости добавились ещё сравнительно высокая проходимость и амфибийность - достоинства, которыми в подобной мере не обладает ни один другой наземной или водной вид транспорта.

Известны два принципиально отличных типа судов на воздушной подушке:

- амфибийные, корпус которых при движении может полностью отрываться от воды (СВПА);
- неамфибийные, или скеговые, – с неполным отрывом корпуса от воды и жесткими бортовыми ограждениями – скегами (СВПС).

Амфибийные СВП имеют гибкое ограждение зоны воздушной подушки по всему периметру, способны выходить на берег, преодолевать препятствия, двигаться над участками суши, над льдом. По архитектуре СВПА мало похожи на обычные суда водоизмещающего или глиссирующего типа. СВПС по архитектуре, принципам общего расположения, энергетическим установкам, устройствам управления, двигателям близки к обычным водоизмещающим судам.



Рис. 1. Схемы СВП

Катамараны

Катамаран – это двухкорпусное судно. Корпуса судна соединяются сверху мостом (ферменного или палубного типа).

Катамараны показали отличную остойчивость: крен при скоплении всех пассажиров на одном борту не превышает 2–3°. При равных с однокорпусным судном пассажиромести-

мости и скорости у катамарана примерно вдвое меньшее водоизмещение и на 30% меньшая мощность энергетической установки. Для катамаранов характерны возможность уменьшения осадки без существенного ухудшения мореходности и отличная маневренность

Экранопланы

Экраноплан – это универсальное высокоскоростное транспортное средство, предназначенное в основном для эксплуатации над экраном (водой, землей и др.), обладающее всем комплексом корабельных свойств, значительной частью авиационных и некоторыми свойствами наземного транспорта.

Согласно определению, сформулированному во «Временном руководстве по безопасности экранопланов», принятом ИМО: экраноплан – это многорежимное судно, которое в своём основном эксплуатационном режиме летит с использованием «экранного эффекта» над водной или иной поверхностью, без постоянного контакта с ней, и поддерживается в воздухе, главным образом, аэродинамической подъёмной силой, генерируемой на воздушном крыле (крыльях), корпусе, или их частях, которые предназначены для использования действия «экранного эффекта».

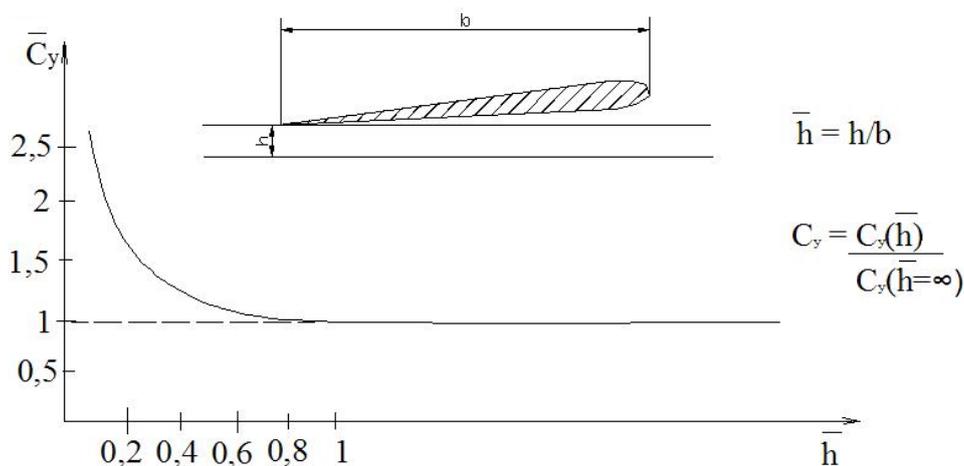


Рис 2: Зависимость коэффициента подъемной силы воздушного крыла от относительной высоты над экраном

Экранопланы способны эксплуатироваться на самых различных маршрутах, в том числе и недоступны для обычных судов. Наряду с более высокими гидроаэродинамическим качеством и мореходностью, чем у других скоростных судов, экранопланы практически всегда обладают амфибийными свойствами. Помимо водной глади они способны передвигаться над твёрдой поверхностью (земля, снег, лёд) и базироваться на ней. Экраноплан, таким образом, объединяет в себе лучшие качества судна и самолёта.

Суда на подводных крыльях

Судно на подводных крыльях (СПК) – тип скоростного судна с динамическим принципом поддержания, у которого под корпусом расположены специальные крылья. При стоянке и следовании на низкой скорости судно на подводных крыльях удерживается на воде за счёт силы Архимеда, как и обыкновенное водоизмещающее судно. На высокой скорости за счёт создаваемой этими крыльями подъёмной силы судно поднимается над водой. При этом значительно уменьшается сопротивление воды, что позволяет развивать высокие скорости.

Существует два типа подводных крыльев – частично погруженное крыло (или U-образное крыло) и полностью погруженное крыло (крыло в форме перевёрнутого T).

Типы подводных крыльев

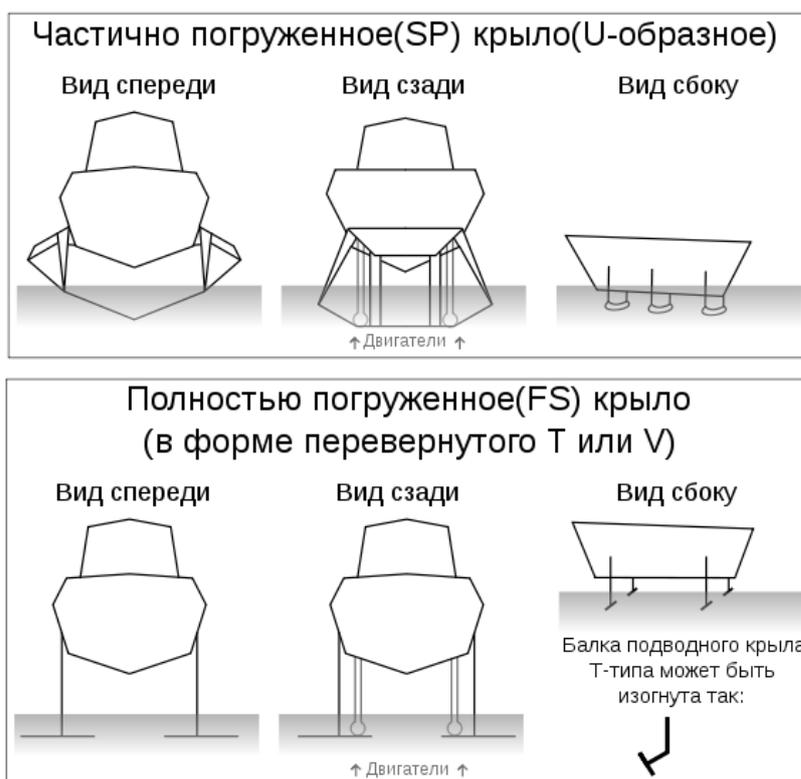


Рис. 3. Типы подводных крыльев

Выбор оптимального варианта пассажирского судна для Вьетнам

Чтобы выбрать оптимальный тип пассажирских судов для Вьетнама воспользуемся матрицей принятия решения, составленной экспертами (табл. 1). Сводные результаты приведены в табл. 2.

Таблица 1

Матрица решения, составленная первым экспертом

Критерии	Строительная стоимость	Эксплуатационные расходы	Сложность	Скорость	Мощность СЭУ	Мореходные качества	Технология изготовления	Оценка
	1	2	3	4	5	6	7	
Экранопланы	1	1	1	5	1	1	1	1,6
СПК	2	2	2	3	2	2	2	2,15
СВП	3	3	3	4	3	3	5	3,35
Катамараны	4	4	4	2	4	5	3	3,7
Вес критерия	0.25	0.15	0.1	0.15	0.15	0.1	0.1	

Примечания к табл. 1.

1 – стоимость корабля с учётом стоимости материалов, оборудования и комплектующих, а также причальных сооружений. Наивысший балл даётся более дешёвому варианту;

2 – эксплуатационные расходы. Наивысший балл даётся более дешёвому варианту;

3 – (сложность интеллектуальная) решения вопросов проектирования, постройки и эксплуатации для Вьетнама. Наивысший балл даётся меньшим интеллектуальным затратам;

4 – скорость: насколько важно иметь для Вьетнама большую скорость пассажирских судов. Наивысший балл даётся более скоростным судам с учётом постановки вопроса;

5 – мощность СЭУ для достижения поставленной задачи. Наивысший балл – минимальные затраты мощности;

6 – мореходные качества предлагаемых типов судов. Наивысший балл даётся наиболее мореходным судам;

7 – технология изготовления судов. Наивысший балл даётся менее сложным судам;

8 – общая оценка: $t = \sum a_i \times n_i$. где a_i – вес критерия; n_i – оценка по этому критерию.

Таблица 2

Средняя оценка

Эксперты	1	2	3	4	5	6	Общая оценка
Экранопланы	1.6	1.4	3.95	1.1	1.3	1.3	1.78
СПК	2.15	2.85	4	3	2.9	3.15	3.01
СВП	3.35	2.15	4	2.8	2.9	3.6	3.13
Катамараны	3.7	3.85	4	4.2	3.1	4.2	3.84

В результате получаем: в настоящее время для Вьетнама самыми оптимальными типами скоростных пассажирских судов являются СВП и катамараны.

Однако катамараны имеют ряд недостатков для использования во Вьетнаме:

- большая площадь смоченной поверхности делает катамараны неэффективными на малых скоростях;
- использование двух корпусов и соединительного моста требует большего расхода металла при постройке. Высокая стоимость постройки и эксплуатации;
- проблема прочности соединительного моста, который подвергается большим нагрузкам при качке, что делает использование катамаранов более привлекательным на внутренних водных путях, а не на море.

Итак, в настоящее время линии вдоль всего побережья Вьетнама только начали развиваться, но в северных и южных морских городах хорошо развито прибрежное пассажирское судоходство на относительно короткие расстояния, использующее небольшие суда. Пассажирский морской транспорт представлен судами малого и среднего тоннажа. Основные морские пути показаны на рис. 4 и в табл. 3.

Таблица 3

Основные морские пути во Вьетнаме

Основные маршруты (туда – обратно)	Протяженность, км	Пассажирский поток (чел./день) (в 1 сторону)
Хайфон - Тханьхоа	220	200
Хайфон - Винь	399	200
Хайфон - Дананг	690	450
Хайфон – Хошимин	1500	800
Тханьхоа - Винь	205	150
Винь - Дананг	450	250
Винь - Донгхой	270	100
Донгхой - Дананг	290	200
Дананг - Куинён	300	250
Дананг - Хоангша	315	100
Дананг - Хошиминь	820	600
Куинён – Фан Тхиет	440	250
Фантхиет - Хошими	290	300
Хошимин- Чьонгша	670	150

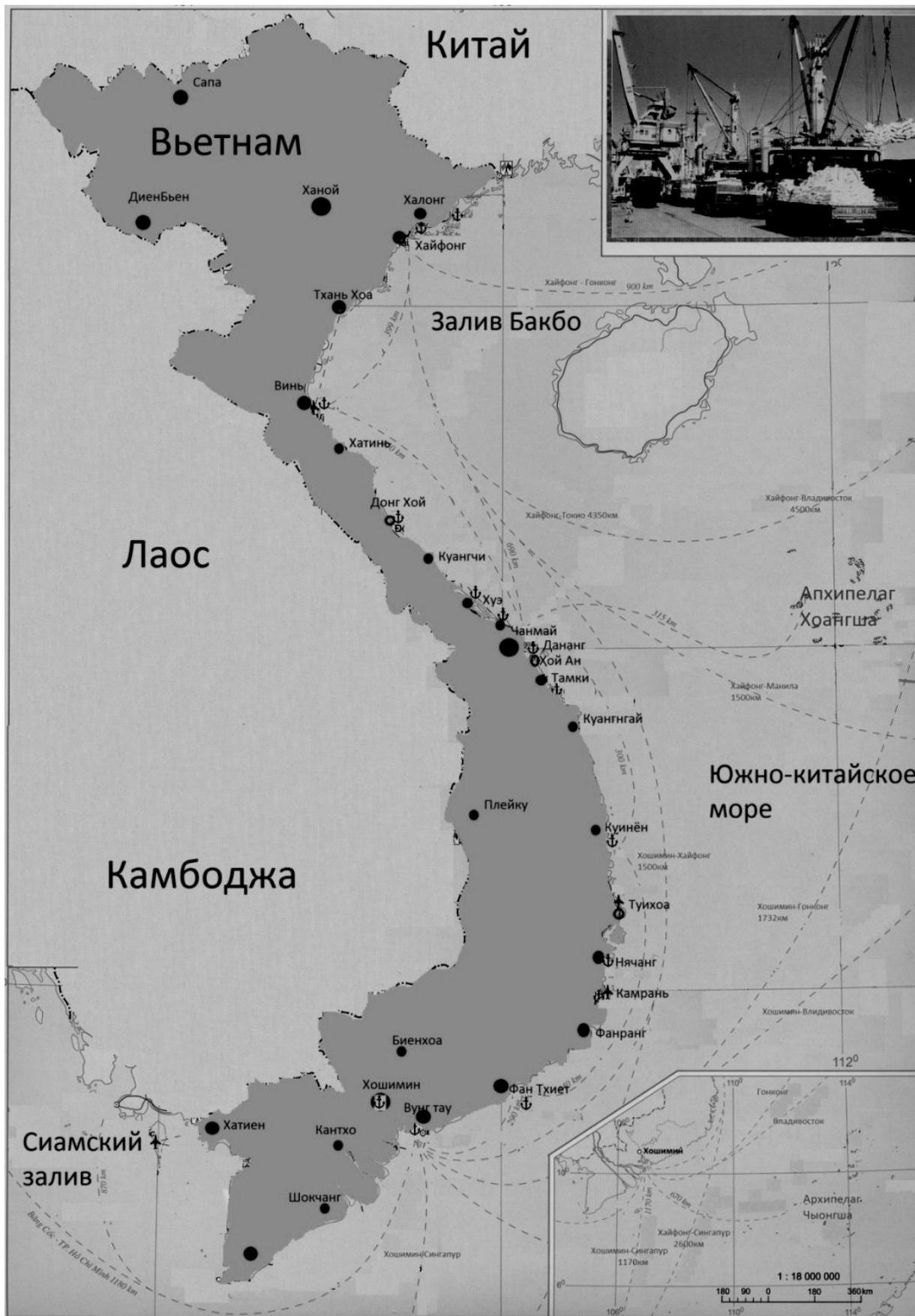


Рис. 4. Карта Вьетнама и основные морские пути

В табл. 3 показаны основные морские пути Вьетнама в настоящее время, их протяженность, пассажирские потоки.

Отметим, что, во Вьетнаме большинство маршрутов имеет относительно короткую протяженности с небольшим пассажирским потоком, поэтому СВП более актуальны для создания флота скоростных пассажирских судов страны.

Библиографический список

1. Демешко, Г.Ф. Проектирование судов. Амфибийные суда на воздушной подушке / Г.Ф. Демешко. – СПб.: Судостроение, 1992. Т. 1.
2. Павленко, А.Н. Скоростные суда вчера, сегодня, завтра // XIV Алексеевские чтения. Н. Новгород: НГТУ. 2010. С. 27–33.
3. Логачев, С.И. Мировое судостроение / С.И. Логачев, В.В. Чугунов, Е.А. Горин. – СПб.: Мор Вест, 2009.
4. Атлас Вьетнама. М., 2008. С. 18.
5. Волков, Л.Д. Основы гидроаэродинамики судов с динамическими принципами поддержания / Л.Д. Волков. – СПб.: ГМТУ, 1995.
6. Судно на воздушной подушке <http://ru.wikipedia.org/wiki>
7. Катамаран <http://ru.wikipedia.org/wiki>
8. Экраноплан <http://ru.wikipedia.org/wiki>

*Дата поступления
в редакцию 22.06.2012*

Nguyen Duc Thinh

DEVELOPMENT OF HIGH-SPEED PASSENGER VESSELS IN VIETNAM. CHOOSE THE OPTIMAL TYPE OF HIGH-SPEED PASSENGER SHIP FOR VIETNAM

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

The paper deals with the creation of high-speed passenger vessels and selection the best type of high-speed passenger vessels for Vietnam. The questions about the relevance of a fleet of high-speed passenger vessels for Vietnam and the analysis of sea routes in Vietnam and their passenger traffic at this time.

Key word: Vietnam, the choice of the optimal type of passenger ships, a decision-making matrix, the sea routes in Vietnam, catamarans, hydrofoils, ecranoplan.

УДК. 629.5.015.2

Д.А. Семенов, В.А. Зуев

**ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ПЛОТНОСТИ ВОДЫ И ЛЬДА
НА СОПРОТИВЛЕНИЕ СУДОВ В БИТЫХ ЛЬДАХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Определение ледовых качеств судов в процессе их проектирования заставляет обращаться к модельному эксперименту. Моделирование осуществляется в ледовом бассейне с последующим пересчетом результатов на натуру по определенным методикам. Поэтому представляет интерес поиск новых материалов, более полно удовлетворяющих условиям подобия, и разработка методик пересчета результатов испытаний на натуру при частичном подобии.

Методология: Рассмотрен метод моделирования солености воды и льда при модельных испытаниях судов в битых льдах. Соленость рассматривается как основной фактор изменяющий плотность воды и льда, а следовательно, и сопротивление судна в битом льду.

Результаты: Представлены результаты модельных испытаний судна пр. 1105 и пр. 22450 в пресной и соленой воде. Теоретическим и экспериментальным путем доказано, как соленость влияет на сопротивление судна в битых льдах. Предложены новые расчетные формулы для пересчета ледового сопротивления модели в пресной воде на соленую.

Значения исследования: Анализ полученных данных позволил экспериментально подтвердить и обосновать метод пересчета результатов модельных испытаний в пресной воде на натурное судно, плавающее в соленой воде.

Новизна/ценность: На базе полученных формул разработана методика определения ледового сопротивления морских судов путем проведения модельных испытаний в битых льдах в опытовых бассейнах.

Ключевые слова: ледовые условия, ледовое сопротивление, битые льды, судно, соленость, пересчет с модели на натуру, модельные испытания, моделирование.

При моделировании ледового сопротивления важно соблюдать подобие в отношении плотности льда и его модели, плотности воды и ее модели. Влияние плотности битого льда на сопротивление исследовал М.Е. Рабинович [11]. Влиянию плотности воды на сопротивление судов в битых льдах не всегда уделяли должное внимание.

Плотность морского льда зависит от его температуры, солености, возраста, условий образования и т.д. и составляет $0,86-0,94 \text{ т/м}^3$. Плотность морской воды зависит от ее солености, температуры и глубины. Средние значения солености воды вдоль Арктического побережья составляют 30–35 ‰. Значения плотности поверхностного слоя воды при температуре $0 \text{ }^\circ\text{C}$ можно принять $1,025 \text{ т/м}^3$ [1, 2].

Морская вода имеет большую плотность, а морской лед – меньшую плотность. Большое количество авторов игнорировали эти факты, что приводило к неточностям при прогнозировании сопротивления во льдах.

Повышение плотности морской воды и понижение плотности соленого льда сказывается на плавучести льдин, а следовательно, на составляющих сопротивления льдин о корпус судна.

При движении судна в битых льдах большое значение играют силы трения. Рассмотрим эти силы: так называемое сухое трение и гидродинамическое. Сухое трение возникает при взаимодействии корпуса судна со льдом и льдин между собой. Величина сил сухого трения не зависит от скорости скольжения и пропорциональна соответствующим контактным давлениям. Силы гидродинамического трения появляются при обтекании водой корпуса судна и льдин, а также при их раздвигании, притапливании и поворачивании. Обусловленные вязкостью воды, они зависят от скорости движения.

Сухое трение льда относится к категории сил внешнего трения; для него справедлив закон Кулона—Амонтона. Силы сухого трения при моделировании подчиняются условию подобия Фруда, являются автомодельными при соблюдении равенства коэффициентов трения природы и модели.

Гидродинамическое трение относится к категории сил внутреннего трения, так как скольжение в этом случае происходит внутри жидкости между ее слоями. Эти силы зависят от вязкости жидкости и скорости движения.

При достаточно больших удельных давлениях, характерных для движения судна во льдах, гидродинамическое трение льда о корпуса судна также можно рассматривать как не зависящее от скорости [9]. Опытами, поставленными в натуральных условиях, было доказано, что трение льда о судовую сталь и льда о лед как при отсутствии жидкой смазки (воды) между трущимися поверхностями, так и в воде подчиняется законам граничного трения (трения при наличии тонкой смазочной прослойки), к которым применим закон Кулона—Амонтона. Указанный вывод распространяется практически на весь диапазон удельных давлений и скоростей скольжения, встречающихся при движении судна во льдах [10,11].

На основании сказанного полагается, что большая часть контактных сил трения, возникающих при взаимодействии корпуса со льдом и льдин между собой, может быть отнесена к категории сил, моделирующихся согласно условию подобия Фруда.

Силы трения включают вязкостное сопротивление корпуса судна и трение льдин о воду. Вязкостное сопротивление корпуса судна может не приниматься во внимание, когда речь идет о чистом ледовом сопротивлении. Вязкостное сопротивление льдин состоит из сопротивления трения и сопротивления формы (вихревого сопротивления). Первая из составляющих может моделироваться лишь по условию Рейнольдса, вторая является частью составляющей гидродинамического давления, возникающего вследствие перераспределения давления, вызванного влиянием вязкости жидкости. Для удобообтекаемых тел с большим удлинением эта составляющая пересчитывается на натуру с так называемым остаточным сопротивлением, согласно условию подобия Фруда. Однако обломки льдин следует отнести к плохо обтекаемым телам. Скорости их перемещения сравнительно невелики, поэтому коэффициент сопротивления зависит от числа Рейнольдса. Следовательно, силы, обуславливающие сопротивление формы льдин, не моделируются по условию Фруда.

При моделировании движения судна в битых льдах полное сопротивление можно представить так:

$$R = R_{\text{л}} + R_{\text{в}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{л}}$ – чисто ледовое сопротивление; $R_{\text{в}}$ – сопротивление воды.

Анализ природы действующих на судно сил трения позволил установить, что для моделирования движения в битых льдах необходимо ледовое сопротивление разделить на составляющие рис. 1: прямое (не зависящее от скорости) и скоростное (зависящее от скорости), которые могут определяться отдельно [3, 5].

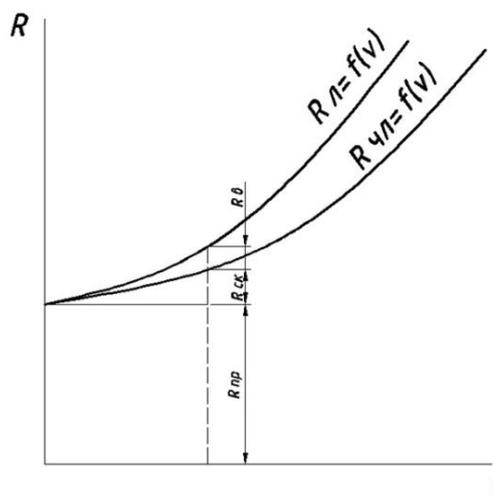


Рис. 1. Составляющие ледового сопротивления:

$R_{\text{пр}}$ - прямое сопротивление; $R_{\text{ск}}$ - скоростное сопротивление; $R_{\text{в}}$ - сопротивление в чистой воде;
 $R_{\text{л}}$ - полное ледовое сопротивление, $R_{\text{чл}}$ - чисто ледовое сопротивление

В обобщенном виде сопротивление битого льда с точки зрения анализа влияния плотностей можно представить следующим выражением:

$$R = (\rho_{\text{л}} - \rho_{\text{в}})F_1 + \rho_{\text{в}}v^2F_2 + \rho_{\text{л}}v^2F_3, \quad (2)$$

где F_1, F_2, F_3 – функции, зависящие от формы корпуса судна, коэффициента трения корпуса о лед и толщины льда (Функции F_1, F_2 и F_3 подробно описаны в книге Ионова Б. П и Грамузова Е. М. «Ледовая ходкость судов» [9]); v – скорость движения судна.

Существующие методики расчета чистого ледового сопротивления противоречат друг другу в количественном, а иногда и качественном плане, и часто не дают удовлетворительного с точки зрения потребностей практики ответа. В этой связи актуальными остаются экспериментальные методы определения ледового сопротивления.

Для экспериментального определения сопротивления судна в битом льду было предложено разделить его на составляющие. При разделении сопротивления на составляющие принята гипотеза независимости отдельных составляющих полного ледового сопротивления. При таком разделении каждую составляющую можно определить модельными испытаниями и пересчитать на натурное судно [6,7,8].

Из формулы (2) видно, что прямое сопротивление пропорционально разности плотностей воды и льда ($\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}}$). Со скоростным сопротивлением все сложнее. Его нельзя экспериментально разделить на инерционное и гидродинамическое. Инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, предполагается (для получения более достоверных данных), что скоростное сопротивление пропорционально плотности воды.

В соответствии с классической теорией моделирования, необходимо соблюсти геометрическое, кинематическое и динамическое подобие явлений, сопровождающих разрушение льда корпусом судна.

Таблица 1

Условия моделирования при испытаниях судов в битых льдах

Параметр	Судно		Параметр	Лед	
	Натура	Модель		Натура	Модель
Длина	L_n	$L_n \cdot 1/\lambda$	Толщина	h_n	$h_n \cdot 1/\lambda$
Ширина	B_n	$B_n \cdot 1/\lambda$	Протяженность	r_n	$r_n \cdot 1/\lambda$
Осадка	T_n	$T_n \cdot 1/\lambda$	Коеф. трения	f_n	f_m
Водоизмещение	V_n	$V_n \cdot 1/\lambda^3$	Массовая плотность воды	$(\rho_{\text{в}})_n$	$(\rho_{\text{в}})_m$
Скорость хода	v_n	$v_n \cdot 1/\sqrt{\lambda}$			
Время	t_n	$t_n \cdot 1/\sqrt{\lambda}$	Массовая плотность льда	$(\rho_{\text{л}})_n$	$(\rho_{\text{л}})_m$
Ускорение силы тяжести	g_n	g_m			
Сопротивление движению	R_n	$R_n \cdot 1/\lambda^3$	Соленость	s_n	s_m
Работа сил	A_n	$R_n \cdot 1/\lambda^4$	Сплоченность льда	S_n	S_m
$\lambda = L_n/L_m$ - линейный масштаб моделирования					

Для каждой пары действующих сил можно написать свое условие подобия (табл. 1), которое называется условием частичного подобия. В случае выполнения всех частичных подобий имеет место полное динамическое подобие.

При выполнении представленных условий ледовое сопротивление натурального судна при движении в битых льдах можно определить пересчетом в соответствии с законом подобия Фруда по кубу масштаба λ^3 . Геометрические характеристики льдин и канала определяются масштабом геометрического подобия.

Принимая во внимание изложенное, можно записать формулы для прямого и скоростного сопротивлений с учетом плотностей воды и льда [6, 7, 8]. В этом случае прямое сопротивление обломков льда при пересчете с пресной воды на соленую можно пересчитать по формуле:

$$R_{\text{пр}}^{\text{н}} = R_{\text{пр}}^{\text{м}} \left(\frac{\rho_{\text{в}}^{\text{с}} - \rho_{\text{л}}^{\text{с}}}{\rho_{\text{в}}^{\text{п}} - \rho_{\text{л}}^{\text{п}}} \right) \lambda^3, \quad (3)$$

где индексами «н» и «м» обозначены натура и модель, а индексами «п» и «с» пресный и соленый лед.

Скоростное сопротивление обломков можно определить следующим образом:

$$R_{\text{ск}}^{\text{н}} = R_{\text{ск}}^{\text{м}} \frac{\rho_{\text{в}}^{\text{с}}}{\rho_{\text{в}}^{\text{п}}} \lambda^3, \quad (4)$$

где λ – геометрический масштаб.

Для оценки влияния плотности воды и льда рассмотрим движение по поверхности воды, покрытой битым льдом, сплоченностью 10 баллов, плоской пластины, размерами $L \times B \times H$; L, B, H – длина, ширина и высота пластины соответственно, M – масса пластины, плотность воды – $\rho_{\text{в}}$, льда – $\rho_{\text{л}}$; давление льдин на пластину $(\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})gh_{\text{л}}$ ($h_{\text{л}}$ – толщина льда).

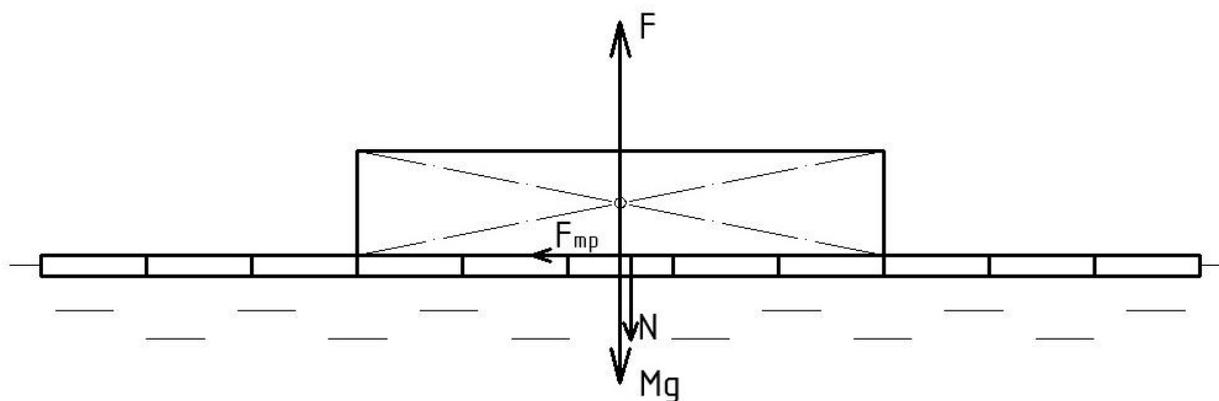


Рис. 2. Силы, возникающие при движении по поверхности воды, покрытой битым льдом, сплоченностью 10 баллов, плоской пластины

Суммарная сила со стороны льда на пластину

$$N = (\rho_{\text{в}} - \rho_{\text{л}})gh_{\text{л}}S, \quad (5)$$

где S – площадь пластины в плане.

В соответствии с законом Кулона – Амонтонна, сила трения битого льда о поверхность пластины

$$F_{\text{тр}} = fN, \quad (6)$$

где f – коэффициент трения пары лед – пластина.

Из формул (5) и (6) видно, что сила трения битого льда о поверхность пластины зависит от соотношения плотности воды и льда.

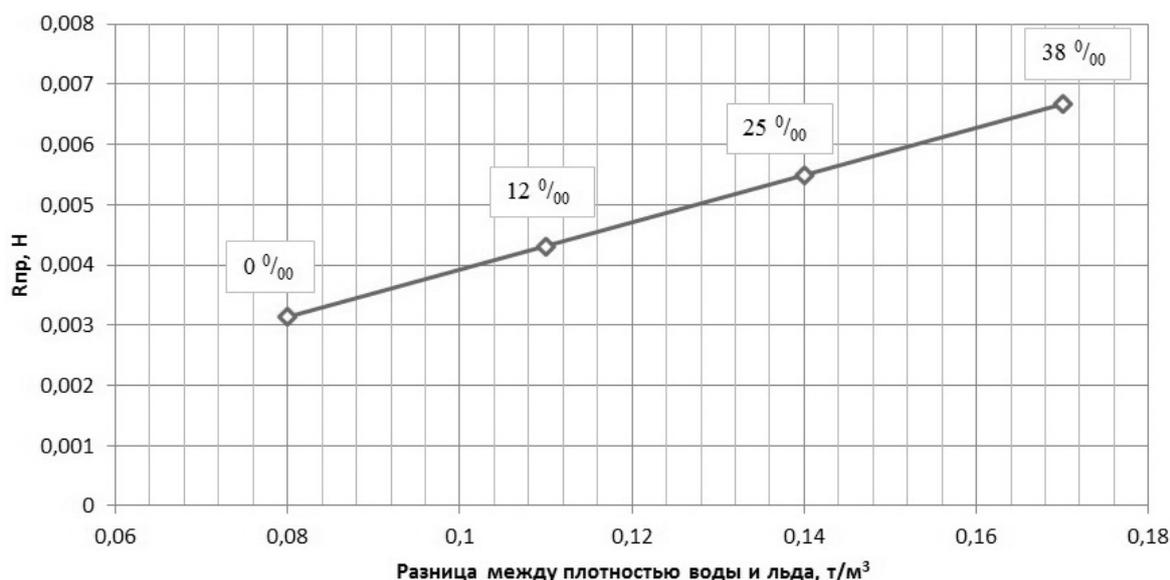


Рис. 3. Определение зависимости прямого сопротивления от изменения разницы между плотностью воды и льда (для разной солености)

При плотностях морской воды и льда $1,025 \text{ т/м}^3$, $0,89 \text{ т/м}^3$ и пресноводных $1,000 \text{ т/м}^3$, $0,92 \text{ т/м}^3$ эта разница равна $0,135 \text{ т/м}^3$ и $0,080 \text{ т/м}^3$ соответственно. То есть сопротивление трения при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза. Трение играет большую роль в прогнозировании ледового сопротивления судов в битых льдах, поэтому для получения более достоверных данных необходимо учитывать соленость воды и льда, так как она в значительной степени влияет на плотность, а следовательно, и на ледовое сопротивление в целом. Также на это указывают модельные испытания судов в битом льду, проводимые в ледовом бассейне НГТУ им. Р.Е. Алексеева.



Рис. 4. Внешний вид ледового бассейна НГТУ им. Р. Е. Алексеева после модернизации в 2010 г.

Покажем, насколько адекватны теоретические зависимости (3) и (4), предложенные и обоснованные выше. Модельные испытания в битом льду разной толщины, сплоченности

при разной солености воды были проведены для судов ледового плавания, характеристики которых представлены в табл. 2.

Таблица 2

Характеристики моделей

Характеристики	пр.22450	пр. 1105	пр. 16	пр. Р-47
Масштаб λ	1:60	1:50	1:33,3	1:17,7
Водоизмещение D_M , кг	30,5	17,9	17,7	38,5
Длина модели L_M , м	1,271	1,42	1,341	1,525
Ширина модели B_M , м	0,30	0,32	0,336	0,435
Осадка модели T_M , м	0,108	0,065	0,072	0,120

В качестве примера на рис. 5 приведены результаты пересчета модельных испытаний модели ледокола пр. 1105 «Капитан Чечкин». Модель выполнена в масштабе 1:50, испытывалась в плитках полиэтилена (плотность $0,92 \text{ т/м}^3$) толщиной 15 мм, сплоченностью 10 баллов в канале шириной 0,6 м. В эксперименте изменялась соленость воды, при этом плотность воды получилась 1.000, 1.011 и 1.023 т/м^3 .

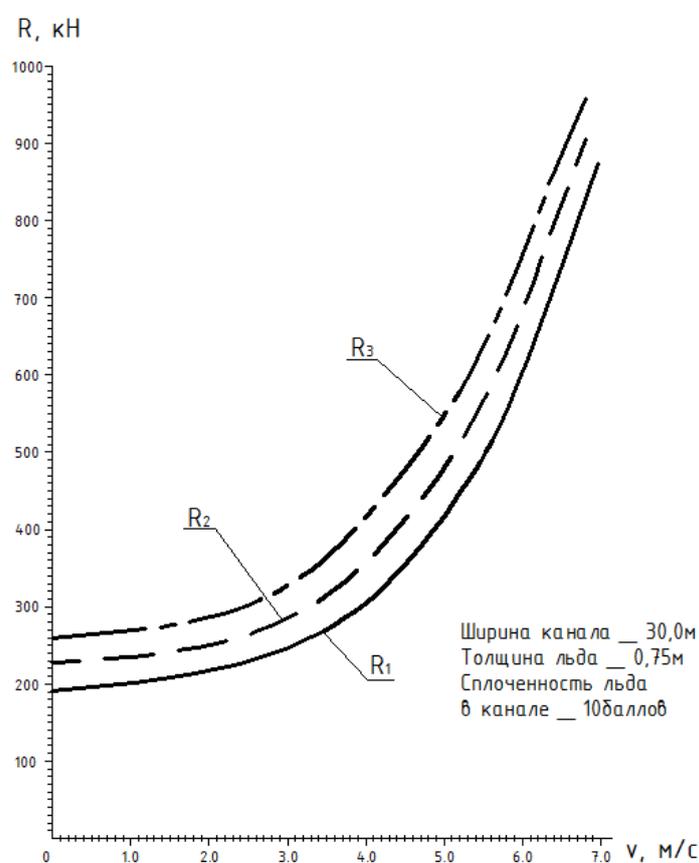


Рис. 5. Полное ледовое сопротивление натурного судна типа "Капитан Чечкин" пр.1105:
 R_1 - пресная вода и пресный лед; R_2 - соленая вода (плотность воды $1,011 \text{ т/м}^3$) и пресный лед;
 R_3 - соленая вода (плотность воды $1,023 \text{ т/м}^3$) и пресный лед

На рис. 6 показаны результаты пересчета ледового сопротивления судна – снабженца

проекта 22450 ледового класса Arc 5 на натурное судно с использованием поправок (3) и (4). Модель в масштабе 1:60 испытывалась в плитках полиэтилена толщиной 20 мм, сплоченностью 10 баллов в канале шириной 0,48 м.

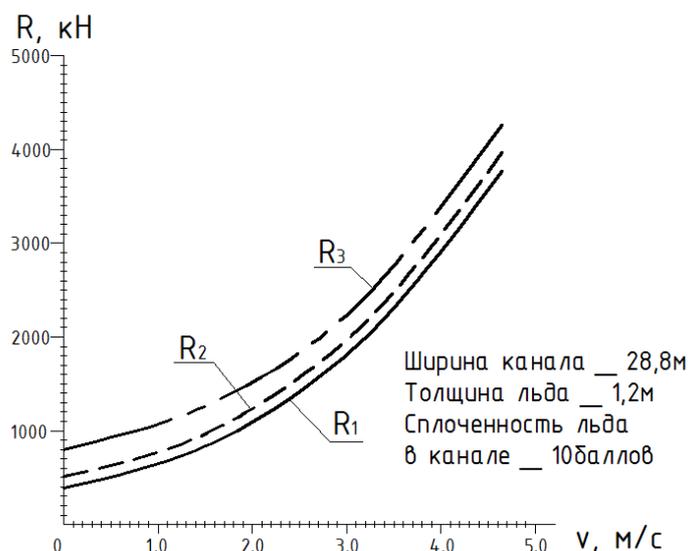


Рис. 6. Полное ледовое сопротивление натурного судна-снабженца пр.22450:
 R_1 - пресная вода и пресный лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,92\text{т/м}^3$); R_2 - соленая вода и пресный лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1,025\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,92\text{т/м}^3$); R_3 - соленая вода и соленый лед ($\rho_{\text{в}}^{\text{н}}=1\text{т/м}^3$, $\rho_{\text{л}}^{\text{н}}=0,89\text{т/м}^3$)

Приведенные примеры прогнозирования сопротивления морских судов в битом льду с помощью модельных испытаний убедительно показывают необходимость учета поправок на плотность воды и льда с помощью формул (3) и (4).

Предложенный метод пересчета ледового сопротивления в битом льду позволяет, провести испытания в пресной воде и пересчитать на натурное судно, учитывая, что оно эксплуатируется в соленой воде. Это актуально для морских судов, так как возрастание солености приводит к увеличению сопротивления. Если не учитывать поправок на изменение солености при пересчете на натуре в методе, изложенном в РТМ 212.0102-80, то требуется проводить испытания в соленой воде.

Библиографический список

1. Беховых, Л.А. Основы гидрофизики: учеб. пособие / Л.А. Беховых, С.В. Макарычев, И.В. Шорина. – Барнаул: Изд-во АГАУ, 2008. – 172 с.
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Зуев, В.А. Взаимодействие судов со льдом / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов. – Горький: ГПИ, 1988. – 89 с.
4. Зуев, В.А. Разработка практических методов и технологий моделирования ледовой среды при испытаниях судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, М.А. Балакшина // 18 Междунар. конф. по портовому и океаническому машиностроению в Арктических условиях. – Потсдам, (шт. Нью-Йорк, США), 2005.
5. Зуев, В.А. Пересчет с модели на натурные условия сопротивления битого льда движению судна / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2010. Вып. 51 (335).
6. Зуев, В.А. Моделирование взаимодействия судна со льдом / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // Труды ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова. 2011. Вып. 63 (347). С. 51–58.
7. Зуев, В.А. Влияние внешних условий на сопротивление судов при модельных испытаниях в битом льду / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // XLIV Крыловские чтения. Проблемы

- мореходных качеств судов, корабельной гидромеханики и освоения шельфа: докл. научно-технич. конф. – СПб., 2011. С. 113–116.
8. **Зуев, В.А.** Моделирование ледового сопротивления судов / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Д.А. Семенов // Труды НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева. 2011. №3 (90). С. 190–195.
 9. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение. 2001. – 512 с.
 10. Попадание льда под днище судна при плавании в ледовых условиях / В.И. Каштелян [и др.] // Теория прочности и проектирования судов, плавающих во льдах. – Н. Новгород: НГТУ им. Р. Е. Алексеева, 1995. С. 37–42.
 11. **Рабинович, М.Е.** О влиянии плотности льда на ледовое сопротивление движению судна // Труды ГПИ им. А.А. Жданова. 1973. Т. 29. Вып. 6.

*Дата поступления
в редакцию 22. 06.2012*

D.A. Semenov, V.A. Zuev

THE INFLUENCE OF CHANGE WATER AND ICE DENSITY ON SHIPS RESISTANCE IN BROKEN ICE

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

Purpose: Determination of ships ice qualities in the engineering process makes handle to model experiment. Modeling in the ice basin, followed by the results recalculation on the full-scale ship of certain methods is carried out. In this connection the new material search are more fully satisfy the similarity condition, and the development of method for test results recalculation on full-scale ship of the partial similarity is of interest.

Methodology: The modeling method of the water and ice salinity in the ship model tests in broken ice is considered. Salinity is regarded as a main factor in changing water and ice density and consequently the ships resistance in broken ice.

Findings: The results of 1105 ship project model tests in sweet and salt water are presented. Theoretical and experimentally proved how salinity influences on ships resistance in the broken ice. The new design equation for the recalculation of model ice resistance in sweet water to salt are suggested.

Implications: The data analysis made it possible to experimentally corroborate and substantiate the method of results recalculation of model tests in sweet water on full-scale ship floating in salt water.

Originality/value: On the obtained formulas basis the determination method of ships ice resistance by means of model tests in the broken ice in the experimental model basin is developed.

Key words: ice conditions, ice resistance, broken ice, vessel, salinity, model test, modeling, recalculated from the model on the nature.

УДК 629.5.06

А.В. Рудницкий, В. И. Рудницкий

**МОДЕЛИ ПРОЦЕССА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ
ТЕХНИЧЕСКОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ СУДОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Обосновывается моделирование как единственный способ проведения исследований систем технической эксплуатации. Рассмотрены возможные варианты организации работ по обеспечению эксплуатационной готовности судов в зависимости от уровня надёжности судовой техники. Рассмотрены варианты организации экипажа, оценки технического состояния и обнаружения отказов, оперативного управления системой технической эксплуатации флота.

Обеспечение эксплуатационной готовности группы судов рассматривается как многовариантная задача, результат решения которой - выбор оптимального варианта в зависимости от уровня надёжности судовой техники. В качестве критерия оценки эффективности приняты затраты на содержание рассматриваемой группы судов за единицу времени эксплуатации.

Обоснована возможность аппроксимации процесса изменения технического состояния судового оборудования однородным Марковским случайным процессом. Задача выбора оптимального варианта системы технической эксплуатации рассматривается как задача управления случайным процессом, где система технической эксплуатации судов рассматривается как стохастичная линейная сеть.

Ключевые слова: моделирование, системы технической эксплуатации, надёжность, управление, судно, Марковский случайный процесс.

Основными направлениями совершенствования технической эксплуатации флота, от которых зависит эффективность его использования, являются:

- обеспечение нормативной эксплуатационной надёжности;
- применение средств диагностики технического состояния;
- совершенствование организации технического обслуживания и ремонта;
- автоматизация управления технической эксплуатацией.

Ввиду огромной сложности и стоимости системы технической эксплуатации (ТЭ) исключается возможность проведения многовариантных исследований с помощью натурального эксперимента (метод «проб и ошибок» с большим временем ожидания проб) в целях выбора наиболее эффективного варианта.

Остается единственный способ проведения исследований – моделирование. Известно, что моделирование неизбежно ведет к отступлению от реальности. Однако в данном случае даже приближенный к действительности результат исследования позволит принять более объективные решения по совершенствованию системы ТЭ флота при существенном снижении экономического риска.

Исходя из отмеченных основных направлений совершенствования системы ТЭ, рассмотрим возможные варианты организации работ по обеспечению эксплуатационной готовности судов в зависимости от уровня надёжности судовой техники.

Экипаж может быть организован по следующим вариантам:

- экипаж выполняет только функции управления судном (судовождение, механизмы, системы) и не закреплен за судном постоянно, а осуществляет проводку судна в определенном районе;
- экипаж выполняет функции управления судном и проводит технические обслуживания (ТО) и ремонт, при этом разделен на группы: группа управления судном, группа ТО и ремонта, вспомогательная группа – обеспечения бытовых условий;
- экипаж функционирует по принципу совмещения профессий, т.е. совмещает функции

по судовождению с функциями по выполнению ТО в ограниченном объеме, и закреплен за судном постоянно.

Оценка технического состояния и обнаружения отказов может осуществляться по вариантам:

- с разборкой (при необходимости) механизмов, время оценки технического состояния будет зависеть от квалификации специалиста;
- с помощью переносных контрольно - диагностических приборов;
- с помощью бортового информационно – диагностического комплекса.

Обеспечение эксплуатационной готовности судов требует, чтобы управление базировалось на регулярной и достоверной информации о техническом состоянии судов и ремонтной базе. Расходы на содержание средств управления будут определяться количеством персонала и степенью автоматизации их труда.

Будем рассматривать следующие варианты оперативного управления системой ТЭ флота:

- нерегулярность и обобщенность информации по каждому судну и ремонтной базе, принятие решений при отсутствии автоматизации процесса обработки и анализа информации;
- регулярность информации по каждому судну и ремонтной базе, автоматизация процесса обработки и анализа информации;
- в дополнении к предыдущему варианту – выбор решения из нескольких, рекомендованных в результате автоматизированного анализа ситуации.

Таким образом, имеем многовариантную задачу, результатом решения которой должен быть выбор оптимального варианта в зависимости от уровня надежности судовой техники.

В качестве объекта моделирования будем рассматривать группу судов определенного J -типа. Пусть известно, что судов данного типа будет N_J . Уровень надежности принимаем, исходя из реально достижимых и возможных в перспективе значений, в пределах от T_{\min} до T_{\max} . В качестве показателя уровня надежности принимаем среднее время наработки между отказами – T_{cp} . Назначим ряд значений T_{cp} в указанном интервале $(T_0; T_1; \dots; T_n)$. С каждым значением $T_i (i = 0, \dots, n)$ будет связано определенное количество отказов в единицу времени λ_i . Зная количество судов данного типа N_J , можно определить количество требований (судобслуживаний) в единицу времени:

$$\Lambda_J = N_J \lambda_i. \quad (1)$$

Величина Λ_J будет основной характеристикой потока заявок от группы судов данного типа.

Для оценки процесса функционирования системы ТЭ введем следующие экономические параметры:

- C_3 – суммарная заработная плата персонала, занятого ТО и ремонтом всей группы судов J -типа за период времени t ; t – текущее время определенного периода эксплуатации;
- C_M – стоимость материалов, сменно – запасных частей (СЗЧ), обменного фонда (ОФ) оборудования, используемых на ТО, и ремонт группы судов за период времени t .

Можно полагать, что $C_3 = f(T_{cp})$ и $C_M = f(T_{cp})$. Можно принять, что количество ТО в зависимости от уровня надежности аналогично зависимости числа отказов от уровня надежности за один и тот же период времени.

Для моделирования системы ТЭ примем следующие допущения. Будем считать, что ТО в большинстве случаев проводится без специальной остановки судна. Примем, что поток заявок на ТО будет поступать с интенсивностью связанной с интенсивностью отказов соотношением:

$$\Lambda_{TO} \approx \Lambda_J = f(T_{cp}). \quad (2)$$

Примем следующие интенсивности отказов, устраняемых на специальных остановках (вывод судна из эксплуатации) и в ходу судна:

$$\begin{aligned} \lambda_x &= \alpha \Lambda_J, \\ \lambda_0 &= \beta \Lambda_J, \end{aligned} \quad (3)$$

где α и β – коэффициенты, определяющие долю отказов, устраняемых в ходу и при выводе судна из эксплуатации.

Действия, направленные на обеспечение эксплуатационной готовности судна при любой форме организации системы ТЭ, оцениваются, главным образом, экономическими и временными параметрами. Ставя задачу оценить эффективность системы ТЭ, логично принять за критерий оценки эффективности затраты на содержание группы рассматриваемых судов J – типа за единицу времени эксплуатации. Такой критерий оценки эффективности численно определяет изменение энтропии системы ТЭ [1]. Если по каждому варианту системы сравнивать между собой затраты, отнесенные к единице времени, то в том случае, когда будем иметь их наибольшую величину, можно делать вывод о том, что энтропия системы увеличивается и для сохранения её постоянного уровня (т.е. обеспечения в эксплуатационной готовности определенного количества судов) требуется подвести к системе больше энергии в виде затрат на содержание. Когда затраты для обеспечения эксплуатационной готовности того же количества судов меньше, это показывает, что для поддержания постоянного уровня энтропии требуется потратить меньше энергии. Следовательно, если главная цель обеспечивается меньшими затратами средств, то такой вариант системы ТЭ более эффективен.

Известно, что процесс изменения технического состояния судов является стохастическим, подчиняется законам распределения случайных величин. Нами была обоснована возможность аппроксимации процесса изменения технического состояния судового оборудования однородным Марковским случайным процессом [1; 2]. В связи с этим задача выбора оптимального варианта системы ТЭ должна рассматриваться как задача управления случайным процессом.

Систему ТЭ судов будем рассматривать как стохастичную линейную сеть, в которой потоки отказов и заявок на ТО от судов (основных средств системы) поступают по закону Пуассона, а время устранения отказов (ремонтов) и выполнения работ по ТО ремонтной базой (средствами обеспечения системы), а также время принятия решения при управлениями действиями основных средств и средств обеспечения, распределены по показательному закону [3].

На рис. 1 представлены графы структур сетей для случаев, когда ТО и ремонт выполняются: экипажем и БФСК (рис. 1, а), МРБ и БФСК (рис. 1, б), экипажем, МРБ и БФСК (рис. 1, в). Каждое звено структуры сети будем рассматривать как систему массового обслуживания (СМО), в которую поступает поток отказов и заявок на ТО (требований) от судов (источника требований). Источник требований и совокупность СМО образует стохастическую линейную сеть.

Как видно из рис. 1, поток требований из i -й СМО в j -ю измеряется интенсивностью отказов или заявок на ТО. Поток требований в отдельной СМО сети является суперпозицией потоков требований, поступающих из других СМО сети.

Рассмотрим в качестве примера вариант системы ТЭ, представленной графом на рис. 1, а. Система “0” – источник требований (суда). Система “1” – многоканальная СМО, где в качестве каналов обслуживания будем рассматривать членов экипажей судов, обеспечивающих безотказность судового оборудования. Система “3” – многоканальная СМО, где каналами обслуживания будут функциональные подразделения БФСК. Потоки отказов и заявок на ТО измеряются соответствующими интенсивностями $\lambda_1 = \Lambda_{01}$; $\lambda_3 = L_{13}$; $\lambda_0 = L_{10} + L_{30}$, величины которых могут быть определены из анализа статистических данных по надежности судового оборудования, навигационному ремонту судов, близких по типу и назначению.

Рассмотрим, каким образом определяется время пребывания требования в сети, т.е. время восстановления требуемого технического состояния за счет ТО или ремонта (устранение отказа).

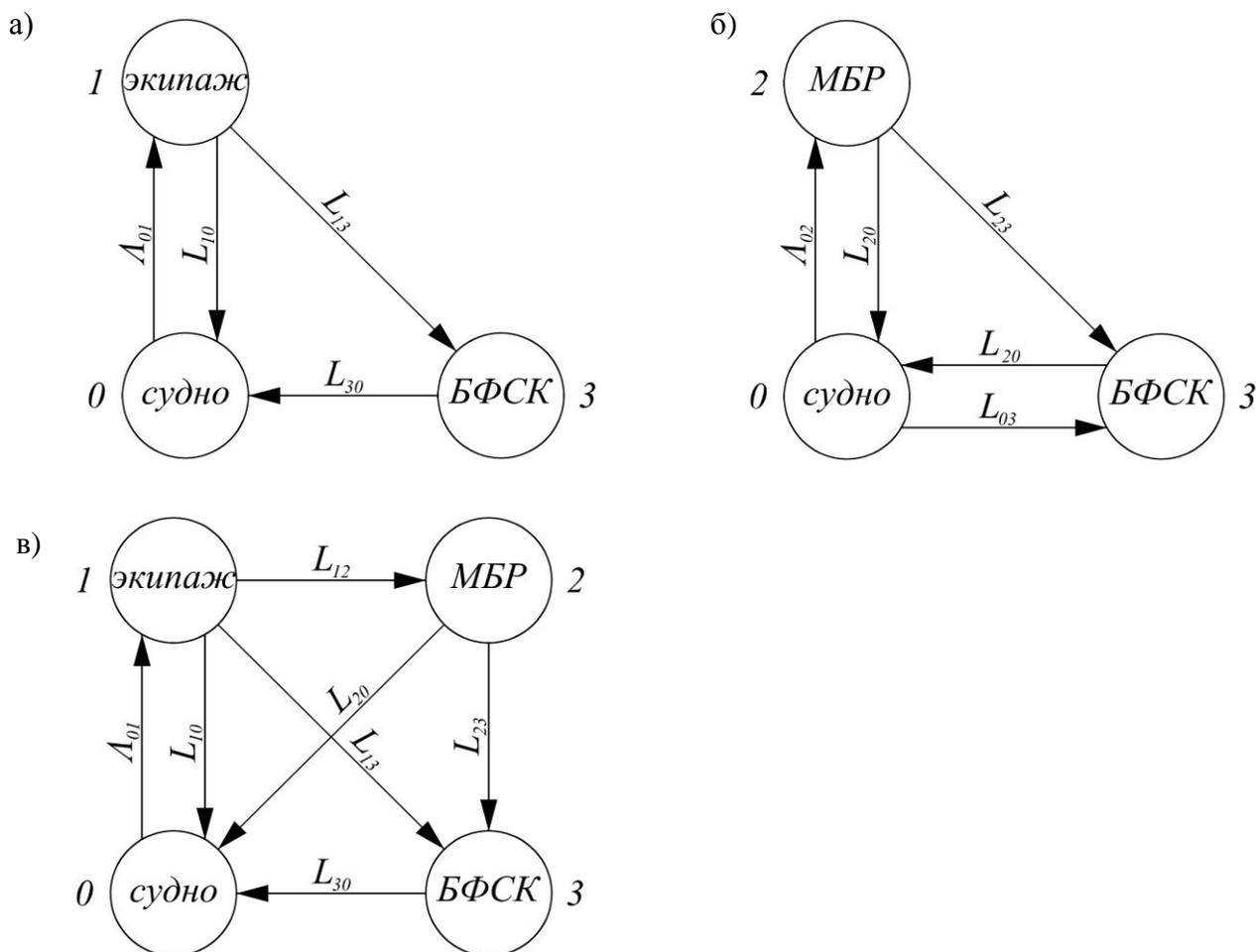


Рис. 1. Графы функционирования системы технической эксплуатации судового оборудования:

МРБ – мобильная ремонтная бригада; БФСК – база флота судоходной компании (судоремонтной компании)

Среднее время пребывания в i -й СМО может быть представлено в общем виде:

$$U_i = U_i^1 + U_i^2 + U_i^3 + U_i^4, \tag{4}$$

где U_i^1 – время ожидания обслуживания в i -й СМО; U_i^2 – время поиска неисправности в i -й СМО; $U_i^3 = T_{\text{р}}$ – время принятия решения по устранению неисправности (отказа); U_i^4 – время обслуживания в i -й СМО.

Применение переносных или стационарных диагностических приборов, бортовых диагностических комплексов, АСУ – технической эксплуатацией с разной степенью автоматизации позволит менять величины $U_i^1, U_i^2, U_i^3 = T_{\text{пр}}$.

При определении экономических затрат на ТО и ремонт важна величина времени простоя, вызванная с выводом судна из эксплуатации в связи с устранением отказов.

Среднее время для каждой СМО рассматриваемых сетей (рис. 1) будет соответственно U_1, U_2, U_3 . Время же пребывания в сети может быть определено по выражению [3]

$$\bar{U} = \sum_{i=0}^M \frac{\lambda_i}{\lambda_0} U_i. \quad (5)$$

Определив время пребывания требования в каждой СМО или в сети, можно составить аналитические выражения для функции экономических затрат. В качестве единицы измерения времени возьмем одни навигационные сутки. Составим аналитические функции экономических затрат для вариантов системы ТЭ. За базовую основу возьмем варианты организации работы экипажа. Рассмотрим вариант, когда экипаж состоит из функциональных групп. Этому варианту соответствует граф сети на рис. 1, а. Затраты на обеспечение эксплуатационной готовности группы судов составят

$$C^{\mathcal{E}} = \sum C_{TO} + \sum C_P, \quad (6)$$

где $\sum C_{TO}$ – суммарная стоимость всех видов ТО за навигацию, определяемая по C_3 и C_M . (Эта величина практически не меняется для заданного уровня надежности); $\sum C_P$ – суммарная стоимость всех видов внеплановых ремонтов за навигацию.

В свою очередь, исходя из рассмотрения процесса функционирования системы ТЭ,

$$\sum C_P = C_P^x + C_P^0, \quad (7)$$

где стоимость внеплановых ремонтов: C_P^x – без вывода судов из эксплуатации; C_P^0 – с их выводом из эксплуатации.

Стоимость внеплановых ремонтов без вывода судов из эксплуатации определяется по выражению

$$C_P^x = \alpha \lambda_1 C_0 t, \quad (8)$$

а стоимость внеплановых ремонтов с их выводом из эксплуатации определится как

$$C_P^0 = [\beta \lambda_1 U_1 (\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK}) + \lambda_3 U_3 (\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 - k_3 M_K)] t, \quad (9)$$

В выражениях (8) и (9) приняты допущения $\alpha + \beta = 1$, $\lambda_1 = \Lambda_J / 2$

и следующие обозначения величин:

t – текущее время навигационного периода (сутки); C_0 – зарплата экипажа, стоимость материалов и СЗЧ по одному судну (руб./судно); R_3 – навигационные расходы БФСК на одно судно (руб./судно, су.); \mathcal{E}_Φ – эксплуатационные расходы по одному судну на стоянке (руб./судно, с.); M_{TCK} – зарплата работников технической службы судоходной компании (ТСК) (руб./с.); M_K – зарплата экипажа судна в сутки (руб./судно, сут.); $k_1; k_2$ – коэффициенты, учитывающие долю затрат управленческого аппарата ТСК на группу рассматриваемых судов; k_3 – коэффициент, учитывающий неполный состав экипажа судна при ремонте в БФСК; λ_1 – интенсивность потока требований на СМО-1 (экипаж) (судно/сут.); λ_3 – интенсивность потока требований на СМО-3 (БФСК) (судно/сут.); U_1 – среднее время пребывания требования в СМО-1 (среднее время проведения ремонта экипажем) (сут.); U_3 – среднее время пребывания требования в СМО-3 (среднее время проведения ремонта БФСК) (сут.).

Стоимость ТО для рассматриваемого варианта будет складываться из затрат на ТО, проводимых экипажем без вывода судна из эксплуатации и при выводе из эксплуатации. По правилам технической эксплуатации ТО-2 выполняется без вывода судна из эксплуатации, а ТО-3 – с выводом. С учетом принятых допущений (2) и (3) стоимость проведения ТО определится как

$$C_{TO} = [k_4 \Lambda_{TO} U_{TO-2} (\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK}) + k_5 \Lambda_{TO} U_{TO-3} (\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK})] t, \quad (10)$$

где дополнительно к принятым ранее обозначениям величин среднее время пребывания требования в СМО-1 (экипаж) для соответствующих ТО обозначено:

U_{TO-2} – среднее время проведения ТО-2 (сут.); U_{TO-3} – среднее время проведения ТО-3 (сут.); $k_4; k_5$ – коэффициенты, учитывающие долю ТО-2 и ТО-3 за навигационный период; Λ_{TO} – поток заявок на ТО (судно/сут.).

ТО-2 выполняется без вывода судна из эксплуатации во время стоянок под погрузо-разгрузочными операциями или при ожидании этих операций. Поэтому в выражении стоимости ТО (10) берем суточные затраты на содержание судна во время стоянки.

При составлении экономической функции необходимо стремиться к тому, чтобы их компонентами были только те затраты, которые наиболее характерны и позволяют проводить объективное сравнение разных вариантов системы ТЭ. По этим соображениям наиболее характерными будут затраты при выводе судна из эксплуатации и затраты на ТО, проводимые при стоянках судна под погрузо-разгрузочные операции. Поэтому в дальнейшем при составлении экономических функций для каждого описанного ранее варианта системы ТЭ не будем учитывать затраты на устранение отказов в ходу судна (без вывода судна из эксплуатации), т.е. величину выражения (8), так как величина затрат на устранение отказов в этом случае оценивается зарплатой экипажа, стоимостью материалов и СЗЧ. Эта величина практически не зависит от форм организации системы ТЭ. Компонента C_p^x является только функцией интенсивности отказов и численности экипажа.

Для варианта системы ТЭ на рис. 1, а приведем экономическую функцию

$$C_1^3 = [\beta\lambda_1 U_1(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK}) + \sum C_{TO} + \lambda_3 U_3(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 - k_3 M_K)]t, \quad (11)$$

При использовании переносных диагностических приборов для оценки технического состояния выражение (11) примет вид:

$$C_2^3 = [\beta\lambda_1 U_1(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + k_6 K_\delta) + \sum C_{TO} + \lambda_3 U_3(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 + k_6 K_\delta - k_3 M_K)]t, \quad (12)$$

где K_δ – стоимость диагностических приборов приведенная к одному судну в сутки (руб./судно, с.); k_6 – коэффициент амортизационных отчислений.

Когда управление системой ТЭ осуществляется с помощью средств автоматизации, экономическая функция (11) будет иметь вид

$$C_3^3 = [\beta\lambda_1 U_1(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + C_{ACV-1}) + \sum C_{TO} + \lambda_3 U_3(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 + C_{ACV-1} - k_3 M_K)]t, \quad (13)$$

где C_{ACV-1} затраты на исследование информационных задач автоматизированной системы управления (АСУ-1).

Подобные экономические функции могут быть построены для всех рассмотренных выше комбинаций компонентов системы ТЭ, когда экипаж состоит из функциональных групп (рис. 1, а).

Рассмотрим варианты системы ТЭ, когда экипажи не закреплены постоянно за судами, и осуществляют проводку судов в определенных районах (рис. 1, б). В этом случае все работы по ТО проводит МБР. Некоторые экономические функции (по аналогии рассмотренных выше), будут для граф сети иметь вид

$$C_{10}^{MBP} = [\beta\lambda_2 U_2(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + C_{MBP} - k_3 M_K) + \beta\lambda_2 U_2' \mathcal{E}_\Phi + k_4 \Lambda_{TO} U_{TO-2} C_{MBP} + k_5 \Lambda_{TO} U_{TO-3}(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + C_{MBP}) + \lambda_3 U_3(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 - k_3 M_K)]t, \quad (14)$$

$$C_{11}^{MBP} = [\beta\lambda_2 U_2(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + C_{MBP} - k_6 K_\delta - k_3 M_K) + \beta\lambda_2 U_2' \mathcal{E}_\Phi + k_4 \Lambda_{TO} U_{TO-2} C_{MBP} + k_5 \Lambda_{TO} U_{TO-3}(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + C_{MBP}) + \lambda_3 U_3(\mathcal{E}_\Phi + k_1 k_2 M_{TCK} + R_3 + k_6 K_\delta - k_3 M_K)]t, \quad (15)$$

где $C_{МБР}$ – расходы на содержание МРБ в сутки (руб./сут.); λ_2 – интенсивность потока требований на СМО-2 (МРБ) (судна/сут.); U_2 – среднее время пребывания требования в СМО-2 (среднее время проведения ремонта МРБ) (сут.), U_2' – среднее время ожидания обслуживания требования в СМО-2 (среднее время ожидания ремонта МРБ) (сут.).

Некоторые экономические функции вариантов системы ТЭ, когда экипаж сформирован по принципу совмещения профессий, а эксплуатационная готовность судов обеспечивается экипажем, МРБ и БФСК составлены по графу сети рис. 1, в.

$$C_{10}^{МБР} = [\beta' \lambda_1 U_1 (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК}) + \beta'' \lambda_2 U_2 \Theta_\Phi (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{МБР} - k_3 M_K) + \beta'' \lambda_2 U_2' \Theta_\Phi + k_4 \frac{\Lambda_{ТО}}{2} U_{ТО-2} C_{МБР} + k_5 \frac{\Lambda_{ТО}}{2} U_{ТО-3} (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{МБР}) + \lambda_3 U_3 (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + R_3 - k_3 M_K)] t, \quad (16)$$

$$C_{23}^{\text{Э+МБР}} = [\beta' \lambda_1 U_1 (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{ACV-1} + k_6 K_\delta) + \beta'' \lambda_2 U_2 (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{ACV-1} + C_{МБР} + k_6 K_\delta - k_3 M_K) + \beta'' \lambda_2 U_2' \Theta_\Phi + k_4 \frac{\Lambda_{ТО}}{2} U_{ТО-2} C_{МБР} + k_5 \frac{\Lambda_{ТО}}{2} U_{ТО-3} (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{МБР}) + \lambda_3 U_3 (\Theta_\Phi + k_1 k_2 M_{ТСК} + C_{ACV-1} + R_3 + k_6 K_\delta - k_3 M_K)] t, \quad (17)$$

где β', β'' – коэффициенты, определяющие долю отказов, устраняемых соответственно экипажем и МРБ при выводе судна из эксплуатации. При этом нужно учитывать, что $\beta = \beta' + \beta''$.

В представленных экономических функциях по каждому варианту системы ТЭ фигурируют только затраты на ТО-2 и ТО-3. Что касается ТО-1, то для сравнимости всех вариантов системы ТЭ объем работ по ТО учитывается в равной степени в функциях вида $C^{\text{Э}}$ и $C^{МБР}$ равенством величины потока заявок на техническое обслуживание $\Lambda_{ТО}$ при одном и том же уровне надежности судовой техники. Таким образом, учитывается весь поток заявок на ТО и затраты определяются через стоимость затрат на ТО-2 и ТО-3.

Из представленных моделей функционирования системы ТЭ очевидно, что затраты на содержание судов в эксплуатационной готовности зависят, прежде всего, от интенсивности отказов и потока заявок на ТО, т.е.

$$C = f(\lambda; \Lambda_{ТО}),$$

или же $C = f(T_{\text{ср}})$, так как средняя наработка между отказами $T_{\text{ср}}$, являясь функцией уровня эксплуатационной надежности, определяет суммарный поток заявок (требований) Λ_j .

В заключение отметим:

- модели процесса функционирования системы ТЭ судов построены при условии, что процессы в системе носят случайный характер и могут быть аппроксимированы Марковским случайным процессом типа гибели и размножения;
- модели системы ТЭ судов основаны на экономико-математическом моделировании процесса, при этом оценка эффективности варианта системы ТЭ ведется в зависимости от уровня надежности судового оборудования. Это позволяет с достаточной объективностью сравнить возможные варианты системы ТЭ, принимая решение с наименьшим экономическим риском.

Библиографический список

1. Рудницкий, А. В. Прогнозирование потребности в сменно-запасных частях и обменном фонде агрегатов судовых дизельных установок: дисс. ... канд. технич. наук. – Н. Новгород, 1998. 141 с.
2. Гнеденко, Б. В. Математические методы в теории надежности. / Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляев, А.Д. Соловьев. – М.: Наука, 1965. – 524 с.

3. **Кофман, А.** Массовое обслуживание, теория и приложения / А. Кофман, Р. Крюон. – М.: Мир, 1965. – 302 с.

*Дата поступления
в редакцию 22. 06.2012*

A.V. Rudnitsky, V.I. Rudnitsky

MODEL OF THE SYSTEMTECHNICAL SERVICE VESSELS

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

In this paper is proved the modeling as a unique way of conducting of researches of technical maintenance's systems. Possible variants of the organization of works on maintenance of operational readiness of vessels depending on level of reliability of ship equipment are observed here. Variants of the organization of crew, estimation of a technical condition and detection of failures, on-line control by system of technical maintenance of fleet are observed.

Maintenance of operational readiness of group of courts is observed as the multiple problem. Her solution's result - sampling of optimum variant depending on level of reliability of vessel equipment. The criterion of an estimation of efficiency - costs of observed group of courts for maintenance unit time.

This article include the substantiation by a homogeneous Markov random process of possibility of approximation of process of change of a technical condition of the ship equipment. The problem of sampling of optimum variant of system of technical maintenance is observed as a problem of management by a random process where the system of technical maintenance of courts is observed as stochastic linear network.

Key words: modeling, technical maintenance's systems, reliability, control, vessel, Markov random process.

УДК 629.12.011:624.046

В.В. Князьков

ВЛИЯНИЕ РАЗМЕРОВ ОБЛАСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ НАГРУЗКИ И ВОЗДУШНОЙ ПОЛОСТИ НА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается деформирование ледяного покрова от действия поперечной нагрузки. Решается задача изгиба тонкой пластины малого прогиба для случая, когда под частью поверхности пластины отсутствует упругое основание из-за наличия воздушной полости.

Ключевые слова: ледяной покров, судно на воздушной подушке, разрушение, метод конечных элементов.

Для стабилизации положения на внутренних водных путях и сохранения существующей воднотранспортной сети^{*} в 1996 г. была принята Федеральная целевая программа (ФЦП) "Внутренние водные пути России", которой Указом Президента Российской Федерации придан статус президентской. Постановлением правительства Российской Федерации от 5 декабря 2001 г. № 848 утверждена ФЦП "Модернизация транспортной системы России" [1].

Продление навигации на внутренних водных путях по-прежнему является важной народно-хозяйственной проблемой, актуальность решения которой возрастает в связи с переходом речных пароходств к новым условиям хозяйствования. Под продлением навигации понимают осуществление комплекса мероприятий, которые обеспечивают судоходство за пределами физической навигации.^{**} К основным мероприятиям текущего характера, согласно ФЦП, относится увеличение продолжительности навигации на единой глубоководной системе Европейской части России на 10–15 суток. Увеличение продолжительности навигации на одни сутки позволит перевести дополнительно более 300 тыс. т груза в сутки и получить дополнительные доходы в объеме около 25–30 млн руб. Экономия затрат в результате продления навигации достигается, как путем освоения дополнительных объемов перевозок грузов, которые передаются с других видов транспорта, в первую очередь с железнодорожного, так и путем выполнения того же объема перевозок меньшим числом судов. Работа ледокольных средств позволяет увеличить продолжительность навигации путем искусственного вскрытия и очищения водных путей ото льда. Объем ледокольных работ и сроки их выполнения зависят от гидрометеорологических условий, которые складываются в каждый период навигации. Повышение объемов и эффективности перевозок в физическую навигацию во многом определяется и своевременной расстановкой флота в ранневесенний и позднеосенний периоды. Причем в современных условиях, когда пополнение флота потеряло плановый характер, объемы постройки новых судов крайне ограничены, и перевозчики грузов водным путем вынуждены решать транспортные задачи имеющимися в их распоряжении средствами, происходит и своеобразная переоценка значимости характеристик ледокольных и транспортных средств.

Принципиально новым средством разрушения ледяного покрова и повышения эффективности ледоколов стало использование судов на воздушной подушке. Опыт эксплуатации ледокольных судов на воздушной подушке (ЛСВП), построенных в нашей стране и за рубежом, показывает, что данный способ борьбы с ледовыми затруднениями имеет большие преимущества и перспективы [2, 3].

© Князьков В.В., 2012.

^{*}С 1991 г. произошло значительное сокращение объема перевозок и финансирования содержания внутренних водных путей.

^{**}Физическая навигация – это период судоходства по свободной ото льда воде на определенном участке пути.

Во время экспериментальных исследований разрушения льда судами на воздушной подушке способом давления отмечалось (рис. 1), что разрушение ледяного покрова может происходить как при наличии воздушной полости, так и при ее отсутствии. В первом случае при вполне определенных размерах воздушной полости лед разрушается под действием собственной тяжести. Когда полость не образуется, то его разрушение происходит от изгиба ледяного покрова при действии на него давлений в воздушной подушке. Решение задачи об изгибе ледяной пластины позволяет установить связь между давлением, размерами воздушной подушки и толщиной льда.



Рис. 1. Испытание состава: ледокол "Ока"+ЛПВП-107П на Волге

В режиме парения над водой под корпусом судна на воздушной подушке образуется впадина, глубина которой равна

$$h_{\text{вп}} = \frac{p_{\text{вп}}}{\rho_{\text{в}} g}, \quad (1)$$

где $p_{\text{вп}}$ – давление в воздушной подушке; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды; g – ускорение свободного падения.

При движении ЛСВП на ледяной покров воздушная полость заходит под лед и распространяется под ним. Эта полость устраняет реакцию упругого основания (воды) и равновесие ледяного покрова достигается лишь силами упругости. Считается, что воздух из воздушной подушки ЛСВП при его движении на кромку льда начинает распространяться под ним в виде полости, если выполняется следующее условие:

$$h_{\text{вп}} > \frac{\rho_{\text{л}} h_{\text{л}} + \rho_{\text{сн}} h_{\text{сн}}}{\rho_{\text{в}}}, \quad (2)$$

где $h_{\text{л}}$, $h_{\text{сн}}$ – толщина льда и слоя снега на нем; $\rho_{\text{л}}$, $\rho_{\text{сн}}$ – плотность льда и снега. При этом постоянное существование такой полости возможно тогда, когда линия, на которой прогибы нижней поверхности ледяного покрова равны глубине впадины, не выходят за ширину воздушной подушки в процессе разрушения [4].

Проанализируем статический изгиб ледяного покрова. Модель ледяного покрова примем в виде тонкой полубесконечной изотропной пластины постоянной толщины, лежащей на упругом основании винклеровского типа. Нагрузку от ЛСВП представим как систему распределенных по площади воздушной подушки давлений.

Следует отметить, что на механизм деформации льда от поперечной нагрузки специалисты смотрят по-разному: одни считают, что ко льду применима классическая теория изги-

ба, по существу пренебрегающая поперечными сдвигами; другие же, наоборот, полагают, что в силу специфических свойств льда как материала поперечные сдвиги играют важную, возможно, даже преобладающую роль в его деформации. Результаты исследований, полученные в [5], свидетельствуют о том, что при размерах ледяного покрова, которые характерны для случая его разрушения при создании судоходного канала, поперечные сдвиги не оказывают сколько-нибудь существенного влияния на величину прогибов ледяного покрова и возникающих в нем внутренних моментов и напряжений даже при очень медленном нагружении.

Поставленную задачу будем решать методом конечных элементов (МКЭ). Разновидности МКЭ (*методы перемещений и сил*), взаимно дополняющие друг друга, приводят к тому, что МКЭ в варианте метода перемещений более точно определяет конфигурацию деформируемого тела, а МКЭ в варианте метода сил точнее характеризует его напряженно-деформированное состояние (НДС). Стремление к точному расчету изменений геометрии конструкции, исходя из перемещений ее узлов и параметров ее НДС, привело к тому, что вместо "чистокровных" моделей МКЭ в вариантах методов перемещений и сил были получены смешанные конечные элементы. Смешанные модели обеспечивает функционал Хеллингера-Рейсснера $\Pi_{HR}^{(e)}$. Данный функционал является двухполевым по своей внутренней природе, одновременно включающим поля перемещений и напряжений в пределах всего элемента, поэтому такие смешанные модели легче удовлетворяют требованиям совместности на границе смежных элементов. При этом не требуется численного дифференцирования перемещений для определения изгибающих моментов, так как последние входят в вектор обобщенных координат элемента. Вектор обобщенных координат треугольного элемента (рис. 2) содержит прогибы w_i вершин треугольника и нормальные изгибающие моменты M_{ni} на серединах его сторон [6]:

$$\{q\}^{(e)} = \{w_1, w_2, w_3, M_{n1}, M_{n2}, M_{n3}\}. \tag{3}$$

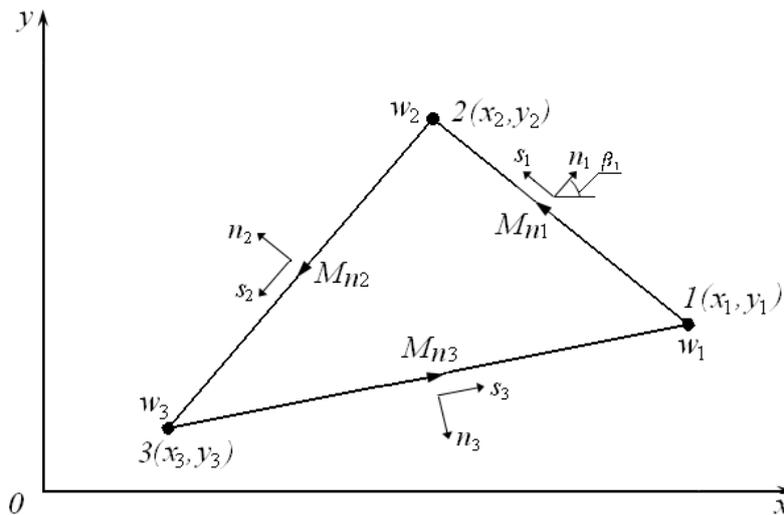


Рис. 2. Треугольный элемент смешанного типа

Функционал Хеллингера-Рейсснера с учетом упругого основания имеет вид

$$\begin{aligned} \Pi_{HR}^{(e)} = & \iint_{A^{(e)}} \{ (M_{x,x} + M_{xy,y})w_{,x} + (M_{y,y} + M_{xy,x})w_{,y} - \frac{12}{Eh^3} [(1 + \mu)M_{xy}^2 + \frac{1}{2}(M_x^2 + M_y^2) - \\ & \mu M_x M_y] + \frac{1}{2}kw^2 - qw \} dx dy - \oint_{S_1^{(e)}} w_{,s} M_{ns} dS - \oint_{S_2^{(e)}} w \bar{V}_n dS - \oint_{S_3^{(e)}} \bar{w}_{,n} M_n dS, \end{aligned} \tag{4}$$

в котором $A^{(e)}$ – площадь элемента; h – толщина пластины; $k = \rho_b g$ – коэффициент постели; q – нормальное давление; E – модуль упругости; μ – коэффициент Пуассона; нижние индексы после запятой означают производные.

Исследуем два случая. В первом – упругое основание под ледяным покровом будем считать непрерывным, а во втором – имеется воздушная полость переменных размеров, давление в которой равно давлению в воздушной подушке. Расчетные схемы приведены на рис. 3; сеточная аппроксимация на рис. 4.

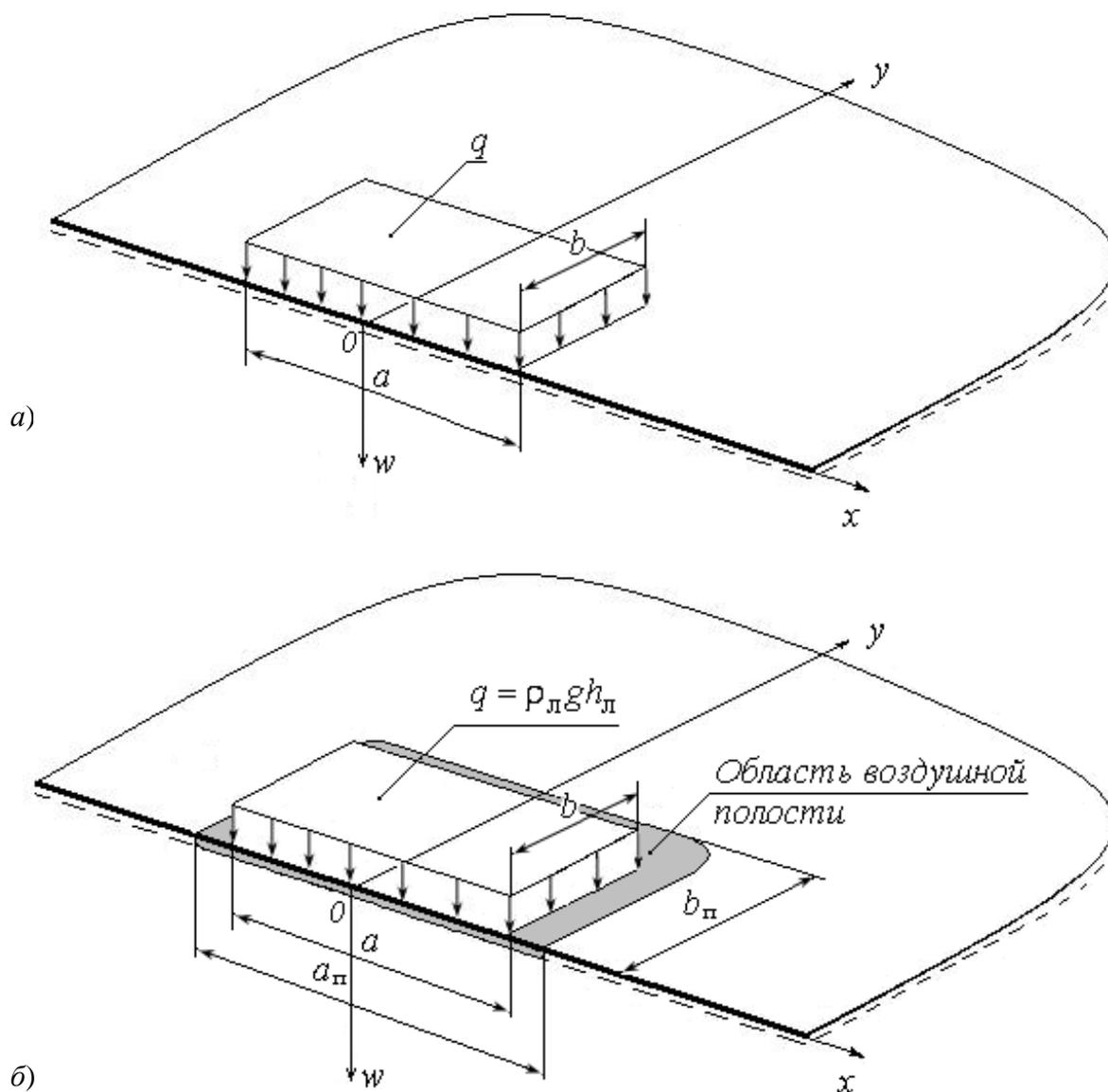


Рис. 3. Расчетные схемы:
 a – полость отсутствует; b – наличие полости

В случае распространения воздушной полости подо льдом в зависимости от ее размеров меняется характер нагружения ледяного покрова:

$$- a_n < a \text{ и } b_n < b.$$

В области $2x < a_n$ и $y < b_n$ давление на лед сверху и снизу одинаково и равно давлению в воздушной подушке. Силы поддержания отсутствуют, и лед находится под действием сил тяжести.

В области $a_n < 2x < a$ и $b_n < y < b$, где нет воздушной полости, на лед действует давление, равное давлению в воздушной подушке:

$$- a_{\Pi} = a \text{ и } b_{\Pi} = b.$$

В пределах всей области $2x \leq a_{\Pi}$ и $y \leq b_{\Pi}$ давление на лед сверху и снизу одинаково и равно давлению в воздушной подушке. Лед находится под действием сил тяжести:

$$- a_{\Pi} > a \text{ и } b_{\Pi} > b.$$

В этом случае в зоне воздушной полости при $a < 2x \leq a_{\Pi}$ и $b < y < b_{\Pi}$ создается подпор с давлением, равным давлению в воздушной подушке, т.е. на ледяной покров действует давление $\Delta q = p_{\text{вп}} - \rho_{\text{л}} g h_{\text{л}}$, направленное вверх.

В результате решения были получены поля безразмерных прогибов $w_i = w(x_i, y_i)$ и моментов $M_{ni} = M(x_i, y_i)$. Значения моментов использовались в дальнейшем для нахождения полей напряжений. За критерий прочности при изгибе ледяного покрова принята величина предельного растягивающего напряжения, действующего у верхней или нижней поверхности пластин:

$$\overline{M}_{\text{пред}} = \frac{\sigma_p h_{\text{л}}^2 \alpha^2}{6q}, \tag{5}$$

где $\alpha = \sqrt[4]{\frac{k}{D}}$ – параметр упругого основания; D – цилиндрическая жесткость ледяной пластины; σ_p – предел прочности на растяжение.

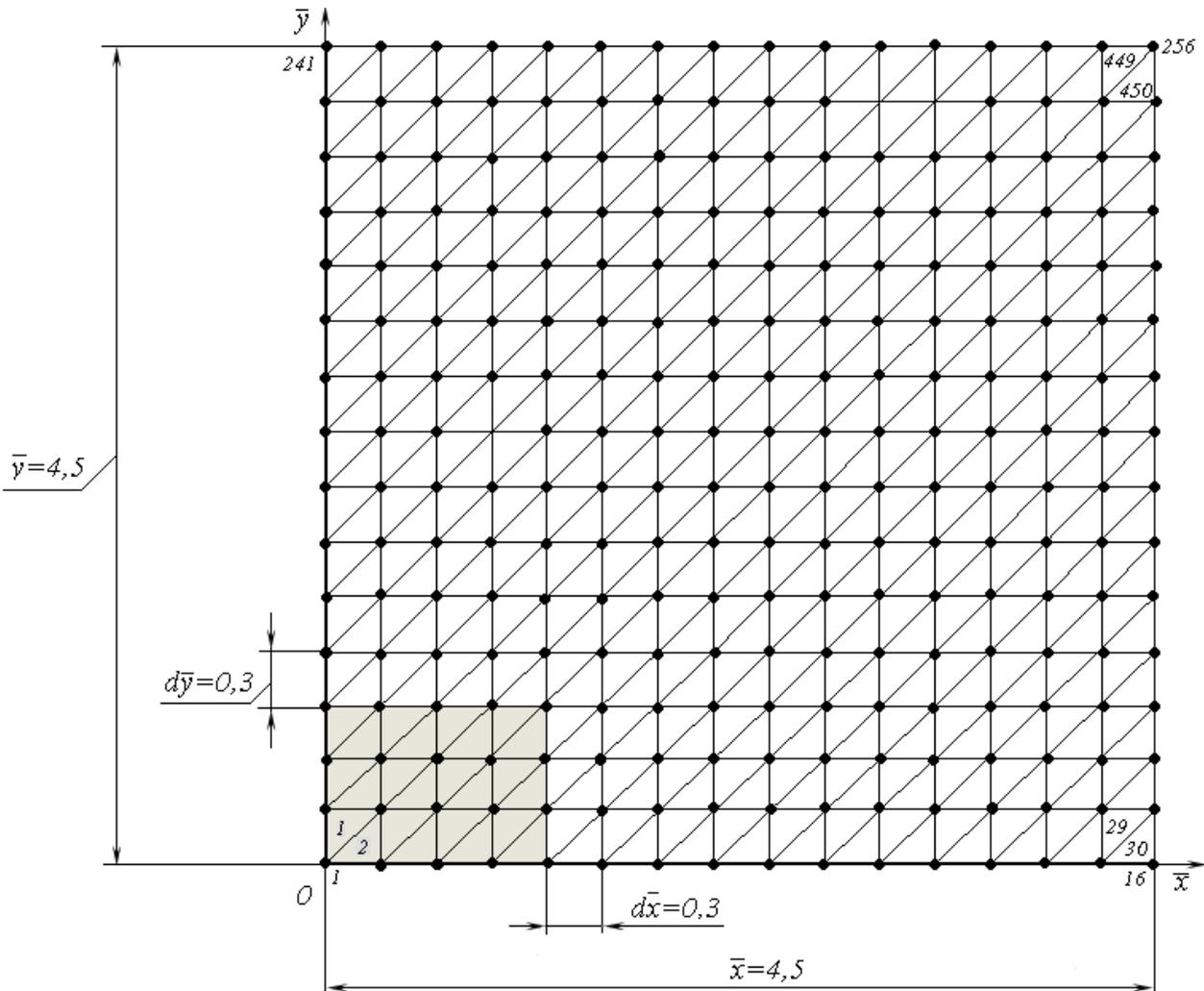


Рис. 4. Сеточная аппроксимация расчетной области с учетом симметрии:
256 – число узлов; 450 – число элементов

Полученные решения позволяют сделать следующие основные выводы:

1. Возникновение воздушной полости и распространение ее подо льдом за пределы действия давления ЛСВП приводит к увеличению изгибающего момента, что, в конечном итоге, равнозначно уменьшению площади действия $q = \rho_{\text{л}} g h_{\text{л}}$, т.е. размеров ЛСВП в плане (см. рис. 3, а, б). При этом наличие воздушной полости заметней сказывается для более тонкого льда ($h_{\text{л}} \leq 0,5 \text{ м}$; рис. 5, б).

2. Влияние величины дополнительного подпора на элементы изгиба уменьшается с увеличением площади распределения давления от ЛСВП (рис. 6). Коэффициенты k_1 и k_2 представляют собой отношения максимальных значений изгибающих моментов и прогибов при значениях $\Delta \bar{q} = 0,10$ и $\Delta \bar{q} = 0,15$ соответственно:

$$k_1 = \frac{\bar{M}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,10)}{\bar{M}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,15)}; \quad k_2 = \frac{\bar{w}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,10)}{\bar{w}_{\text{max}}(\Delta \bar{q} = 0,15)}.$$

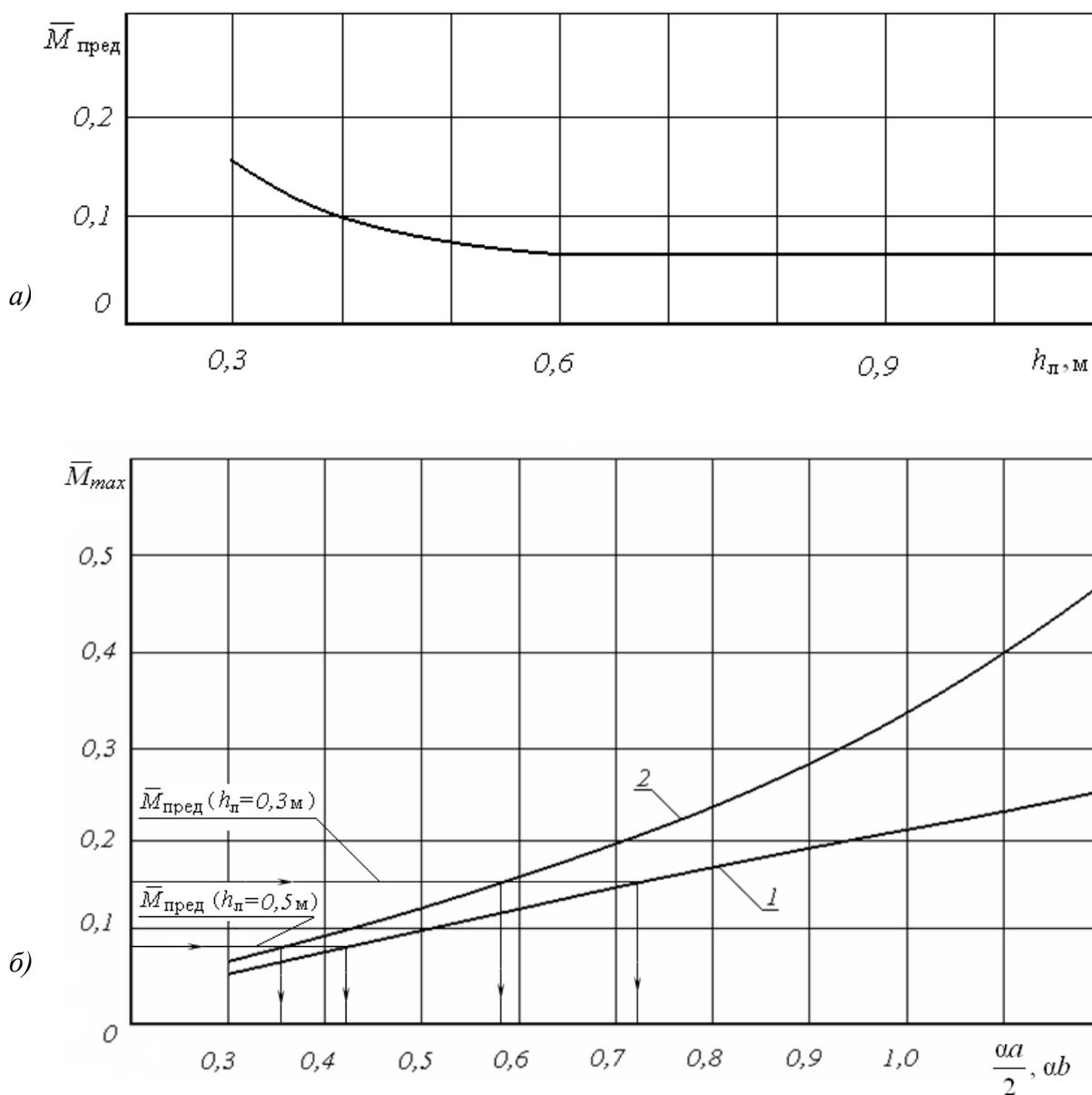


Рис. 5. Влияние воздушной полости на НДС ледяного покрова:
1 – полость отсутствует; 2 – наличие полости

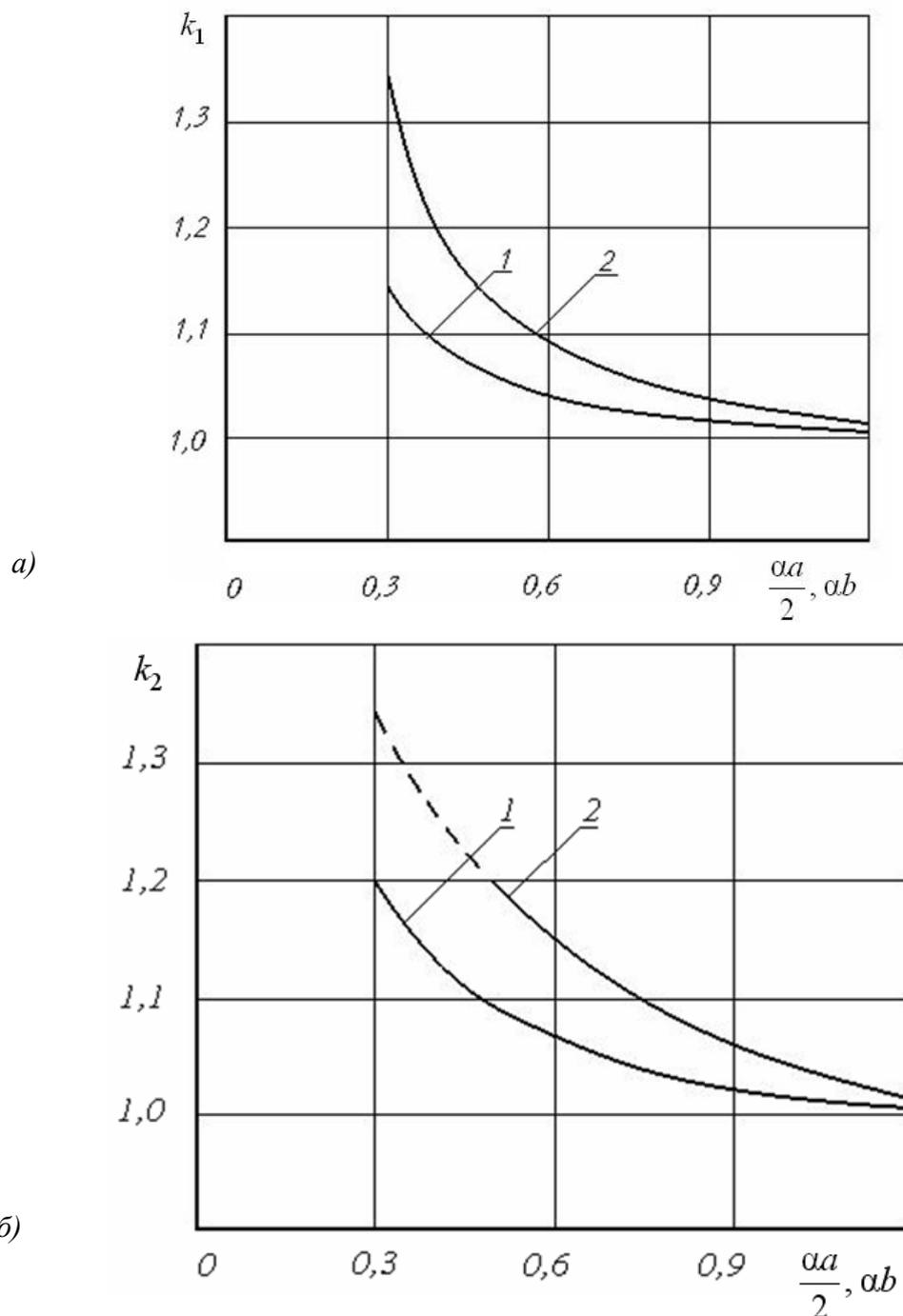


Рис. 6. Влияние давления в воздушной подушке на значение изгибающего момента (а) и прогиб ледяного покрова (б):

$$1 \frac{\alpha a_{\text{п}}}{2} = \frac{\alpha a}{2} + 0,3 \quad ; \quad 2 \frac{\alpha a_{\text{п}}}{2} = \frac{\alpha a}{2} + 0,6$$

3. Значение размера зоны распределения нагрузки вдоль оси x при заданном значении вдоль оси y , определенное по следующей зависимости, соответствует оптимальному, т.е. минимальному, значению необходимого давления:

$$x_0^{\text{opt}} = 1,774 + 0,480y_0 - 0,111y_0^2, \quad (6)$$

где $y_0 = \alpha b$, $x_0 = \alpha a$.

4. Зависимость, полученная для случая отсутствия воздушной полости, может слу-

жить нижней границей оценки величины давлений, необходимых для разрушения льда ЛСВП:

$$q \geq \bar{q} \sigma_p h_n^2 \alpha^2, \quad (7)$$

$$\text{где } \bar{q} = 1,6 \left[\left(0,64 + \frac{0,57}{y_0} \right) - \left(0,26 + \frac{0,16}{y_0} \right) x_0 + \left(4,86 + \frac{4,88}{y_0} \right) 10^{-2} x_0^2 \right].$$

5. По графикам, приведенным на рис. 5, б, можно определить потребные размеры зоны нагружения ледяного покрова (нижняя граница площади воздушной подушки).

6. Полученные результаты согласуются с ранее полученными выводами для случая центрального нагружения [7].

Библиографический список

1. Концепция развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации: [http://www.mintrans.ru/Pressa/Conception_Water_Trans.htm].
2. Зуев, В.А. Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
3. Зуев, В.А. Оценка эффективности ледокольных средств / В.А. Зуев, В.В. Князьков // Речной транспорт. 1997. № 4. С. 32–33.
4. Двойченко, Ю.А. Численная модель разрушения ледяного покрова при движении СВП с низкой скоростью // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. им. А.А. Жданова. Горький, 1984. С. 81–88.
5. Панфилов, Д.Ф. О механизме поперечного изгиба у льда // Журнал технической физики. 1979. Т. 49. № 10. С. 2121–2126.
6. Шахверди, Г.Г. Ударное взаимодействие судовых конструкций с жидкостью / Г.Г. Шахверди. – СПб.: Судостроение, 1993. – 256 с.
7. Князьков, В.В. Влияние воздушной полости на напряженно-деформированное состояние ледяного покрова // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. им. А.А. Жданова. Горький, 1984. С. 66–69.

Дата поступления
в редакцию 22.06.2012

V. Knyazkov

EFFECT OF SIZE DISTRIBUTION OF LOAD AND THE AIR CAVITY ON THE STRESS-STRAIN STATE OF ICE COVER

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

Extension of navigation on inland waterways is an important problem. A fundamentally new means of destruction of the ice cover and efficiency was the use of icebreakers icebreaking hovercraft. We analyze the static bending of the ice cover. The model adopted by the ice cover in the form of a thin semi-infinite isotropic plate of constant thickness, resting on an elastic foundation. This problem is solved by finite element method. The conclusions about the influence of air cavities of different configurations on the stress-strain state of the ice cover. The necessary size of the loading zone of the ice cover (lower boundary of the area of the air cushion).

Key words: ice cover, hovercraft, fracture, finite element method.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.311.1

П.Д. Лежнюк, В.А. Комар

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯ КАЧЕСТВА ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ ПРИ ОПТИМИЗАЦИИ ЕЕ СХЕМЫ

Винницкий национальный технический университет, Винница, Украина

Рассматривается критериальная модель интегрального показателя качества функционирования распределительной электрической сети, позволяющего оценить способность сети выполнять свои основные функции, в том числе в состояниях с пониженным уровнем производительности и с меньшей эффективностью.

Предложенный показатель можно использовать для оптимизации мест секционирования распределительной сети.

Ключевые слова: распределительная электрическая сеть, критериальный метод, качество функционирования.

Введение

Оптимизацию режима неоднородной распределительной электрической сети можно выполнить или снижением степени неоднородности, или принудительным изменением токораспределения с целью приблизить его к токораспределению в однородной сети [1]. В первом случае устраняется причина, то есть собственно неоднородность, во втором – только ее следствие: неэффективное токораспределение. Поэтому в первом случае обеспечивается оптимальность режима для всех вариаций нагрузки, а во втором – необходимы устройства контроля за изменениями параметров режима и соответствующего управления токораспределением. Одним из способов коррекции токораспределения является секционирование распределительной электрической сети. Существует ряд методов для определения мест секционирования [2], но все они в качестве критерия оптимальности принимают минимум потерь при ограниченной длине фидера. При этом они не позволяют учесть некоторые объективные изменения в режимах сетей, например, из-за возрастающего объема альтернативных и возобновляемых источников энергии (АВИЭ) [3]. Поскольку АВИЭ влияют на надежность и качество электроснабжения потребителей, то оптимизация только по критерию минимума потерь является не полной.

Поскольку электроэнергетика относится к тем сложным системам, для которых, особенно при рыночных отношениях, не достаточно характеристики отказа в функционировании только в форме «все или ничего», то необходимо оценивать показатели качества функционирования, характеризующие способность системы выполнять свои основные функции с пониженным уровнем производительности, т. е. с меньшей эффективностью [4]. Поскольку в электроэнергетических системах (ЭЭС) присутствует некоторая избыточность, то отказы некоторых (или даже многих) элементов приводят лишь к частичному ограничению возможностей системы, т. е. имеются дополнительные способы выполнения требуемых задач, хотя, возможно, и с пониженной эффективностью.

Из-за необходимости учета значительного количества технико-экономических показателей электрической сети для оценки качества ее функционирования возникает задача опре-

деления интегрального показателя. Как отмечается в [5], общие требования, которым должен отвечать такой показатель, есть: отображение объективной реальности; оценка эффективности, качества и оптимальности; возможность физического и абстрактного толкования; возможность вычисления, хотя бы с использованием ЭВМ; нормирование и отображение "крайних" состояний системы с учетом потенциально и реально возможных; должен быть в определенной мере обобщающим (характеризовать отдельные подсистемы и системы в целом во всех жизненных циклах); должен легко раскладываться на частичные показатели и объединяться в обобщенные; должен иметь теоретическую основу и позволять разрабатывать новую теорию или развивать старую; владеть эвристичностью, позволять принимать решение на основании опыта и интуиции и т.п.

К свойствам электрической сети как технической системы, которые определяют ее качество функционирования, относятся надежность, экономичность и безопасность, а при определенных требованиях и живучесть (рис. 1) [4, 6, 7].



Рис. 1. Свойства, которые определяют качество функционирования электрической сети

Целью статьи является математическое моделирование интегрального показателя качества функционирования электрических сетей, позволяющего оценить способность сети выполнять свои основные функции с пониженным уровнем производительности, то есть с меньшей эффективностью.

Математическое моделирование качества функционирования электрической сети

Основные задачи, которые ставятся перед распределительной электрической сетью, это надежное и качественное электроснабжение потребителей при наименьших потерях активной мощности. Эксплуатационные затраты электрической сети могут быть записаны:

$$Z = Z(\Delta P) + Z(\omega) + Z(\delta U), \quad (1)$$

где $Z(\Delta P)$ – затраты на покрытие потерь мощности; $Z(\omega)$ – затраты на покрытие ущерба потребителю от недоотпуска электрической энергии; $Z(\delta U)$ – затраты на возмещение ущерба потребителю, связанного с несоответствующим качеством электроэнергии.

Для оперативной оценки от затрат (1) можно перейти к выражению в мощностях:

$$F = \Delta P + P(\omega) + P(\delta U), \quad (2)$$

где ΔP – потери активной мощности; $P(\omega)$ – недоотпущенная мощность из-за отказов электрооборудования; $P(\delta U)$ – мощность, эквивалентная ущербу, вызванному некачественной электрической энергией.

Аппроксимируем зависимость (2) в функции от параметров, определяющих величину P – значение коэффициентов токораспределения C и уровней напряжения в узлах сети U , в виде полинома:

$$F = \sum_{i=1}^m a_i C_i^{\beta_i} U_i^{\delta_i} \Rightarrow \min, \quad (3)$$

где a_i и β_i, δ_i – постоянные коэффициенты аппроксимации.

Используя критериальный метод [7], позингом (3) приведем к критериальному виду:

$$F_* = \sum_{i=1}^m \pi_i C_{i*}^{\beta_i} U_{i*}^{\delta_i}, \quad (4)$$

где $F_* = F/F_{\min}$, $C_{i*} = C_i/C_{i0}$, $U_{i*} = U_i/U_{i0}$ – относительные значения соответственно технико-экономического показателя F , коэффициентов токораспределения и напряжений в узлах схемы; F_{\min} – технически реализуемое минимальное значение технико-экономического показателя; C_{i0}, U_{i0} – значения коэффициентов токораспределения и напряжений в узлах схемы,

которые соответствуют P_{\min} ; $\pi_{i0} = \frac{a_i C_{i0}^{\beta_i} U_{i0}^{\delta_i}}{P_{\min}}$ – критерии подобия [8].

В критериальном методе прямой задаче вида (3) соответствует двойственная задача:

$$D = \prod_{i=1}^m \left(\frac{a_i}{\pi_i} \right)^{\pi_i} \Rightarrow \max, \quad (5)$$

где $\pi_i = \pi_{i0} \cdot \frac{C_{i*}^{\beta_i} U_{i*}^{\delta_i}}{F_*}$.

В соответствии с критериальным методом $P_{\min} = D_{\max}$ [8], то есть можно получить в критериальном виде двойственную функцию (5):

$$\frac{D}{D_{\max}} = D_* = \prod_{i=1}^m \left(\frac{a_i}{\pi_i} \right)^{\pi_i} \cdot \left(\frac{\pi_{i0}}{a_i} \right)^{\pi_{i0}},$$

где π_{i0} – критерии подобия, соответствующие F_{\min} и D_{\max} . Графически соотношение между критериальными зависимостями прямой и двойственной задач показаны на рис. 2.

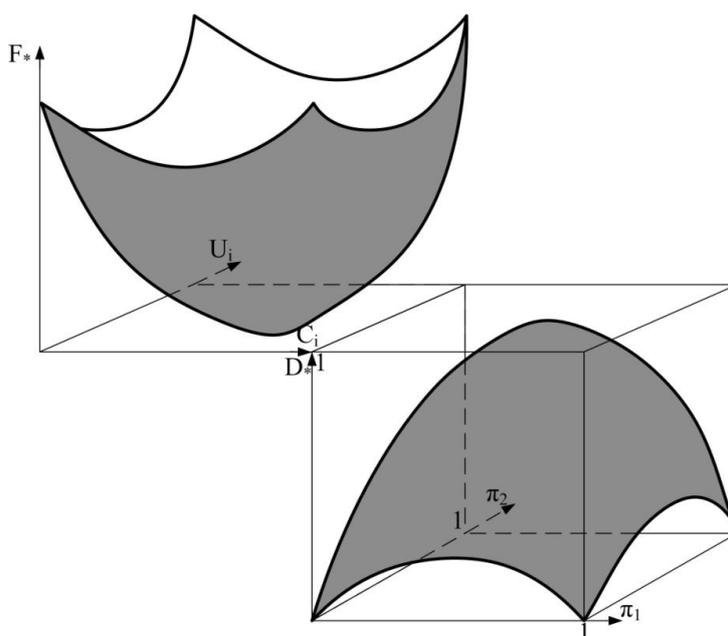


Рис. 2. Прямая и двойственная задачи критериального программирования

Из рис. 2 видно, что в зависимости от степени приближения функциональных возможностей сети к базису ($F_{\min} = D_{\max}$), объем V фигуры, ограниченной зависимостью $D_*(\pi)$, приближается к единице. То есть, критерием качества функционирования сети можно счи-

тать объем фигуры V , который состоит из произведения интегралов вида $\int_0^{\pi_i} D_*(\pi_i) [9]$.

Если за базис взять "идеальную" сеть (полностью надежную, с максимальным качеством электрической энергии, минимальными потерями), то по величине V можно характеризовать качество функционирования разных по конфигурации схем электрической сети и с разным составом источников питания.

Учет вероятностного характера переменных C и U

Процесс функционирования электрической сети можно рассматривать как множество состояний, в которые она переходит при выходе из строя определенных элементов. Каждое из состояний характеризуется своим математическим ожиданием величин C и U , которые изменяются в зависимости от этих состояний и должны быть уточнены коэффициентом функциональной готовности электрической сети

Для определения вероятностей состояний наибольший интерес представляет теория марковских процессов [10]. Методы, построенные на ее основе, позволяют учесть этапность восстановления элементов системы, структурную избыточность и т. д., что является необходимым для достижения поставленной цели. Допущения, которые принимаются в теории марковских процессов, не вносят значительной погрешности.

С течением времени электрические сети переходят из состояния в состояние из-за изменения состояния ее элементов (отказы элементов, их восстановление, разные внешние влияния и т.п.). Каждое конкретное состояние системы может быть охарактеризовано определенным условным показателем функциональной готовности. Этот показатель характеризует результат выполнения функций электрической сетью, которая находится именно в этом состоянии.

Здесь принято допущение об экспоненциальном законе распределения возникновения событий, связанных с отказами и восстановлениями элементов сети. В [11, 12] показано, что законы распределения времени возникновения отказов и времени восстановлений имеют более сложный характер, чем экспоненциальный. Однако использование именно экспоненциального распределения при расчете вероятности безотказной работы этих элементов является общепринятым. Объяснить это можно тем:

- что пока нет единого взгляда относительно действительного закона распределения времени отказов и восстановлений элементов электрических сетей;
- применение экспоненциального закона распределения времени между отказами приводит к погрешностям определения расчетной вероятности безотказной работы сравнительно с фактической, но не может быть причиной ненадежности сети;
- время отказов и восстановлений элементов может являться комбинацией экспоненциального, Вейбула и нормально-логарифмического распределения, но на довольно значительном промежутке времени эти системы ведут себя так, будто все их элементы имеют экспоненциальное распределение времени отказов и восстановлений [12].

Если обозначить через p_i вероятность того, что система в момент времени t находится в i -м состоянии, а через Φ_i – общесистемный коэффициент этого состояния, то показатель функциональной не готовности системы может быть определен по формуле

$$E = \sum_{i=1}^m p_i \Phi_i, \quad (6)$$

где суммирование выполняется по всем состояниям системы.

Для построения функции (6) необходимо показать возможность преобразования матрицы коэффициентов Колмогорова, используя принципы критериального программирования [9]. Процесс функционирования можно изобразить в виде графа (рис. 3), по которому можно

составить систему дифференциальных уравнений Колмогорова [10]. Приняв допущения о $\frac{dp_i}{dt} = 0$, система дифференциальных уравнений примет вид:

$$\left. \begin{aligned} \sum_{i=1}^m v_{ji} p_i = 0, \quad j = \overline{2, n} \\ \sum_{i=1}^m p_i = 1, \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

где p_i – вероятности состояний исследуемой сети; v_{ij} – элементы матрицы v , которая является матрицей интенсивностей переходов из одного состояния в другого; m – количество возможных состояний исследуемой системы; n – количество направлений изменения состояний, которые выходят из рабочего состояния 1 (см. рис. 3).

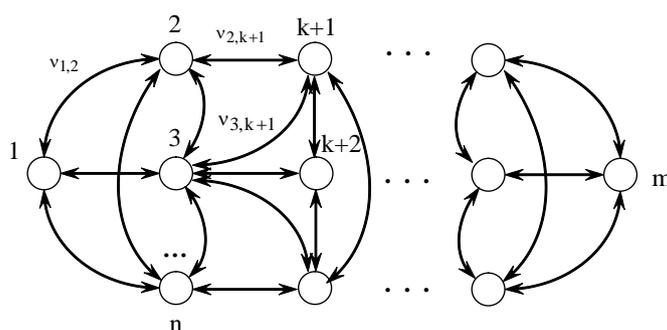


Рис. 3. Граф изменения состояний системы

Для определения вероятностей рабочих состояний и оценки качества функционирования исследуемой системы необходимо решить алгебраическую систему уравнений (7), которая в более общем виде записывается

$$\mathbf{v} \cdot \mathbf{p} = \mathbf{b}, \quad (8)$$

где $\mathbf{v} = \begin{vmatrix} v_{11} & v_{12} & v_{13} & \dots & v_{1m} \\ v_{21} & v_{22} & v_{23} & \dots & v_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ v_{n1} & v_{n2} & v_{n3} & \dots & v_{nm} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}$; $\mathbf{p} = \begin{vmatrix} p_1 \\ p_2 \\ p_3 \\ \dots \\ p_m \end{vmatrix}$; $\mathbf{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix}$.

В критериальном программировании подобная система уравнений ортогональности и нормирование записывается [8]:

$$\mathbf{\alpha} \cdot \boldsymbol{\pi} = \mathbf{b}, \quad (9)$$

где $\boldsymbol{\alpha} = \begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \alpha_{13} & \dots & \alpha_{1m} \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \alpha_{23} & \dots & \alpha_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \alpha_{n3} & \dots & \alpha_{nm} \\ 1 & 1 & 1 & \dots & 1 \end{vmatrix}$; $\boldsymbol{\pi} = \begin{vmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \dots \\ \pi_m \end{vmatrix}$; $\mathbf{b} = \begin{vmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \dots \\ 1 \end{vmatrix}$,

$\boldsymbol{\alpha}$ – матрица показателей или размерностей (в нашем случае состоит из показателей степени в выражении (3) β_i и δ_i); $\boldsymbol{\pi}$ – вектор критериев подобия.

Проанализировав системы уравнений (8) и (9), можно отметить, что \mathbf{v} матрица коэффициентов системы уравнений (8) по форме аналогична матрице размерностей \mathbf{a} системы уравнений (9), применяемой в теории подобия [8, 9], а вектор \mathbf{p} , компоненты которого являясь по сути весовыми коэффициентами состояний исследуемого процесса, по своему смыслу отвечает вектору критериев подобия $\boldsymbol{\pi}$, элементы которого являются безразмерными соотношениями параметров системы и в том случае, когда они определяются методом интегральных аналогов, также являются весовыми коэффициентами составляющих целевой функции (пронормованы к единице) [8]. Итак, можно провести аналогию между системами уравнений (8) и (9).

Подобие моделирования марковских процессов и критериального моделирования позволяет применить к системе уравнений (8) принципы критериального программирования [8]. В результате можно получить функцию, которая представляет собой прямую задачу критериального программирования, по которой можно оценивать функциональную готовность электрической сети. В критериальной форме она будет иметь вид [9]:

$$f(x_*) = \sum_{i=1}^m p_i \prod_{j=1}^n x_{*j}^{v_{ij}}, \quad (10)$$

где p_i – критерий подобия, который в данном случае является вероятностью пребывания системы в состоянии i ; x_{*j} – интегральные независимые параметры, которые характеризуют основные свойства системы (экономичность, надежность, качество) в соответствующих состояниях.

Выводы

Используя сходство математического моделирования марковских процессов и критериального моделирования, предложен интегральный показатель функциональной готовности сети. Поскольку оценивание выполняется по отношению к "идеальной" сети, то можно сравнивать разные варианты схемы сети между собой. При этом сравнение выполняется без определения технико-экономических показателей, а в относительных единицах. Полученные результаты позволяют определять оптимальные варианты секционирования сети с учетом потерь активной мощности, надежности электроснабжения и качества электроэнергии.

Библиографический список

1. **Холмский, В. Г.** Расчет и оптимизация режимов электрических сетей / В.Г. Холмский. – М.: Высш. шк., 1975. – 280 с.
2. **Кузнецов, В.Г.** Оптимизация режимов электрических сетей / В.Г. Кузнецов, Ю.И. Тугай, В.А. Баженов. – Киев.: Наукова думка, 1992. – 216 с.
3. **Кириленко, А.В.** Энергетика устойчивого развития: вызовы и пути построения / А.В. Кириленко, А.В. Праховник // Труды Института электродинамики НАН Украины. Специальный выпуск. – Киев. 2010. С. 10–16.
4. **Ушаков, И. А.** Надежность: прошлое, настоящее, будущее (Обзор) // Методы менеджмента качества. 2001. №5. С. 21–25.
5. **Кузьмин, И. В.** Критерии оценки эффективности, качества и оптимальности сложных систем // Вестник Винницкого политехнического института. 1994. № 1. С. 5–9.
6. Надежность технических систем: справочник / Ю. К. Беляев [и др.]; под ред. И. А. Ушакова. – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с.
7. **Дружинин, Г. В.** Надежность автоматизированных производственных систем / Г. В. Дружинин. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 480 с.
8. **Астахов, Ю.Н.** Применение критериального метода в электроэнергетике / Ю.Н. Астахов, П.Д. Лежнюк. – Киев: УМК ВО, 1989. – 140 с.
9. **Лежнюк, П.Д.** Оценка качества оптимального управления критериальным методом: монография / П.Д. Лежнюк, В.О. Комар. – Винница: УНИВЕРСУМ-Винниц, 2006. – 108 с.

10. **Майн, Х.** Марковские процессы принятия решений / Х. Майн, С. Осаки. – М.: Наука, 1977. – 176 с.
11. **Биллингтон, Р.** Оценка надежности электроэнергетических систем: [пер. с англ. В. А. Туфанова] / Р. Биллингтон, Р. Алан; под ред. Ю. А. Фокина. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 287 с.
12. **Фокин, Ю. А.** Оценка надёжности систем электроснабжения / Ю.А. Фокин, В.А. Туфанов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 224 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.08.2012*

P.D. Lezhnyuk, V.A. Komar

MATHEMATICAL MODELING QUALITY INDEX OF THE POWER GRID IN OPTIMIZATION OF ITS PATTERNS

Vinnitsa national technical university, Vinnitsa, Ukraine

The criterion model integrated indicator of quality of functioning of electrical distribution networks to assess the ability of the network to perform its core functions, including in states with low levels of productivity and less efficiency. This measure can be used to optimize the distribution network partitioning places.

Key words: electric distribution network, criteria method, the quality of performance.

УДК 621.3.026.4

В.И. Седов

ПРИМЕНЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ РАСЧЁТНОГО УЧЁТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ДЛЯ ЦЕЛЕЙ ПОЧАСОВОГО ПЛАНИРОВАНИЯ

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения

Выполнены расчёты почасового плана заказа электроэнергии для малого предприятия с использованием статистического пакета обработки временных рядов.

Ключевые слова: почасовое планирование, электроэнергия, малое предприятие, временные ряды, статистический пакет, тренд, сезонная компонента.

По мере преодоления экономического кризиса, по мнению экспертов, тема дефицита электроэнергии и мощности обретет актуальность, так как производители неизбежно начнут выводить оборудование в ремонт, а цена на электроэнергию, особенно в часы пик, существенно возрастет. В такой ситуации предприятия будут вынуждены перейти на жесткую систему почасового планирования электропотребления. Сегодня почасовое планирование как обязательная процедура на законодательном уровне предусмотрено только для потребителей с присоединенной мощностью свыше 750 кВт. По мнению аналитиков, в ближайшее время законодательство в этом отношении может быть ожесточено и обязанность планировать почасовые объемы будет возложена на всех потребителей, за исключением граждан.

Предполагается, что тариф на электроэнергию будет рассчитываться ежемесячно на основании фактического числа часов использования мощности (ЧЧИМ) за прошедший месяц. Иными словами предприятие будет обязано ежемесячно предоставлять расчет ЧЧИМ в энергосбытовую компанию, иначе поставщик будет определять ЧЧИМ расчетным способом, и, скорее всего, не в пользу потребителя. То есть неизбежно наступит время, когда вести почасовой учет и планировать электропотребление станет экономически целесообразно самому потребителю. И главным аргументом в пользу внедрения почасового планирования станет возможность влиять на стоимость тарифа.

Применение современных средств учёта расхода электроэнергии, позволяющее иметь почасовой профиль потребления активной и реактивной её составляющих, дают возможность применять статистические методы обработки данных для целей планирования и прогноза.

1. Оценка почасового максимума потребления электроэнергии

Создание оптового и розничного рынков электроэнергии требует от потребителей или иметь собственную сеть учёта энергии, или её фрагменты, интегрированные в общую сеть. Большие предприятия содержат аналитические группы специалистов, которые разрабатывают различные модели планирования энергии по часовым интервалам в районе пиковых нагрузок.

Так, в частности, в [2] предлагается определять максимум средней нагрузки за интервал заданной продолжительности, используя методы, основанные на применении теории случайных процессов. Результаты статистической обработки экспериментальных графиков нагрузки по предложенной методике показали, что вероятность превышения заявки составляет меньше 5%.

Есть и другие подходы к решению этой проблемы, например, изложенные в [1].

Для малых предприятий такой подход является накладным. Нужны более простые способы планирования, в частности, обработка статистических данных с помощью статистических пакетов.

Анализ полученных в лаборатории данных почасовых нагрузок в реальной жизни в лабораторном корпусе филиала университета (МИИТ), что примерно соответствует небольшому частному предприятию, с помощью электронного счётчика СЭТ 4ТМ.02 (з-д. им.Фрунзе, Н.Новгород) показал, что есть смысл применить для решения этой задачи теорию анализа временных рядов [3].

2. Метод определения почасовых индексов (декомпозиция) временного ряда

В теории предполагается, что временной ряд $y_t = y_1, y_2, \dots, y_n$, в общем случае, содержит детерминированную C_t и случайные составляющие ε_t . Детерминированная составляющая представляет собой комбинацию следующих компонент:

- а) тренда T_t , определяющего тенденцию ряда;
- б) более или менее регулярных колебаний относительно тренда – циклов W_t ;
- в) периодических колебаний – сезонной составляющей S_t .

Наиболее распространёнными математическими моделями временного ряда являются:

– аддитивная

$$y_t = T_t + W_t + S_t + \varepsilon_t \quad (1)$$

– мультипликативная

$$y_t = T_t W_t S_t \varepsilon_t \quad (2)$$

Почасовой ряд расхода энергии в дневное время суток очень быстро возрастает и также быстро снижается. Поэтому для последующего анализа применяется мультипликативная модель (2). Рассматривать расход энергии в ночные часы не имеет смысла, так как они малы и равномерны.

В данной работе рассматривается период суток активной работы с 7.00 до 18.00. Осуществляется выделение сезонных эффектов [3] в виде сезонных индексов, далее *почасовых индексов*.

Так как ряд представляет почасовые данные за 12 часов, для каждого часа индексы: S_1, S_2, \dots, S_{12} , вычисляются в процентах; сумма суточных индексов:

$$S_1 + S_2 + \dots + S_{12} = 1200\% \quad (3)$$

Применяя пакет программ STATISTICA, вычисляется тренд и циклическая составляющая при помощи скользящего среднего по двенадцати точкам. Вычисляется сезонная и остаточная составляющие в процентах делением исходных данных на значения тренда и циклической составляющей:

$$\frac{T_t W_t S_t \varepsilon_t}{T_t W_t} \cdot 100 = S_t \varepsilon_t \cdot 100 \quad (4)$$

Вычисляются средние для каждого часа $S_1', S_2', \dots, S_{12}'$. Определяется корректирующий коэффициент:

$$k = 1200 / (S_1' + S_2' + \dots + S_{12}') \quad (5)$$

Наконец, определяются скорректированные с учётом (5) почасовые индексы:

$$S_i = k S_i', \quad i = 1, 2, 3, \dots, 12,$$

сумма которых равна 1200%.

Качество модели временного ряда оценивается по случайной компоненте, вычисленной как отношение значений ряда без сезонной составляющей (4) на значения сглаженного ряда. Если эта компонента имеет нормальное распределение (белый шум), то качество модели высокое или определяется некоррелированность остатков по критерию Дарбина – Уотсона.

3. Расчёт почасовых индексов по изложенной выше методике

На первом этапе проводится анализ суточного потребления энергии для выделения суток, имеющих идентичную нагрузку. т. е. пиковые и полупиковые периоды.

В течение января – февраля текущего года из счётчика извлечены данные почасового расхода энергии.

Они были сгруппированы по рабочим дням с текущей нагрузкой в январе месяце *ряд 01*. В выходные дни нагрузка невелика и поэтому в анализ не включена.

Вторая группа данных включала в себя дни февраля месяца, когда в лабораториях во время сессии, где проводились лабораторные работы (*ряд 02*) и нагрузка была в 2÷2,5 раза выше обычных рабочих дней.

В табл. 1 исходных данных представлены расходы энергии по часам суток (*ряд 01*).

Таблица 1

Часы суток	Сутки января							
	12.01	13.01	14.01	15.01	19.01	20.01	21.01	22.01
7.00	1,56	2,03	1,45	1,83	1,71	1,78	2,3	2,66
8.00	5,67	1,88	1,63	3,52	3,2	3,04	3,05	3,37
9.00	7,61	4,79	1,93	3,51	4,08	2,76	4,3	4,39
10.00	10,46	5,86	2,63	4,98	4,82	4,49	4,84	5,89
11.00	8,79	6,9	2,82	5,34	5,14	5,62	5,74	4,91
12.00	8,43	7,3	2,27	5,05	5,12	3,53	5,64	4,64
13.00	7,6	7,84	2,23	4,45	3,6	5,08	4,98	4,57
14.00	4,58	8,64	3,03	4,55	2,66	2,88	4,75	318
15.00	4,24	6,15	3,52	4,26	2,05	1,71	3,35	1,96
16.00	3,25	6,32	3,24	3,1	1,25	1,05	2,63	1,13
17.00	0,78	4,22	3,12	2,6	1,04	0,82	2,65	1,3
18.00	0,7	0,87	2,66	0,63	1,05	0,48	2,58	1,1

Ранее было установлено, что почасовые данные в рабочие дни распределены по лог-нормальному закону (рис. 1).

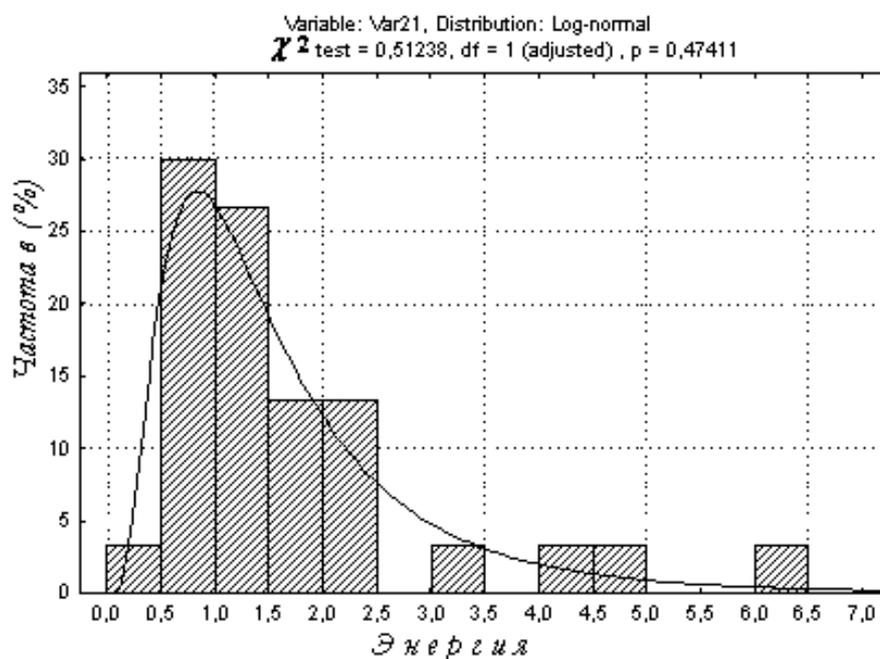


Рис. 1

Поэтому было выполнено логарифмирование данных табл. 1 и с помощью пакета STATISTICA выполнена обработка двух рядов 01.1 и 01.2, состоящих из данных *ряда 01*.

В результате их обработки получены *почасовые индексы* расхода энергии в рабочие дни января месяца табл. 1.2.

Таблица 2

Часы суток	Почасовые индексы ряда 01.1	Почасовые индексы ряда 01.2
7.00	59,65	61,14
8.00	88,38	96,98
9.00	101,53	113,81
10.00	135,69	140,41
11.00	152,60	150,76
12.00	136,49	135,99
13.00	132,77	134,33
14.00	117,71	125,33
15.00	100,74	109,35
16.00	79,66	82,77
17.00	61,85	50,05
18.00	32,94	-0,93

Из полученной таблицы следует, что с помощью индексов, зная средний расход энергии за заданный период, можно оценить максимум нагрузки, который по таблице приходится на 11 часов дня. Выполнить почасовую заявку (в часы пиковых нагрузок) на розничном рынке энергии.

Дальнейшее использование данных рядов 01.1 или 01.2 зависит близости реальных расходов энергии по часам суток и прогнозируемых в табл. 2.

В работе, как указано ранее, был сформирован ряд 02, который состоит из суток, имеющих максимальную нагрузку, т.е. при активной работе всех лабораторий в здании.

В табл. 3 представлены эти данные.

Таблица 3

Часы суток	Сутки февраля								
	13.02	14.02	15.02	18.02	20.02	21.02	22.02	24.02	25.02
7.00	1,22	0,72	0,88	1,35	0,84	1,10	1,12	1,26	0,99
8.00	1,78	2,71	0,96	1,63	3,59	2,78	1,78	2,32	1,75
9.00	5,39	4,02	3,19	1,52	3,34	4,13	2,48	2,74	1,59
10.0	11,27	4,03	3,94	2,02	3,94	4,50	2,98	4,06	4,17
11.00	11,26	3,53	4,70	4,83	5,05	6,46	4,22	5,61	3,85
12.00	9,05	5,31	4,26	4,29	4,93	6,46	5,22	4,47	4,25
13.00	6,64	5,14	3,79	3,11	3,90	3,70	5,28	4,44	4,04
14.00	3,10	3,73	5,99	3,46	4,02	3,62	4,99	4,71	3,68
15.00	3,40	3,39	3,33	2,79	4,54	2,87	3,66	3,80	3,68
16.00	3,38	1,57	2,53	2,28	4,03	1,81	1,52	3,57	3,54
17.00	3,02	1,90	2,51	1,44	1,94	2,32	1,02	1,59	2,35
18.00	2,82	0,51	1,00	0,98	1,34	1,06	0,73	0,82	0,80

В результате обработки этого ряда с помощью статистического пакета были получены почасовые индексы, представленные в табл. 4.

Из таблицы следует, что пик нагрузки приходится на 11 и 12 часов, в этот период времени наступает обеденный перерыв. Работа в лабораториях не прекращается.

Наиболее интересным для этого ряда данных является проверка качества принятой модели обработки данных. Для этого и необходимо проверить ряд, оставшейся после вычета тренда и сезонной компоненты, т.е. случайной компоненты ε_t на нормальность. Один из способов проверки нормальности закона распределения состоит в том, что исходные данные наносятся на специальный график – вероятностную бумагу. На рис. 2 выполнена эта процедура для данных февраля месяца.

Таблица 4

Часы суток	Почасовые индексы ряда 02
7_00	35,0247
8_00	65,9726
9_00	79,2329
10_00	113,4321
11_00	162,9879
12_00	160,6240
13_00	137,5046
14_00	128,8710
15_00	113,3245
16_00	96,6205
17_00	64,9737
18_00	41,4314

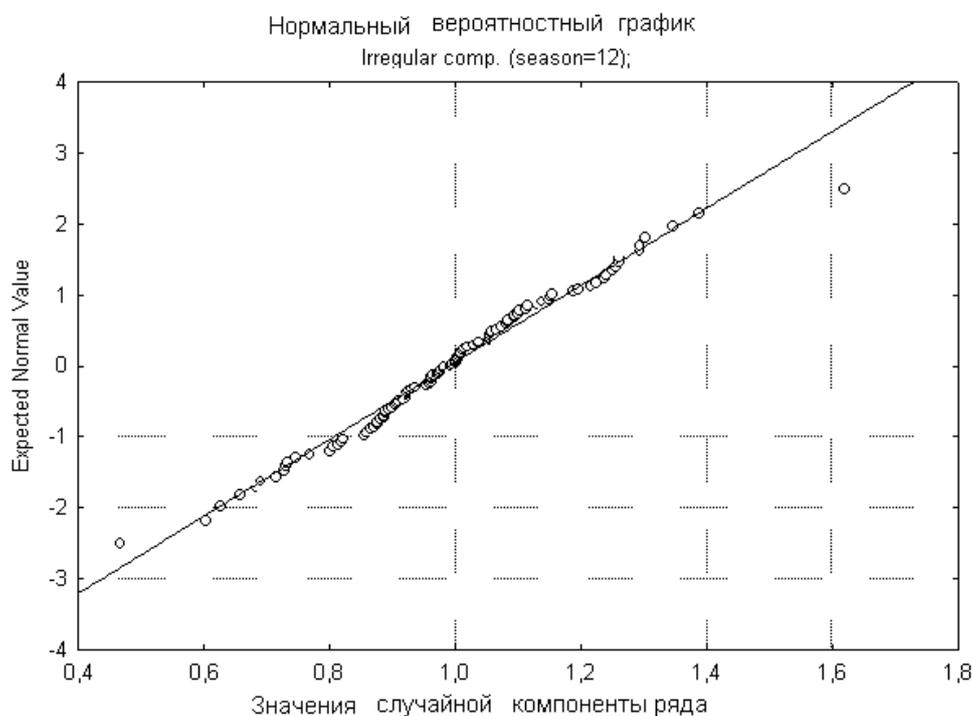


Рис. 2

Из рисунка следует, что принятая модель обработки ряда обеспечивает высокое качество оценки индексов временного ряда. Оказалось, что качество тем выше, чем больше почасовая нагрузка. Так, в январе и по выходным дням такой сходимости с прямой не наблюдается.

В данной статье рассмотрен только примерный подход к проблеме планирования почасовых индексов. Для реальной обработки данных следует иметь годовые помесечные расходы энергии. Группировать их в зимние и летние месяцы, учитывать другие особенности производства. Тогда можно получить надежные, устойчивые результаты для задач прогноза и планирования.

Библиографический список

1. **Забелло, Е.П.** Розничный рынок электрической энергии и проблемы достоверности расчётной информации / Е.П. Забелло, А.Н. Евсеев // Промышленная энергетика. 2008. № 11.

2. **Шпиганович, А.Н.** Расчётная оценка получасового максимума мощности промышленного предприятия / А.Н. Шпиганович, Д.М. Жуков // Промышленная энергетика. 2007. №8.
3. **Вуколов, Э.А.** Основы статистического анализа. Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTICA и EXCEL / Э.А. Вуколов. – М.: ФОРУМ-М, 2004. – 464 с.
4. **Тюрин, Ю.Н.** Анализ данных на компьютере / Ю.Н. Тюрин, А.А. Макаров. – М: ИНФРА-М, 2003. – 544 с.

*Дата поступления
в редакцию 09.07.2012*

V.I. Sedov

APPLICATION OF INFORMATION OF ELECTRIC POWER ACCOUNTING FOR THE PURPOSE OF HOURLY PLANNING

Moscow state university of railways (Nizhny Novgorod branch)

Hourly plan calculations of electric power order for a small enterprise were made. Statistic package of time series processing was used.

Key words: hourly planning, electric power, small enterprise, time series, statistic package, trend, seasonal component.

УДК 621.311.68

Е.Н. Соснина, А.В. Шалухо

**МЕТОДИКА ВЫБОРА ОПТИМАЛЬНОГО СОЧЕТАНИЯ
ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ
ДЛЯ ЛОКАЛЬНЫХ ЭНЕРГОСИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы повышения эффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в локальных системах электроснабжения. Предложен критерий выбора оптимального сочетания ВИЭ – эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП), учитывающий случайный характер изменения погодных условий. Разработаны методика расчета ЭРЭП, основанная на применении теории портфельного анализа, и методика выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом ЭРЭП.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России (госконтракт № 16.516.11.6114 от 25.08.2011).

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, эксплуатационный риск электроснабжения потребителей, теория портфельного анализа, портфель ВИЭ.

Развитие малой распределенной энергетики (МРЭ) является одним из приоритетных направлений энергетической стратегии России на период до 2030 года [1]. Технической единицей МРЭ являются локальные энергосистемы – изолированные системы электроснабжения с генерирующими установками, расположенными в непосредственной близости от потребителя. В качестве генерирующих установок целесообразно и наиболее эффективно использовать энергоустановки на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ).

Как правило, основными критериями выбора ВИЭ являются: развиваемая мощность, стоимость вырабатываемой электроэнергии, размеры и стоимость применяемых энергоустановок, доля замещения углеводородного топлива, расстояние от ВИЭ до сетей централизованного электроснабжения.

Однако перечисленные критерии не учитывают основной недостаток возобновляемой энергии – ее непостоянство. Выработка электроэнергии солнечными и ветроэнергетическими установками сильно зависит от погодных условий, изменение которых имеет случайный характер. Поэтому в локальных энергосистемах с ВИЭ присутствуют риски электроснабжения потребителей, связанные с непостоянством энергоносителя. Последствия от данных рисков заключаются в высокой вероятности нарушения электроснабжения потребителей.

Таким образом, объектом исследований являются локальные системы электроснабжения с ВИЭ. Цель исследований заключается в разработке новой методики выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом случайного характера изменения погодных условий.

В процессе исследований решаются следующие задачи:

- 1) анализ рисков в системах электроснабжения с ВИЭ;
- 2) разработка методики расчета эксплуатационного риска электроснабжения;
- 3) разработка методики выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом эксплуатационного риска электроснабжения потребителей.

Необходимость создания такой методики заключается в том, что при одинаковой суммарной установленной мощности и стоимости различные сочетания энергоустановок на основе ВИЭ могут иметь различный эксплуатационный риск электроснабжения. Методики расчета эксплуатационного риска электроснабжения при использовании ВИЭ отсутствуют.

Анализ рисков в системах электроснабжения с ВИЭ

Проведен анализ рисков, характерных для локальных систем электроснабжения с ВИЭ. В результате выделены две группы: систематические риски и несистематические риски. Систематическому риску в равной степени подвержены все системы электроснабжения. Его нельзя исключить. Примерами систематических рисков являются: законодательные, финансовые, политические риски и др. Несистематический риск является собственным для каждой конкретной системы электроснабжения. К несистематическим рискам относятся: риски непостоянства энергоносителя, риски наличия потребителей, риски спроса и предложения. Величину несистематических рисков можно уменьшить при проектировании системы электроснабжения путем выбора оптимального сочетания ВИЭ.

Наиболее опасным для потребителей является риск непостоянства энергоносителей. Зависимость выработки электроэнергии ВИЭ от случайного характера изменения погодных условий может привести к дополнительным затратам на углеводородное топливо; остановке технологического процесса; потере информации; финансовому ущербу.

Для учета непостоянства возобновляемой энергии авторами предлагается ввести новый критерий – *эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП)*. ЭРЭП определяет вероятность неполучения потребителями требуемой мощности вследствие случайного характера изменения погодных условий. При выборе оптимального сочетания ВИЭ в локальной энергосистеме, необходим расчет как основных критериев, так и ЭРЭП.

Разработка методики расчета ЭРЭП

Эксплуатационный риск электроснабжения при использовании ВИЭ по основным признакам тождественен экономическому риску доходности ценных бумаг. В экономике для снижения риска доходности используется теория портфельного анализа Марковица [2]. Математическая модель формирования оптимального портфеля ценных бумаг основана на положениях теории вероятности и математической статистики. Наряду с простотой и наглядностью, портфельный анализ решает задачу минимизации риска при заданных условиях. Поэтому для расчета ЭРЭП предлагается использовать методы теории портфельного анализа. Применение аппарата портфельного анализа для расчета ЭРЭП в системе электроснабжения с ВИЭ представлено на рис. 1.

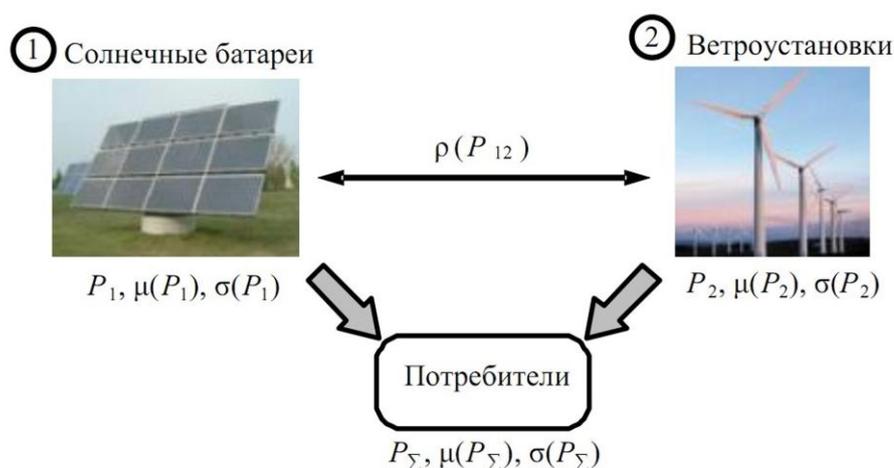


Рис. 1. Применение аппарата портфельного анализа для расчета ЭРЭП

Основные положения теории портфельного анализа для расчета ЭРЭП заключаются в следующем:

1. Портфелем ВИЭ является сочетание возобновляемых источников энергии, приме-

няемых в системе электроснабжения. Портфель может состоять из установок одного вида, например, – только ветроустановки или солнечные батареи. Также в одном портфеле ВИЭ могут применяться разнородные ВИЭ – сочетание ветроустановок и солнечных батарей.

2. Основным показателем портфеля ВИЭ является вырабатываемая мощность P_i ВИЭ. В силу зависимости от погодных условий, P_i можно считать случайной величиной.

3. Статистические свойства портфеля ВИЭ определяются математическим ожиданием $\mu(P_i)$ и стандартным отклонением $\sigma(P_i)$ вырабатываемой мощности. $\mu(P_i)$ определяет прогнозируемое значение вырабатываемой мощности, а $\sigma(P_i)$ является мерой разброса значений вырабатываемой мощности.

4. При расчете ЭРЭП допускается гипотеза, что распределение вырабатываемой мощности каждого источника энергии соответствует нормальному закону [3]. Функция нормального закона распределения вырабатываемой мощности ВИЭ представлена на рис. 2.

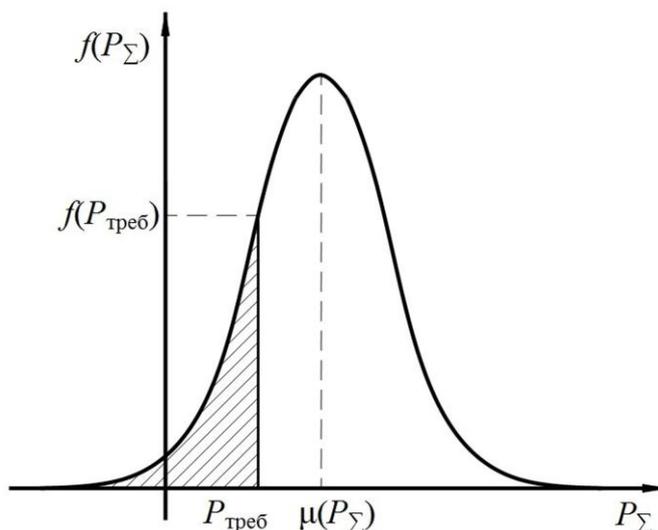


Рис. 2. Нормальный закон распределения вырабатываемой мощности ВИЭ

5. ЭРЭП определяется как вероятность того, что суммарная мощность портфеля ВИЭ окажется меньше требуемой мощности потребителей:

$$R = P_{\Sigma} \leq P_{\text{треб}},$$

где R – эксплуатационный риск электроснабжения потребителей; P_{Σ} – суммарная вырабатываемая мощность портфеля ВИЭ; $P_{\text{треб}}$ – требуемая мощность потребителей.

На рис. 2 эксплуатационный риск равен площади заштрихованной области.

6. При расчете ЭРЭП необходимо учитывать взаимосвязь между вырабатываемыми мощностями разнородных ВИЭ (например, ветроустановка – солнечная батарея) с помощью коэффициента корреляции $\rho(P_{ij})$, где P_i – вырабатываемая мощность ветроустановки; P_j – вырабатываемая мощность солнечной батареи.

$\rho(P_{ij})$ между ВИЭ одного вида (например, ветроустановка – ветроустановка) равен 1. Если коэффициент корреляции равен 0, значит вырабатываемые мощности установок ВИЭ не связаны между собой. Отрицательный коэффициент корреляции означает, что вырабатываемые мощности установок ВИЭ изменяются в противофазе.

Например, для многих территорий в противофазе находятся солнечное излучение и скорость ветра. При сильном ветре, как правило, отсутствует солнце, а в солнечный день часто бывает слабый ветер. Совместное использование разнородных ВИЭ (ветроустановка – солнечная батарея), как правило, позволяет снизить вероятность нарушения электроснабжения потребителей. $\rho(P_{ij})$ в методике расчета ЭРЭП учитывает совместное использование ветроустановок и солнечных батарей.

Разработана методика расчета ЭРЭП [4]. Алгоритм расчета ЭРЭП:

1. Чтобы определить значение R , необходимо рассчитать $\mu(P_i)$, $\sigma(P_i)$ и $\rho(P_{ij})$. Поэтому на первом этапе для каждого ВИЭ по начальным данным рассчитываются значения вырабатываемой мощности за год. Начальными данными являются:

- технические характеристики энергоустановок на основе ВИЭ;
- среднесуточная скорость ветра и среднесуточное солнечное излучение для исследуемой местности. Информацию о скорости ветра и солнечном излучении можно взять из архивов метеостанций.

2. Для каждого ВИЭ определяются математическое ожидание и стандартное отклонение вырабатываемой мощности:

$$\mu(P_i) = \sum_{i=1}^n \frac{P_i}{n}; \quad (1)$$

$$\sigma(P_i) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \mu(P_i))^2}, \quad (2)$$

где n – число наблюдений в течение года.

$\mu(P_i)$ и $\sigma(P_i)$ необходимы для расчета математического ожидания и стандартного отклонения вырабатываемой мощности портфеля ВИЭ.

3. Рассчитываются математическое ожидание и стандартное отклонение мощности портфеля ВИЭ:

$$\mu(P_\Sigma) = \sum_{i=1}^N \mu(P_i); \quad (3)$$

$$\sigma(P_\Sigma) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sigma(P_i) \sigma(P_j) \rho(P_{ij})}, \quad (4)$$

где N – число возобновляемых источников энергии.

От величины $\mu(P_\Sigma)$ и $\sigma(P_\Sigma)$ зависит величина ЭРЭП.

4. Для расчета ЭРЭП необходимо решить интегральную функцию нормального распределения:

$$R = \int_{-\infty}^A \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma(P_{\text{порт}})} e^{-\frac{(P_i - \mu(P_{\text{порт}}))^2}{2\sigma(P_{\text{порт}})^2}} dx. \quad (5)$$

Для упрощения расчетов можно перейти к нормированной нормально распределенной случайной величине - y . Для нормированной нормально распределенной случайной величины: $\mu = 0$ и $\sigma = 1$ [5]:

$$y = \frac{P_{\text{треб}} - \mu(P_{\text{порт}})}{\sigma(P_{\text{порт}})}. \quad (6)$$

После расчета y с помощью специальных таблиц можно перейти к R .

Конечным результатом (формула (6)) является эксплуатационный риск электроснабжения потребителей, учитывающий случайный характер изменения погодных условий.

Методика выбора оптимального сочетания возобновляемых источников энергии с учетом ЭРЭП

Разработана методика выбора оптимального сочетания ВИЭ с учетом ЭРЭП [4], заключающаяся в следующем.

1. С учетом требований потребителя (площадь солнечных батарей, высота ветроустановки) определяется перечень энергоустановок ВИЭ, перспективных для использования в

системе электроснабжения. На основе выбранных установок формируются все возможные сочетания ВИЭ (портфели ВИЭ). Примеры возможных сочетаний ВИЭ: ветроустановка – ветроустановка, солнечная батарея – солнечная батарея, ветроустановка – солнечная батарея.

2. Для каждого портфеля ВИЭ определяется вырабатываемая мощность (P_{Σ}). P_{Σ} сравнивается с $P_{\text{треб}}$. Из совокупности портфелей отбираются портфели, выполняющие условие:

$$P_{\Sigma} \geq P_{\text{треб}}$$

3. Задается минимальная стоимость сочетания ВИЭ, которая удовлетворяет потребителя. Из пункта 2 отбираются портфели ВИЭ, стоимость которых не превышает минимального заданного значения.

4. Из портфелей пункта 3 выбирается портфель с наименьшим значением ЭРЭП. Выбранное сочетание ВИЭ является оптимальным для использования в системе электроснабжения.

Разработанная методика выбора ВИЭ использована для исследований энергоэффективности системы электроснабжения базы отдыха, находящейся в сельской местности. В качестве возобновляемых источников энергии рассматривались три модели ветроустановок и две модели солнечных батарей. Информация о скорости ветра и солнечном излучении взята из архивов метеоданных Нижегородской области. Сформированы 62 различных сочетания ВИЭ. Портфели ВИЭ содержат от 2 до 6 установок. По формулам (1)–(6) проведен анализ сочетаний ВИЭ при требуемой мощности потребителей 16 кВт. Для каждого портфеля ВИЭ определены: вырабатываемая мощность (формула (3)), стандартное отклонение (формула (4)) и ЭРЭП (формулы (5), (6)). Расчеты показали, что наиболее оптимальным сочетанием ВИЭ в системе электроснабжения базы отдыха являются четыре ветроустановки и две солнечных батареи.

Основные характеристики оптимального портфеля ВИЭ:

- вырабатываемая мощность – 17,5 кВт;
- стоимость – 3 млн руб.;
- ЭРЭП – 18%.

Для других портфелей со стоимостью не более 3 млн руб. ЭРЭП значительно превышал 18 %.

Также результаты расчета показали, что стоимость ВИЭ и ЭРЭП не зависит друг от друга. Для портфелей ВИЭ с низкой стоимостью могут быть характерны большие значения ЭРЭП. Наименьшее значение ЭРЭП наблюдается у портфелей, состоящих из разнородных ВИЭ (сочетание солнечных батарей и ветроустановок). Таким образом, выбор состава источников по критерию минимальной стоимости не гарантирует высокую надежность электроснабжения потребителей. Для повышения надежности электроснабжения необходимо выбирать сочетание ВИЭ с учетом ЭРЭП.

Выводы

На основе проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1) проведен анализ рисков в системах электроснабжения с возобновляемыми источниками энергии. Для учета влияния случайного характера погодных условий на выработку электроэнергии предложено использовать эксплуатационный риск электроснабжения потребителей (ЭРЭП);

2) разработана методика расчета ЭРЭП. При разработке использованы положения экономической теории портфельного анализа;

3) разработана методика учета ЭРЭП при выборе оптимального сочетания ВИЭ. Учет ЭРЭП позволяет снизить вероятность нарушения электроснабжения потребителей;

4) проведенные расчеты показали, что ЭРЭП снижается при комплексном использовании разнородных источников энергии.

Библиографический список

1. Энергетическая стратегия России на период до 2030 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ № 1715-р от 13 ноября 2009 г.
2. **Касимов, Ю.Ф.** Основы теории оптимального портфеля ценных бумаг / Ю.Ф. Касимов. – М.: Филинь, 1998.
3. **Митяков, С.Н.** Снижение эксплуатационного риска электроснабжения потребителей при одновременном использовании источников энергии разного типа / С.Н. Митяков, Е.Н. Соснина // Арзамас-Н.Новгород: Прогрессивные технологии в технике, экономике, естествознании и образовании: межвузов. сб. статей / НГТУ. Н. Новгород, 2008.
4. **Лоскутов, А.Б.** Разработка технологии эффективного использования возобновляемых источников энергии в локальной системе электроснабжения потребителей. Этап 3: Экспериментальные исследования комплексного использования разнородных источников энергии. - Промежуточный отчет о НИР (ГК от 25.08.2011 №16.516.11.6114) / А.Б. Лоскутов [и др.] / НГТУ. Н. Новгород. 2012. – 301 с.
5. **Хан, Г.** Статистические модели в инженерных задачах / Г. Хан, С. Шапиро. – М.: Мир, 1969.

*Дата поступления
в редакцию 10.08.2012*

E. Sosnina, A. Shalukho

**TECHNIQUE OF A CHOICE THE OPTIMAL COMBINATION
OF RENEWABLE ENERGY SOURCES IN THE LOCAL POWER SUPPLY SYSTEM**

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

Purpose: Development of a new technique of a choice of an optimum combination of renewable energy sources taking into account the random nature of the change in weather conditions for local power supply systems of consumers.

Design/methodology/approach: For the accounting of inconstancy of renewable energy it is offered to introduce a new criterion - the operational risk of consumers electricity (ORCE). The operational risk of consumers electricity is an additional new criterion in selecting the optimal combination of renewable energy sources. For calculation of ORCE it is offered to use methods of the theory of the portfolio analysis.

Findings: Risk analysis in power supply systems with renewable energy sources is carried out. ORCE design procedure and the technique of the accounting of ORCE at a choice of an optimum combination of renewable energy sources is developed. Calculations which showed that the operational risk of consumer's electricity decreases at complex use of diverse power sources are carried out.

Research limitations/implications: The developed technique of the accounting of ORCE at a choice of an optimum combination of renewable energy sources can be used for design of power effective systems of power supply of various objects.

Originality/value: At identical cost various combinations of renewable energy sources can allow various the operational risk of consumers electricity. The accounting of the operational risk of consumer's electricity allows to reduce probability of violation of consumer's power supply. Work is executed with financial support of the Ministry of Education and Science of Russia (the state contract No. 16.516.11.6114 from 25.08.2011).

Key words: renewable energy sources, the operational risk of consumer's electricity, the portfolio analysis theory, the renewable energy source portfolio.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 620(186.4+179.16)

А.В. Гончар, В.В. Мишакин

ОЦЕНКА ВЕЛИЧИНЫ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ В СТРУКТУРНО-НЕОДНОРОДНЫХ МАТЕРИАЛАХ С ПОМОЩЬЮ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Нижегородский филиал ФГБУН Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Исследовано влияние локального термического воздействия (нагрев до температуры 1100°C) на распределение пластической деформации и акустической анизотропии конструкционной углеродистой стали СтЗсп при одноосном растяжении. На основании полученных результатов предложен алгоритм оценки величины пластической деформации структурно-неоднородных металлов по данным металлографических исследований и ультразвуковых измерений.

Ключевые слова: одноосное растяжение, деформация, ультразвук, металлографические исследования, сварной шов, термическое влияние.

Исследование влияние локального термического воздействия на характеристики металла является важной задачей. Локальное термическое воздействие на металл осуществляется, например, при сварке, установке электрозаклепок и других технологических операциях. Воздействие высоких температур на металлические сплавы приводит к изменению дислокационной структуры, среднего диаметра зерна, фазового состава, к существенному изменению характеристик прочности и пластичности [1].

Структурные изменения, связанные как с термическим влиянием, так и с процессом деформирования можно оперативно контролировать современными портативными металлографическими комплексами, например, таким как СПЕКТР МЕТ-М. Этот комплекс позволяет проводить металлографические исследования как на отдельных образцах, так и непосредственно на материалах элементов конструкций. Использование современных портативных металлографических комплексов существенно расширяет возможности оптических методов.

Другим методом, наиболее подходящим в инженерном плане для контроля структурного состояния, является акустический метод. Основное преимущество ультразвукового метода контроля по сравнению с другими методами заключается в его низкой стоимости, возможности исследования практически любых материалов, высокой скорости контроля, возможности измерений при одностороннем доступе к объекту контроля (ОК).

Цель данной работы заключается в разработке алгоритма оценки величины пластической деформации в материале, имеющем зону термического влияния (ЗТВ), на основе ультразвуковых измерений и металлографических исследований.

Для исследования использовался плоско-параллельный образец прямоугольного сечения (рис. 1), изготовленный из листовой горячекатаной стали СтЗсп. Образец локально нагрели до температуры 1100 °С в двух зонах. Схема локального термического воздействия представлена на рис. 1.

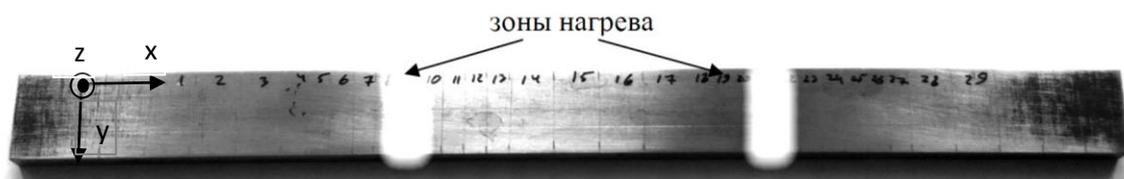


Рис. 1. Схема локального термического воздействия

Металлографические исследования проводились в ЗТВ и основном материале. В исследуемых зонах был изготовлен микрошлиф и проведено травление 3% раствором азотной кислотой. Методика расчета среднего диаметра зерна на исследуемом участке ЗТВ заключалась в следующем: параллельно оси Y (рис. 1) проводилось несколько реперных линий; по расстояниям между точками пересечения реперных линий с границами зерен определяли диаметр зерна. Определялся размер зерен феррита на участке перегрева, характеризующийся пониженным пределом текучести вследствие повышенного значения размеров зерен (закон Холла-Петча) и разупрочнения из-за снятия наклёпа. На этом участке наблюдаются наибольшие по величине пластические деформации. На участках материала с видманштеттовой структурой, имеющей пониженные пластические свойства, размер зерна не измерялся. При вычислении среднего значения диаметра зерна на участке ЗТВ исследовалось не менее 100 зерен. Величина пластической деформации определялась в местах проведения реперных линий.

Для проведения акустических исследований образцы условно были разделены на зоны (рис. 1). Ширина каждой зоны в ЗТВ составила 3-5 мм, в основном металле – 10 мм. Акустические исследования проводились ультразвуковым эхоимпульсным методом. Использовались ультразвуковые датчики фирмы Olympus для возбуждения поперечных упругих волн. Диаметр датчиков – 8 мм, центральная частота – 5 МГц. Измерения повторялись в каждой зоне не менее пяти раз.

В результате акустических исследований регистрировалась амплитудно-временная диаграмма, на основе которой вычислялся параметр акустической анизотропии:

$$A = \frac{2(V_{zx} - V_{zy})}{V_{zx} + V_{zy}} = \frac{2(\tau_{zy} - \tau_{zx})}{\tau_{zy} + \tau_{zx}}, \quad (1)$$

где V_{zx} , V_{zy} , τ_{zx} и τ_{zy} – скорости и времена распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль и поперек направления проката соответственно. Абсолютная погрешность измерения параметра акустической анизотропии не превышала 10^{-4} . Величина акустической анизотропии отражает кристаллографическую текстуру и ее изменение в процессе пластического деформирования. Для измерения величины акустической анизотропии, которая пропорциональна коэффициенту функции распределения ориентировок W_{420} ($A \propto W_{420}$) [2], как и в случае металлографических исследований, достаточно одностороннего доступа к конструкции.

В результате одноосного растяжения образца на величину $\varepsilon_x=5\%$ получено неоднородное распределение деформации ε_z по длине образца (рис. 2).

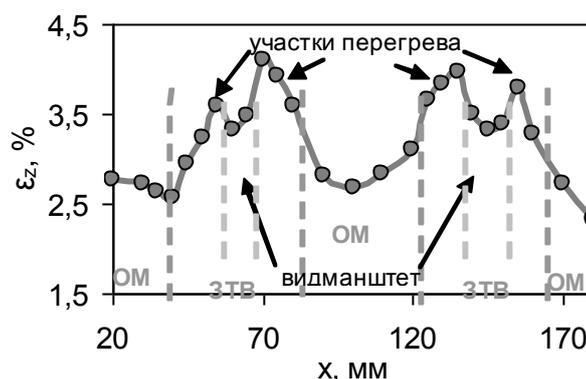


Рис. 2. Распределение величины пластической деформации по длине образца

Металлографические исследования показали, что в ЗТВ в областях с меньшей величиной пластической деформации наблюдается видманштеттова структура (рис. 3, *а*), в областях с наибольшим значением деформации наблюдается повышенный диаметр зерна, что соответствует участку перегрева (рис. 3, *б*).

Деформация в основном материале существенно меньше чем в ЗТВ. Фотография микроструктуры в основном материале представлена на рис. 3, *в*.

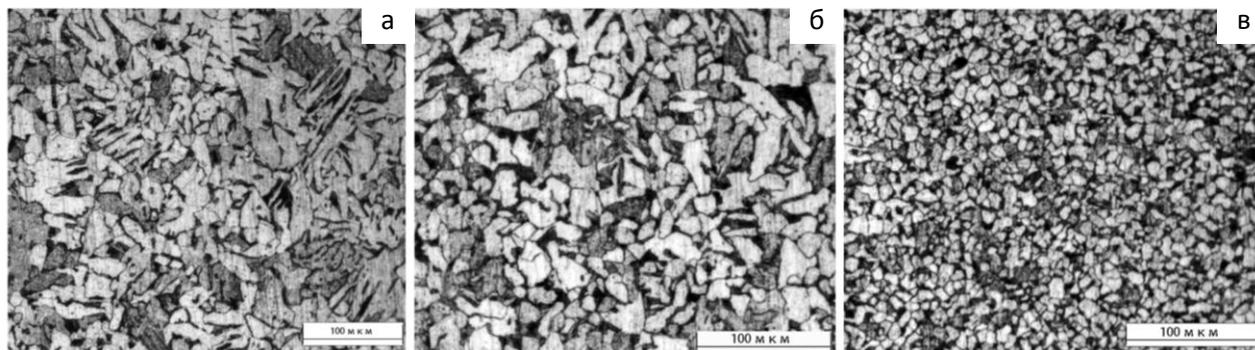


Рис. 3. Фотографии микроструктуры стали СтЗсп:
а – видманштетт; *б* – участок перегрева; *в* – основной металл

Увеличение размеров зерен на отдельных участках ЗТВ, при отсутствии существенного различия в химическом и фазовом составе материала, должно приводить к снижению предела текучести, увеличению пластических свойств материала в ЗТВ по отношению к основному металлу.

Используя соотношение Холла-Петча, при указанных ранее условиях можно рассчитать влияние локального изменения диаметра зерна на развитие неоднородности пластической деформации.

Зависимость предела текучести σ_T от размера зерна d определяется соотношением Холла-Петча:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{0i} + k_{fi} \bar{d}_i^{-1/2}, \quad (2)$$

где σ_0 и k_{fi} – постоянные величины, характеризующие материал, $i = 1$ для основного металла, $i = 2$ для ЗТВ.

Связь напряжения течения с величиной пластической деформации описывается уравнением Льюдика:

$$\sigma_i = \sigma_{Ti} + c_i \varepsilon_i^{n_i}, \quad (3)$$

где σ_{Ti} и c_i – постоянные, зависящие от величины остаточной деформации, n_i – показатель деформационного упрочнения (здесь и далее $\varepsilon = \varepsilon_x$).

На начальных этапах деформирования $\sigma_1 \approx \sigma_2$. Предполагаем, что характеристики упрочнения металла в основном материале и на участке ЗТВ с повышенным диаметром зерна мало отличаются ($n_1 \approx n_2 \approx n$, $c_1 \approx c_2 \approx c$, $k_{f1} \approx k_{f2} \approx k$).

Подставляя (2) в (3) для ЗТВ и основного материала, получим

$$\varepsilon_{ЗТВ} = \left(\frac{k}{c} (\bar{d}_{осн\ мет}^{-1/2} - \bar{d}_{ЗТВ}^{-1/2}) + \varepsilon_{осн\ мет}^n \right)^{1/n}. \quad (4)$$

Таким образом, зная величину деформации в основном материале и средние значения диаметров зерен в основном материале и ЗТВ, возможно определение величины деформации в ЗТВ.

Как показали акустические исследования, между величиной пластической деформации и параметром акустической анизотропии существует устойчивая связь.

В результате акустических измерений получено распределение параметра акустической анизотропии по длине образцов до и после деформации рис. 4.

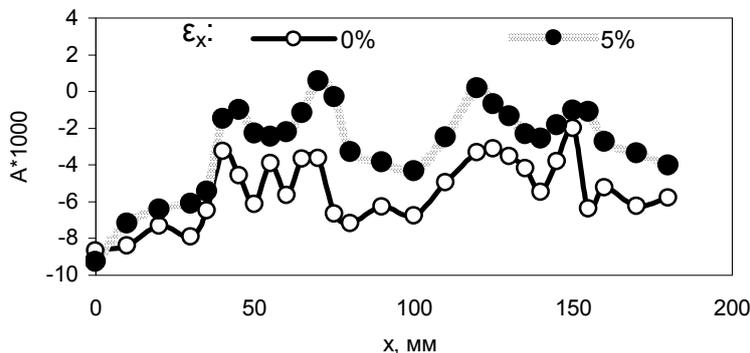


Рис. 4. Распределение величины акустической анизотропии по длине образца в исходном состоянии и после растяжения

Связь величины пластической деформации в исследуемых зонах с параметром акустической анизотропии хорошо аппроксимируется полиномом второй степени:

$$\varepsilon_{zi}(\%) = k_{0\varepsilon} + k_{1\varepsilon}A_i + k_{2\varepsilon}A_i^2, \quad (5)$$

где $k_{1\varepsilon} = 28000$, $k_{2\varepsilon} = 377$, $k_0 = 3,88$, индекс i — номер исследуемой зоны.

Следует отметить, что значения параметра акустической анизотропии в исследуемых зонах в исходном состоянии хорошо коррелируют с значением параметра A при величине пластической деформации образца $\varepsilon_x = 5\%$ (рис. 5).

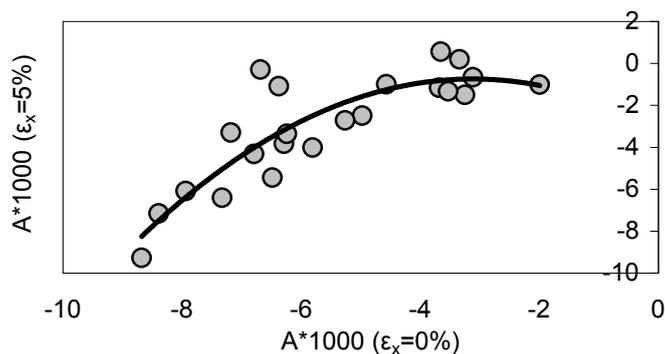


Рис. 5. Корреляционное поле значений параметра акустической анизотропии при деформации $\varepsilon_x = 5\%$ и значений того же параметра в исходном состоянии материала

Как отмечалось ранее, параметр A отражает развитие кристаллографической текстуры. Кривые на рис. 4 показывают, что изменение кристаллографической текстуры связано с ее начальным состоянием. Наблюдается автомодельность развития параметра A по длине образца, связанного с исходным структурным состоянием исследуемой стали.

Околошовная зона свариваемого материала также подвергается воздействию высоких температур, приводящих к существенным изменениям структурного состояния и механических характеристик.

В связи с изложенным, помимо образца с двумя ЗТВ исследовался образец, изготовленный из листовой горячекатаной стали СтЗсп, имеющий сварное соединение. Образец имел прямоугольное сечение $250 \times 20 \times 6$ мм. Сварной шов находился в середине образца.

Сварка выполнялась встык. Образец был подвергнут поэтапному одноосному растяжению с шагом деформации $\varepsilon_x=5\%$ вплоть до разрушения (разделения на 2 части). Распределение величины пластической деформации и параметра акустической анизотропии по длине сварного образца представлены на рис. 6, а и рис. 6, б соответственно.

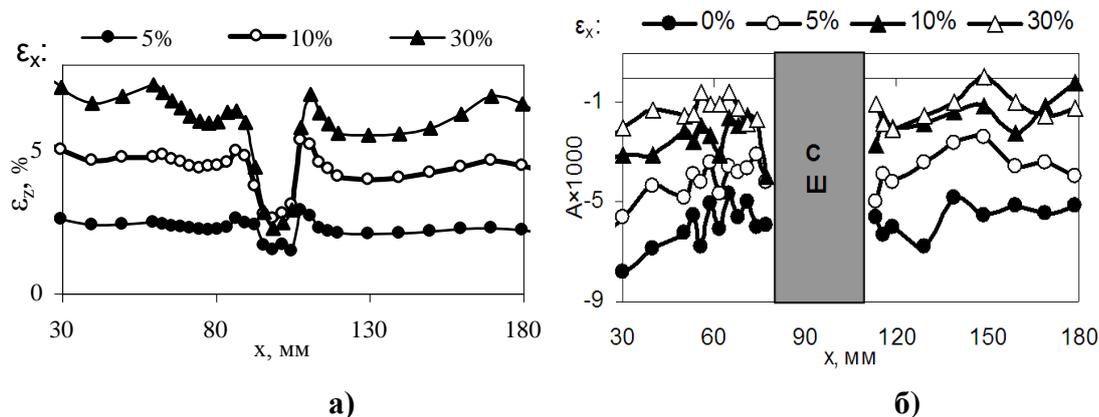


Рис. 6. Распределение по длине сварного образца:

а – величины пластической деформации; б – параметра акустической анизотропии

Связь величины пластической деформации ε_x со средним значением изменения параметра акустической анизотропии в зоне основного металла для исследуемого сварного образца можно представить в виде:

$$\varepsilon_x(\%) = k_{1\Delta} \Delta \bar{A}_i + k_{2\Delta} \Delta \bar{A}_i^2, \quad (6)$$

где $k_{1\Delta} = 1075, k_{2\Delta} = 242300$.

Использование связи $\varepsilon(A)$ для ЗТВ представляет значительные трудности, так как в ряде случаев диаметр пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) больше, чем размер ЗТВ. Кроме того, при больших деформациях образовавшиеся на поверхности материала углубления в результате локализации пластической деформации в ЗТВ не позволяют получить удовлетворительный акустический контакт между ПЭП и ОК. Оценка величины пластической деформации в зоне основного металла с помощью акустических измерений и проведение металлографических исследований дают возможность определять величину деформации в ЗТВ.

С учётом формулы (4) и корреляционной зависимостью между величиной пластической деформации и изменением среднего значения параметра акустической анизотропии в основном материале $\varepsilon_x(\Delta \bar{A})$ (6) величину пластической деформации в ЗТВ сварного соединения можно рассчитать по формуле:

$$\varepsilon_{\text{ЗТВ}} = \left(\frac{k}{c} (\bar{d}_{\text{оснмет}}^{-1/2} - \bar{d}_{\text{ЗТВ}}^{-1/2}) + (k_{1\Delta} \Delta \bar{A} + k_{2\Delta} \Delta \bar{A}^2)_{\text{оснмет}}^n \right)^{1/n}, \quad (7)$$

Для стали СтЗсп при определении $\varepsilon_{\text{сдв}}(\%)$ показатель деформационного упрочнения n составлял 0,2. Значение k/c определялось методом множественной регрессии и составило $0,5 \text{ мкм}^{-2}$.

Фактическое распределение пластической деформации для образца с локальным нагревом и ее расчетное значение в зоне основного металла (расчет производился с помощью уравнения (5)) и деформация на участке с повышенным диаметром зерна рассчитанная с помощью уравнения (7), представлены на рис. 7, а. На рис. 7, б приведены расчетные и фактические значения величины деформации в ЗТВ при различных значениях величины изменения акустической анизотропии в зоне основного металла для стали СтЗсп со сварным соединением.

Расчетные и фактические значения деформации имеют хорошее совпадение. Предложенный подход может использоваться, когда определение величины пластической деформации материала по изменению геометрических размеров невозможно, например, в случае отсутствия начальных данных о геометрических размерах объекта.

Таким образом, совместное использование оптического и акустического методов позволяют оценить распределение величины пластической деформации в материале, имеющем зоны локального термического влияния, при его одноосном растяжении по данным ультразвуковых и металлографических исследований.

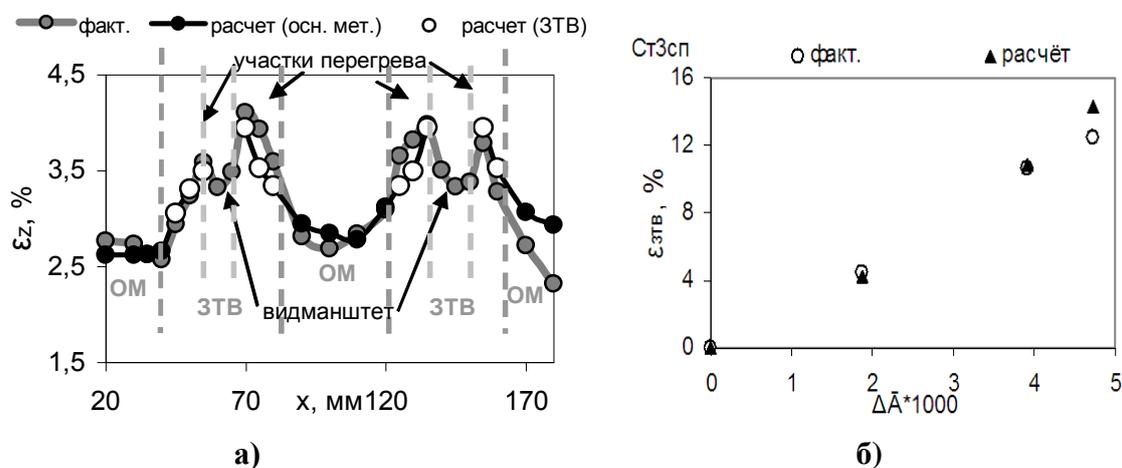


Рис. 7. Расчетное и фактическое:

а – распределение величины пластической деформации по длине цельного образца с зонами нагрева; *б* – значения величины пластической деформации в зависимости от изменения усредненного по основному металлу параметра акустической анизотропии

Выводы

В результате экспериментальных исследований получено неоднородное распределение величины пластической деформации по длине образцов, изготовленных из стали СтЗсп, и имеющих области локального термического воздействия, при их одноосном растяжении. Такое распределение величины пластической деформации связано с неоднородностью структурного состояния, полученного в результате термического влияния.

Металлографические исследования показали, что наибольшее значение величины пластической деформации наблюдается в ЗТВ на участке с повышенным диаметром зерна феррита. В результате акустических исследований получена зависимость $\epsilon(A)$ для стали СтЗсп, что дает возможность оценить величину пластической деформации в основном материале по данным ультразвуковых измерений.

Используя уравнение Холла-Петча для определения соотношения пределов текучести в ЗТВ и основного металла, а также зависимости $\epsilon(A)$ для основного металла, предложен алгоритм оценки величины пластической деформации в ЗТВ по данным ультразвуковых измерений и металлографических исследований.

Учитывая, что измерение параметра акустической анизотропии не требует информации о длине пути (толщине ОК), а металлографические исследования проводятся на поверхности материала, предложенный алгоритм оценки величины пластической деформации в основном материале и ЗТВ можно использовать при одностороннем доступе к ОК, без его разрушения.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 11-08-97070 и грант 09-08-00827).

Библиографический список

1. **Алешин, Н.П.** Справочник. Сварка. Резка. Контроль / Н.П. Алешин, Г.Г. Чернышов, Э.А. Гладков. – М.: Машиностроение, 2004. Т. 1. – 491 с.
2. **Allen, D.** The Measurement of Residual Stress in Textured Steel Using an Ultrasonic Velocity Combinations Technique / D. Allen , C. Sayers // Ultrasonics, 1984. Vol. 22. P. 179–188.

*Дата поступления
в редакцию 26.06.2012*

A. Gonchar, V. Mishakin

**EVALUATION OF PLASTIC DEFORMATION
IN THE STRUCTURAL-INHOMOGENEOUS MATERIALS
USING ULTRASONIC AND METALLOGRAPHIC RESEARCH**

Institute of mechanical engineering FGBUN n.a. A.A. Blagonravov (Nizhny Novgorod branch)

Purpose: Development of the algorithm estimates the value of plastic deformation in a material having a heat-affected zone, based on ultrasonic measurements and metallographic studies.

Design/methodology/approach; The proposed algorithm is based on ultrasonic measurements in the base material and metallographic research in the heat affected zone and base material.

Findings: It is possible, for example, to apply on the gas main where uniaxial tensile strain appear due to landslide.

Research limitations/implications: The present study solves the privacy problem of estimating the amount of deformation in uniaxial tension of welded joints.

Originality/value: The joint use of ultrasonic and metallographic methods allowed us to estimate condition construction for one-way access.

Key words: uniaxial tensile strain, ultrasound, metallography, weld, the thermal effect.

УДК 620

В.А. Скуднов, Н.В. Редькина, С.В. Харитонов

ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКАЯ ЗАКАЛКА СПЛАВА 44НХТЮ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты экспериментального исследования циклической закалки сплава 44НХТЮ с разным количеством циклов. Обоснована возможность интенсификации процесса с помощью предложенной термической обработки.

Ключевые слова: дисперсионно твердеющий сплав, термоциклическая обработка, закалка, рентгеноструктурный анализ, испытание на релаксацию, микроструктура.

Сплав 44НХТЮ является дисперсионно твердеющим элинваром на основе системы Fe-Ni, который сохраняет температурную стабильность модуля упругости до 100-400⁰С. Для получения оптимальных механических и физических свойств дисперсионно твердеющие элинвары подвергают закалке и старению. После закалки в воду с 900-950⁰С формируется структура, сплав становится высокопластичным и может подвергаться штамповке и другой механической обработке. Чем мельче зерно, тем более стабильное структурное состояние сплава. Известно, что ТЦО позволяет интенсифицировать термическую обработку и сильнее измельчает зерно, чем закалка. Поэтому целью данной работы послужило исследование циклической закалки сплава 44НХТЮ. Химический состав сплава приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химический состав сплавов с температурно стабильным модулем упругости, %

Марка сплава	C	Si	Mn	Fe	Ni	Cr	Mo	Ti	Al	S	P	ГОСТ
44 НХТЮ	«0,05	0,5-0,8	0,5-0,8	Осн	43,5-45,5	5,2-5,8	-	2,2-2,7	0,5-1,0	-	-	ГОСТ 10994

В работе исследовались образцы, вырезанные из прутков диаметром 15 мм и высотой 10 мм.

Термическую обработку по экспериментальным режимам, приведенным в табл. 2, проводили в лабораторных муфельных электрических печах сопротивления. Регулирование температуры – автоматическое. Температура измерялась с помощью термопары типа хромель-алюмель и потенциометра КСП-3, класс точности 0,5. Точность регулирования и измерения ±10⁰С. Измерение твердости производилось по методу Роквелла. Для выявления микроструктуры применяли электролитическое травление в 20%-ном растворе щавелевой кислоты. Микроструктура шлифа исследовалась под микроскопом МИМ-7 при увеличении x130.

Съёмка рентгенограмм производилась на рентгеновском дифрактометре общего назначения ДРОН-2. Режимы съёмки: материал анода – Fe, λ(Fe)=1930 X, U-25 кВ, I-0,5 мА, щели: 1мм -2мм. Результаты расчёта рентгенограмм в 3-х состояниях приведены в табл. 3.

Расшифровка рентгенограмм производилась, исходя из начального угла Вульфа-Брегга 2θ с учётом масштаба. Вычислялись соответствующие углы для всех характеристических линий спектра. Затем определялась относительная интенсивность всех линий с учётом матричной линии, имеющей относительную интенсивность 1,0. По уравнению Вульфа-Брегга определялись межплоскостные расстояния d/n [1]:

$$d/n = \lambda / 2 \sin \theta. \quad (1)$$

Величину минимальной плотности дислокаций в сплаве (ρ) определяли с помощью физической ширины первой и последней линий рентгенограммы и оценивали по формуле [1]:

$$\rho = \frac{3}{D^2}, \quad (2)$$

где D – размеры блоков, см.

Таблица 2

Режимы термоциклической обработки сплава 44НХТЮ

№ режима (образца)	Режим термической обработки
1	ТЦО 950±350, 3 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
2	ТЦО 950±350, 4 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
3	ТЦО 950±350, 5 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
4	ТЦО 950±350, 6 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
5	ТЦО 950±350, 7 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
6	ТЦО 950±350, 8 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
7	ТЦО 950±350, 9 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
8	ТЦО 950±350, 10 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)
9	Закалка 910±10°, время выдержки 30мин, охлаждение в воде (ГОСТ 10994-74)

Таблица 3

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов из сплава 44НХТЮ по режимам табл. 2

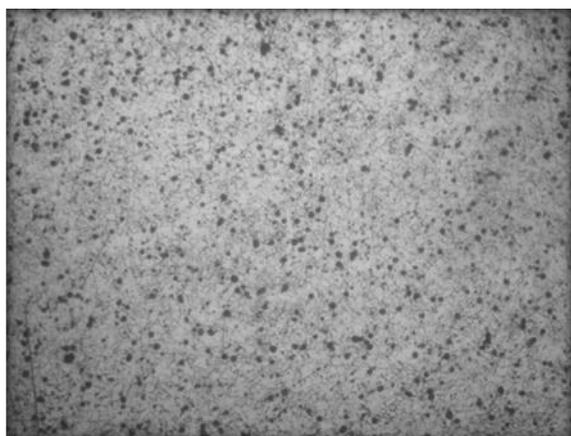
Интенсивность линий по режимам табл. 1									
Номер линии	9	2	3	4	5	6	7	8	Предполагаемая фаза
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	25	14	11	15	13	12	11	10	Ni ₃ Ti
2	125	68	51	68	62	54	52	46	γ
3	10	7	5	6	6	5	5	5	Ni ₃ (Ti,Al), Fe ₂ Ti
4	40	33	25	29	29	21	24	21	γ
5	3	4	3	3	3	2	3	2	Cr ₂ Ti
6	15	18	16	15	17	9	14	10	γ
7	5	5	4	4	5	4	4	4	Cr ₂ Ti
8	35	29	28	30	32	18	24	17	γ
	-	24	18	23	21	20	28	24	HRC

Таблица 4

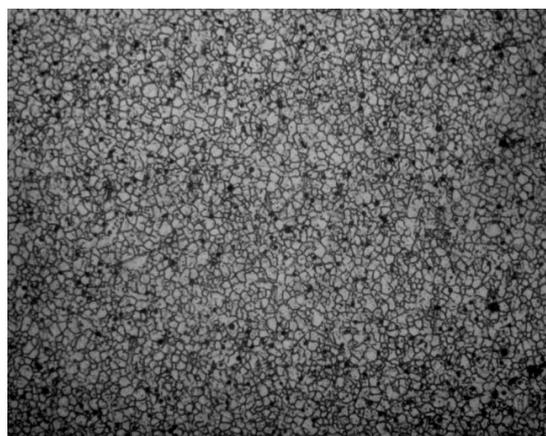
Результат исследования микроструктуры образцов из сплава 44НХТЮ, обработанных по режимам табл. 2

Номер режима (табл. 2)	Твердость, HRB	Плотность дислокаций Q , см^{-2}	Балл зерна
9	86	$4,6 \times 10^9$	-
2	102	$8,1 \times 10^9$	9

Микроструктуры сплава 44НХТЮ после различных термических обработок представлены на рис. 1



а)



б)

Рис. 1. Структура образцов из сплава 44 НХТЮ после термической обработки, х130:
 а - акалка $910 \pm 10^\circ$, время выдержки 30 мин, охлаждение в воде (ГОСТ 10994-74);
 б - ТЦО 950 ± 350 , 4 цикла (охлаждающая среда-воздух, окончательное охлаждение в воде)

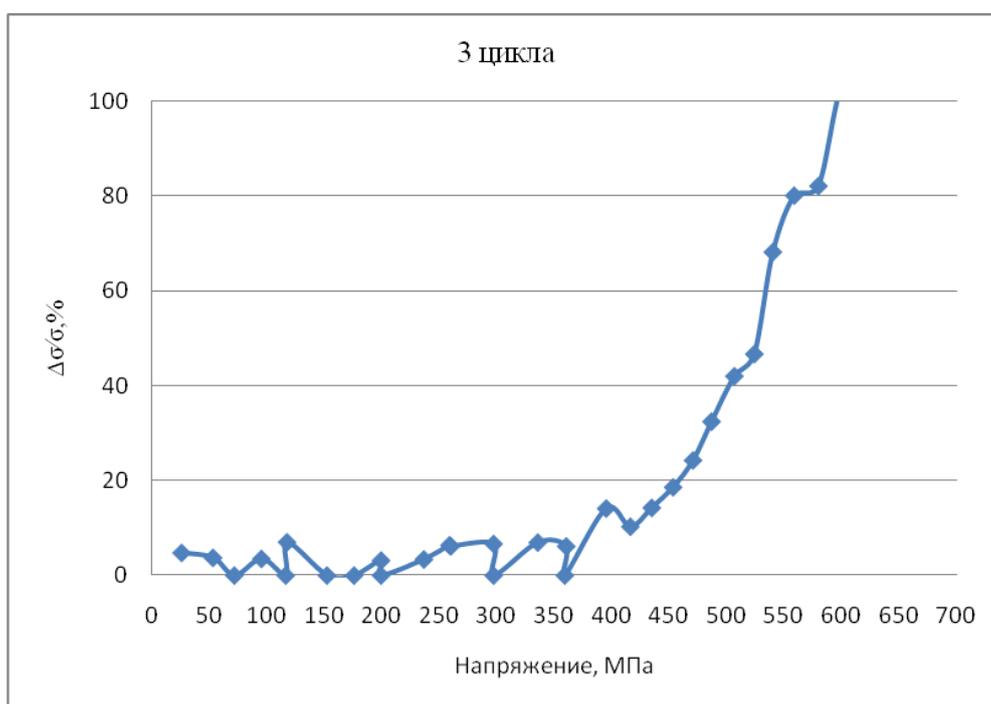


Рис. 2. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 1 после трех циклов

По приведенным фотографиям микроструктуры видно, что в результате четырехразового циклирования закалки зерно получается более мелким, чем при обычной закалке. Кроме того, режим 2 позволяет получить наиболее мелкое зерно, высокую твердость и плотность дислокаций, а, следовательно и более высокую прочность сплава по сравнению с режимом 9 табл. 2.

Результаты испытаний на релаксацию образцов из сплава 44НХТЮ представлены на рис. 2-9.

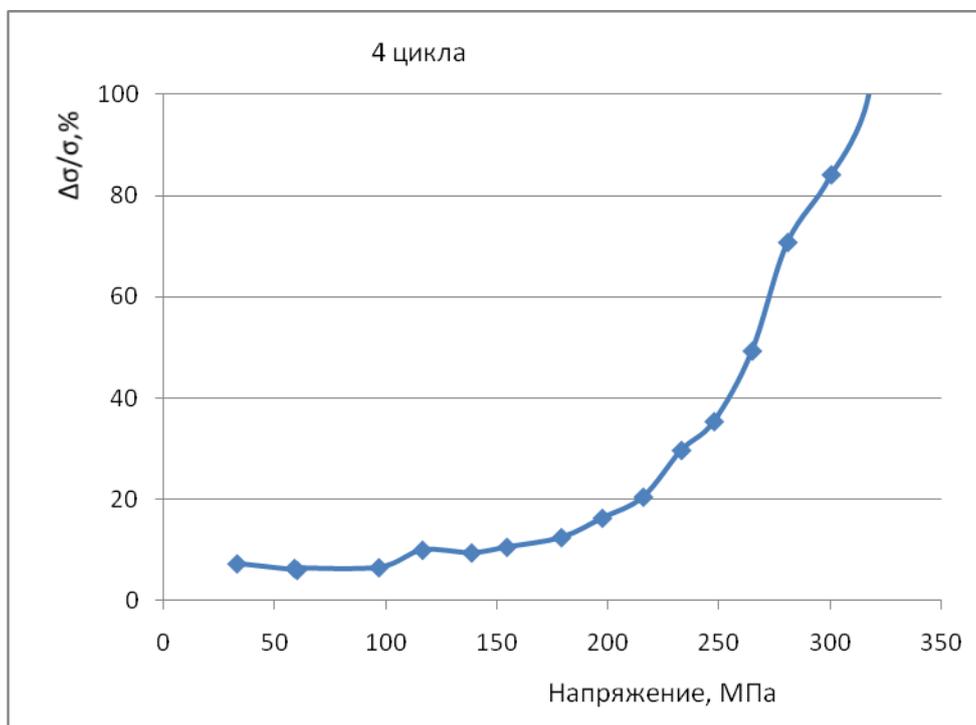


Рис. 3. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 2 после четырех циклов

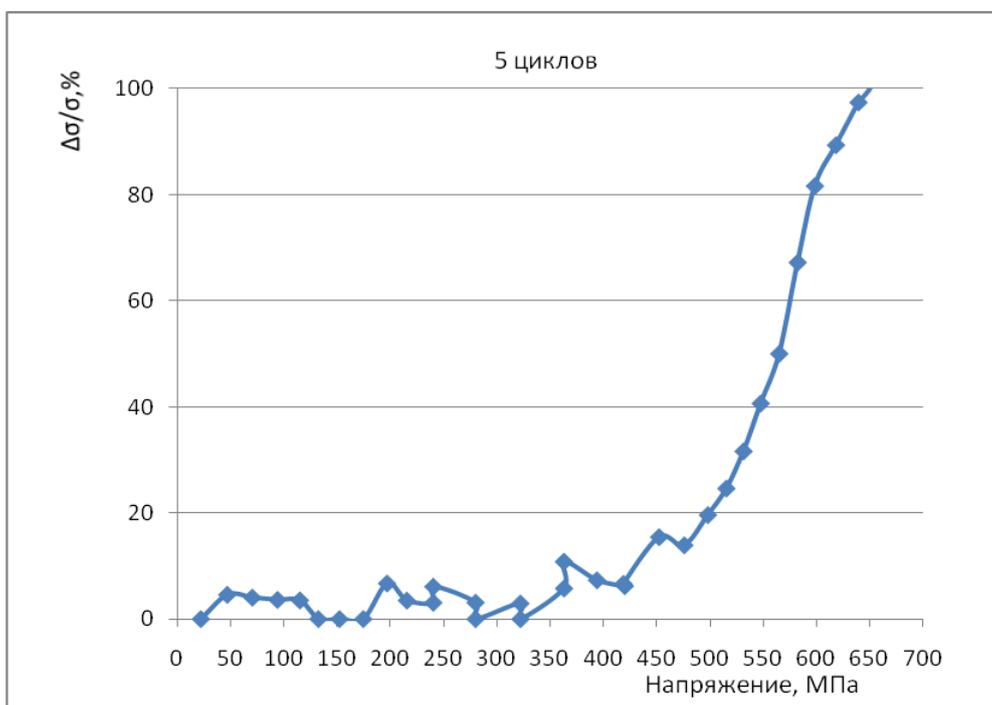


Рис. 4. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 3 после пяти циклов

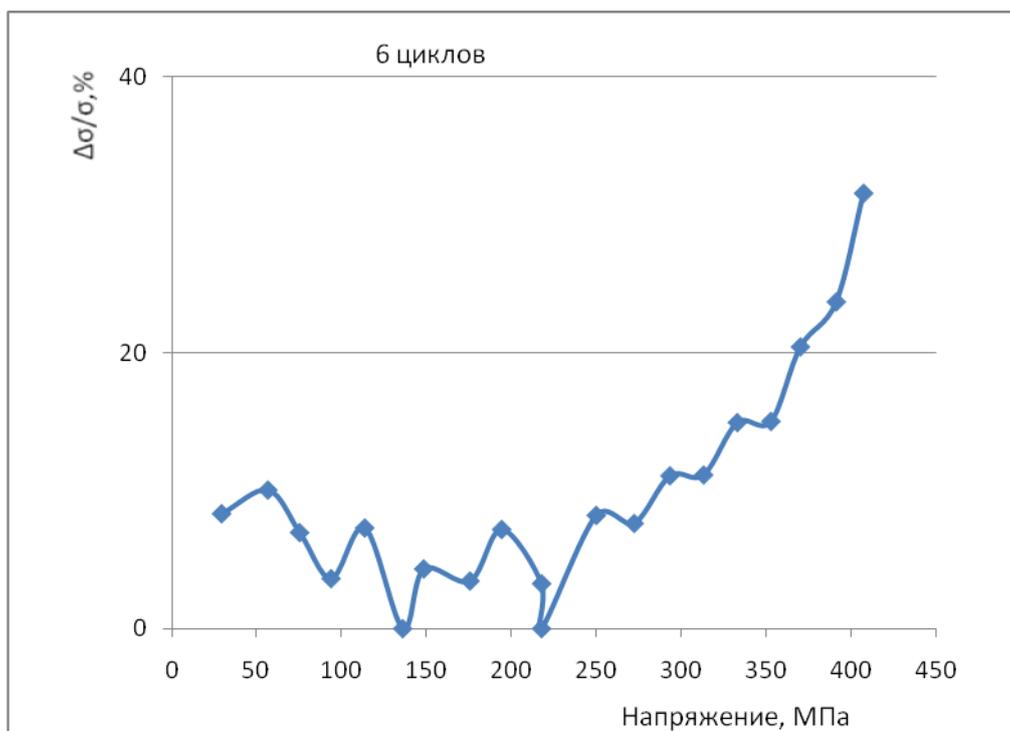


Рис. 5. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 4 после шести циклов

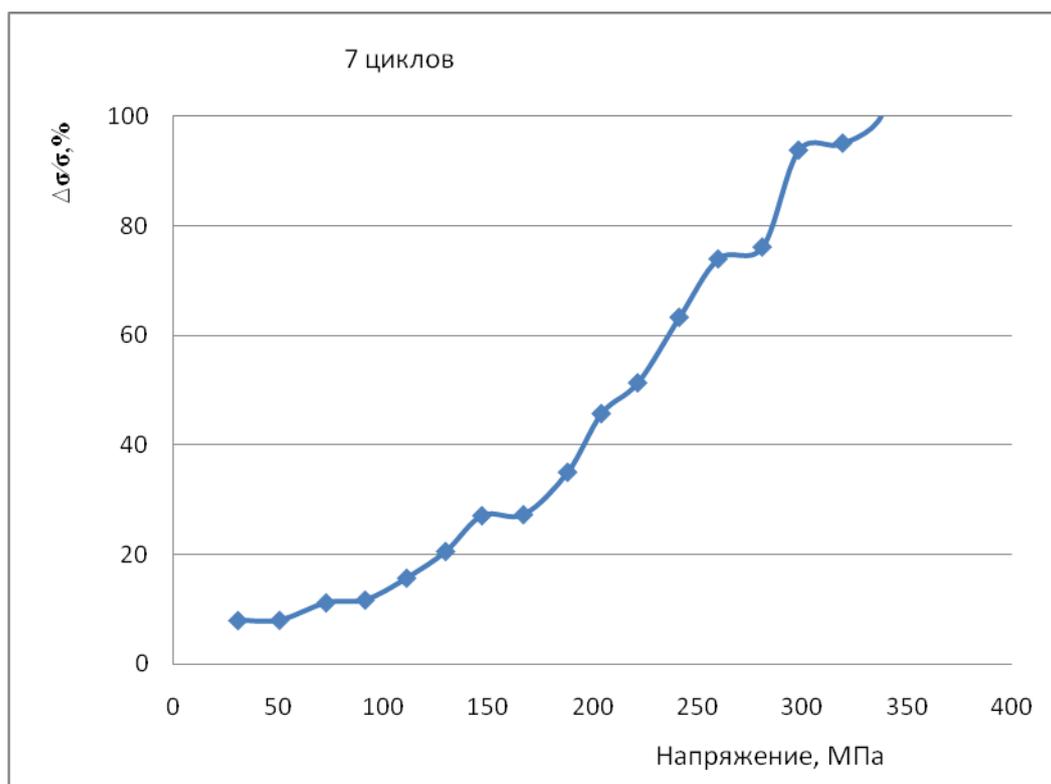


Рис. 6. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 5 после семи циклов

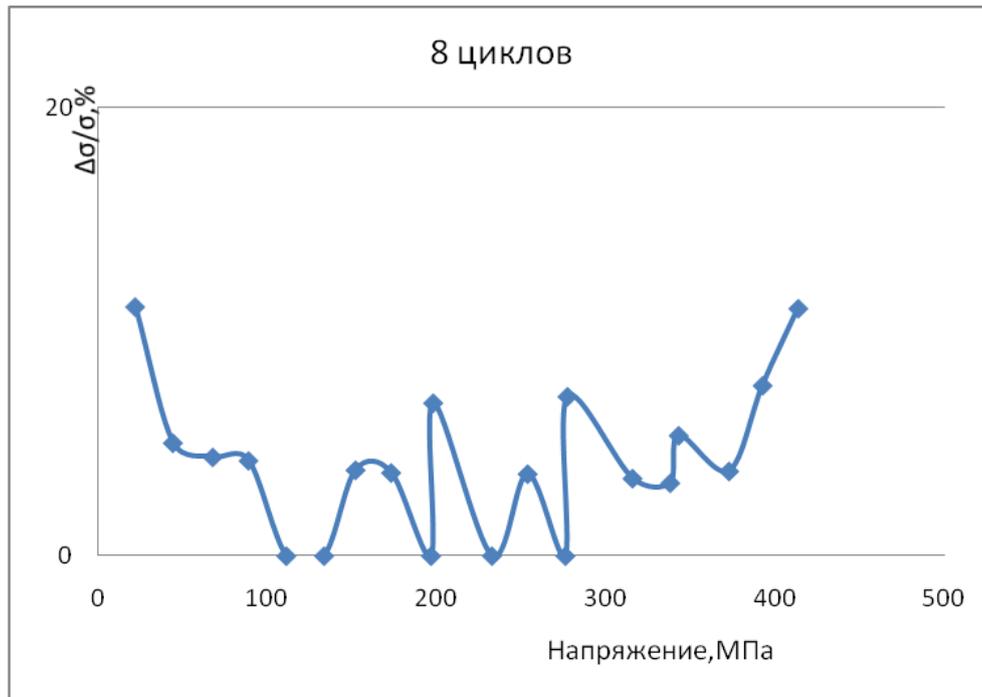


Рис. 7. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 6 после восьми циклов

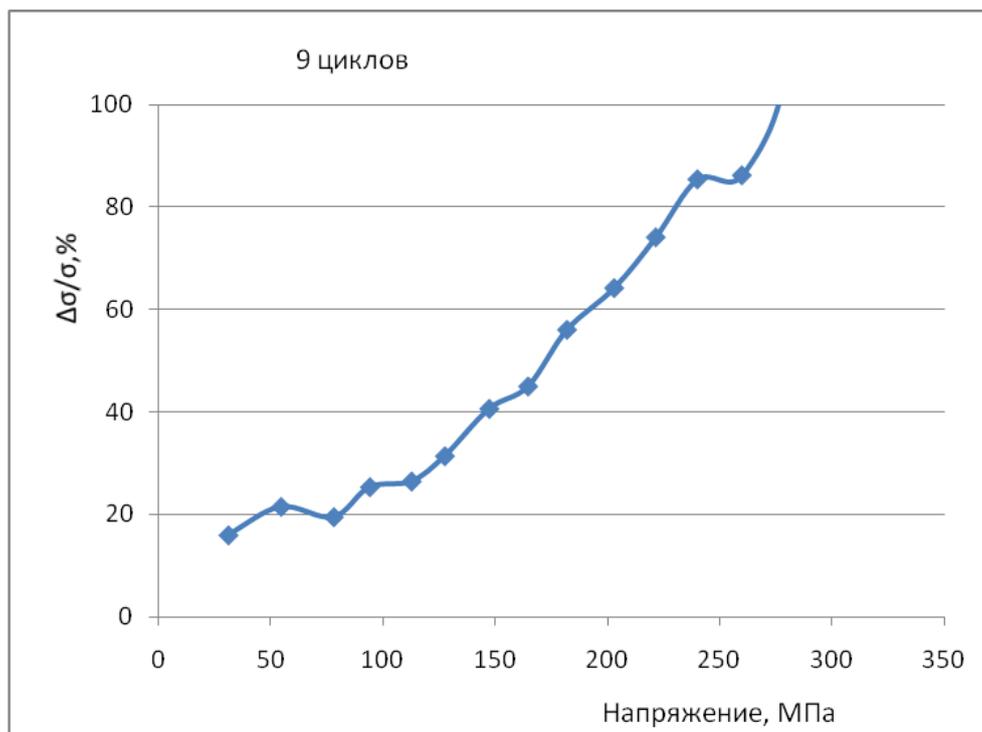


Рис. 8. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 7 после девяти циклов

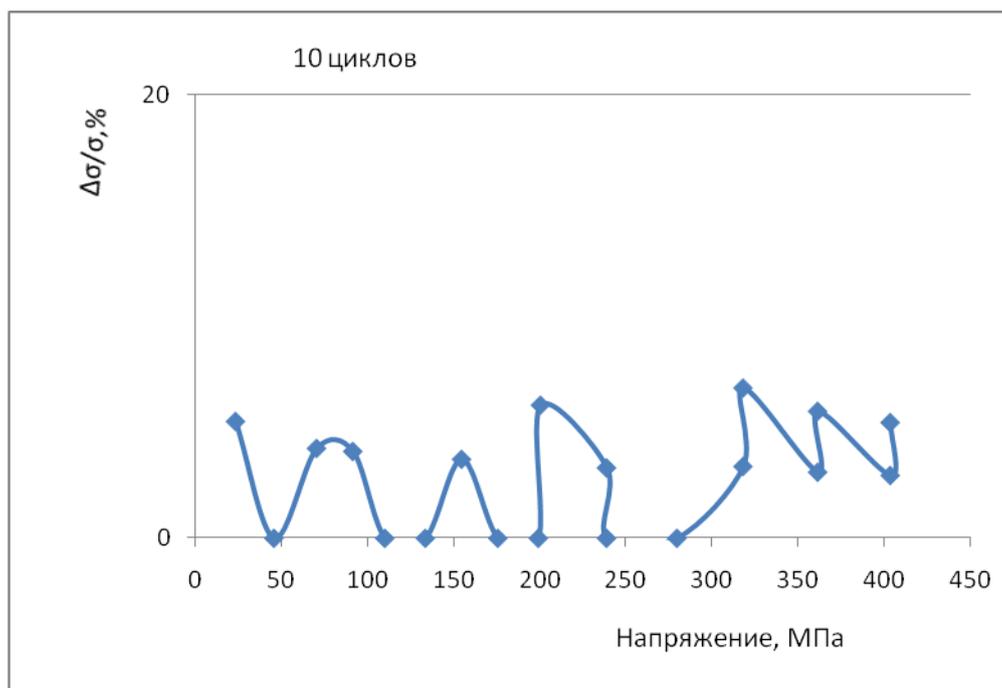


Рис. 9. График связи параметров релаксации напряжений с уровнем приложенного напряжения образца, обработанного по режиму 8 после десяти циклов

Результаты испытаний на релаксацию образцов из сплава 44НХТЮ, обработанных по режимам табл. 2, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты исследованных образцов из сплава 44НХТЮ

	Номер режима термической обработки образцов, обработанных согласно табл. 2								
	1	2	3	4	5	6	7	8	Закалка
σ_0	395	138	394	250	111	277	94	318	-
σ_T	627	298	666	407	347	414	287	404	-
HRC,HRB	21 HRC	24 HRC	18 HRC	23 HRC	21 HRC	20 HRC	28 HRC	24 HRC	86HRB

Изменение интенсивностей спектральных линий рентгенограмм образцов после рентгеноструктурного анализа образцов из сплава 44НХТЮ, обработанных по режимам табл. 2 и отличающихся разным количеством циклов закалки, представлены на рис. 10.

Результаты рентгеноструктурного анализа образцов из сплава 44НХТЮ по режимам табл. 2 представлены в табл. 3.

Результаты механических испытаний образцов из сплава 44НХТЮ, обработанных по режимам табл. 2 представлены в табл. 5.

Из рис. 10 и табл. 3 видно, что количество выделенной фазы Cr_2Ti практически не меняется с изменением числа циклов при закалке. Количество фазы Ni_3Ti с увеличением числа циклов при закалке уменьшается. Наибольшая твердость сплава достигается при 9 циклах, когда количество всех фаз наименьшее по сравнению с термическими обработками

по режимам 1-6 табл. 2, при дальнейшем снижении общего количества всех фаз (10 циклов) твердость начинает падать.

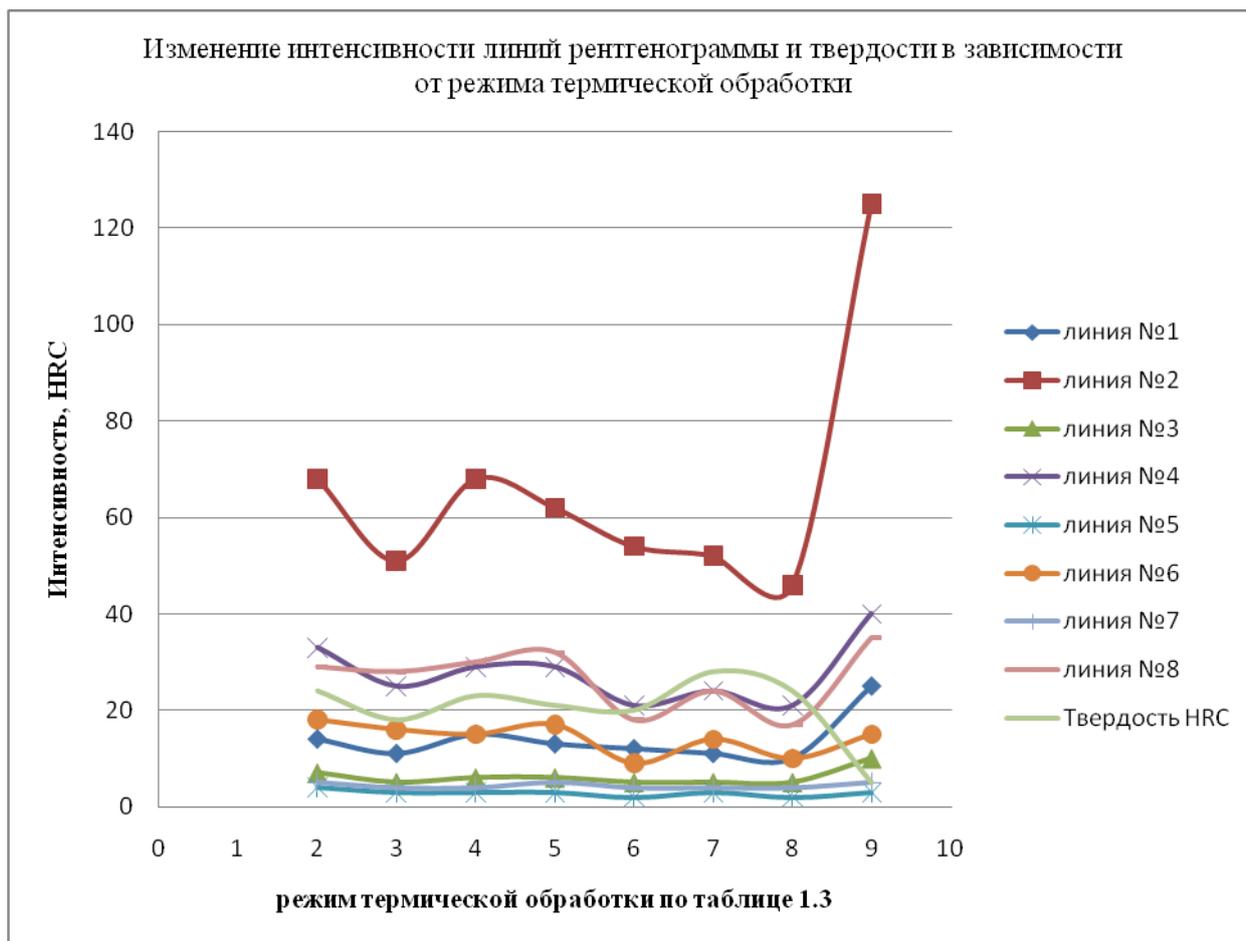


Рис. 10. Изменение интенсивностей спектральных линий 1-8 рентгенограмм образцов из сплава 44НХТЮ, обработанных по режимам табл. 1.3

Выводы

1. Применение термоциклической обработки позволяет эффективно улучшить микроструктуру элинварного сплава 44НХТЮ. Совершенствование структуры сплава при термоциклической обработке происходит вследствие термических напряжений, а также образования и растворения интерметаллидов. Плотность дислокаций после четырехразового термоциклирования закалки значительно выше, чем после обычной закалки в воду, что свидетельствует об увеличении прочности.

2. Термоциклирование закалки позволяет интенсифицировать процесс термической обработки и измельчить зерно. Полученные результаты следует использовать для оптимизации режима закалки элинварного сплава 44НХТЮ.

Библиографический список

1. **Миркин, Л.И.** Рентгеноструктурный контроль машиностроительных материалов: справочник / Л.И. Миркин. – М.: Машиностроение, 1979. – 135 с.
2. **Редькина, Н.В.** Влияние термоциклической обработки на структуру прецизионного сплава 44НХТЮ по сравнению со стандартными режимами термической обработки/ Н.В.Редькина,

В.А. Скуднов, С.В. Харитонов // Деформация и разрушение материалов и наноматериалов: тез. докл. IV междунар. конф., Москва, ИМЕТ РАН, 25-28 октября 2011 г. 2011. С. 389.

3. **Федюкин, В.К.** Термоциклическая обработка металлов и деталей машин / В.К. Федюкин, М.Е. Смагоринский. – Л.: Машиностроение, 1989. – 255 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.06.2012*

V.A. Skudnov, N.V. Redkina, S.V. Charitonov

THERMOCYCLIC HARDENING OF ALLOY 44HXTIO

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

Purpose: This paper deals with cyclic hardening alloy.

Design/methodology/approach: Research is proposed based on x-ray scattering techniques, methods for stress relaxation testing, rockwell hardness Test and microstructure analysis.

Findings Thermocyclic hardening to speed up the process of heat treatment and to grind grain.

Research limitation/implications: The present study provides a starting-point for further research in the thermocyclic treatment.

Originality/value: Moreover, the influence of the technological parameters of the thermocyclic treatment regime on the structural changes in alloy 44HXTIO is discovered and the most effective regime of this treatment is recommended.

Key words: dispersion hardened alloys, thermocyclic processing, hardening, x-ray scattering techniques, relaxation of pressure, microstructure.

УДК 629.113:011.5

В.Г. Пачурин¹, А.А. Филиппов², Г.В. Пачурин³**ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРНО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОКАТА СТАЛИ 38ХА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНОГО КРЕПЕЖА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Метмаш»², ООО «Нау стандарт»³

Выполнен анализ факторов качества калиброванного проката, предназначенного для холодной высадки метизных изделий. Предложена рациональная технология подготовки калиброванного проката стали 38ХА без обточки для холодной объемной штамповки крепежных изделий, позволяющая получать прокат с хорошей способностью к холодной высадке и превосходящий по всем показателям изготовленный по действующей технологии. Предлагаемая технология изготовления калиброванного проката 38ХА Ø9.65 мм является ресурсосберегающей и экологически более чистой по отношению к действующей технологии, так как при этом отсутствуют вредные выбросы от печей, где происходит отжиг проката, травильные растворы освежаются реже, так как после отжига проката способом ТВЧ пленка окалина на нем образуется минимальная.

Ключевые слова: калиброванный прокат, качество поверхности проката, холодная объемная штамповка, отжиг, травильные растворы, ресурсосбережение, экологичность

Повышение качества материалов деталей машин является важнейшей составляющей безопасности металлоконструкций. Пожалуй, трудно найти среди ответственных и широко распространенных в машиностроении деталей, чем разновидности метизного производства, в том числе автомобильного крепежа, изготавливаемого холодной высадкой из калиброванного проката углеродистой, высокоуглеродистой и легированной проволоки.

В последнее время стала широко применяться низкоуглеродистая боросодержащая доэвтектоидная сталь 20Г2Р, которая, несмотря на видимые преимущества, обладает рядом чисто технологических трудностей. К ним относится необходимость предотвращения связывания бора в нитриды при выплавке стали, так как на прокаливаемость стали оказывает влияние не весь присутствующий в стали бор, а только «эффективный» (твердорастворимый, не связанный в нитриды). Нарушение этого условия приводит к нестабильности их свойств и низкому качеству проката из-за не возможности получения необходимой твердости после закаливания. Кроме того, многие производители высокопрочного крепежа в России вынуждены закупать горячекатаный прокат из боросодержащих сталей за рубежом, что приводит к удорожанию продукции. С этим может быть связана достаточно низкая доля потребления таких сталей заводами, выпускающими нормали.

В настоящее время в метизном производстве довольно широко распространены стали 35Х, 38ХА и 40Х. Так, более 60% крепежа классом прочности 10.9 и выше изготавливают из этих сталей с последующим термоулучшением высаженных болтов. Ценовая политика к прокату данных сталей со стороны металлургических комбинатов значительно гибче, чем к боросодержащим сталям. Цена одной тонны горячекатаного проката хромистых сталей, как правило, на 16-20% ниже цены одной тонны боросодержащей стали.

За рубежом крепежные изделия повышенной прочности (класс прочности 8.8 и выше) составляют 90-95% от общего объема производства, в то время как в РФ доля крепежа повышенной прочности составляет 15-18% от общего выпуска. Поэтому расширение производства и применение крепежных изделий повышенной прочности является актуальной задачей отечественной промышленности.

В настоящее время производство крепежа в Российской Федерации сократилось, так как значительная часть объемов данного продукта начала поступать из Китая, Тайваня и др.

Также одной из главных причин сокращения производства крепежных изделий явилось уменьшение объемов в машиностроении в целом и в автомобилестроении в частности.

Свойства метизов и их эксплуатационные показатели формируются на всех стадиях металлургического передела, начиная с выбора шихтовых материалов для выплавки металла и заканчивая обработкой готовой проволокой [1–3].

Наряду с применением высокопрочных металлоизделий традиционной формы, внедрением новых прогрессивных конструкций актуальной задачей остается производство крепежных изделий без внутренних дефектов и дефектов поверхности [4]. Для обеспечения изготовления методом холодной объемной штамповки массовых деталей требуется качественный горячекатаный прокат с осадкой до $1/3$ первоначальной высоты образца, а калиброванный прокат должен выдерживать осадку до $1/4$ первоначальной высоты образца.

Известно [5], что выпуск высококачественной продукции зависит: от качества исходного проката, технологии изготовления изделий, характера нагрузки, степени деформации, от состояния оборудования и квалификации обслуживающего персонала. Материал, применяемый для объемной холодной штамповки метизов, должен обладать достаточной пластичностью, равномерными механическими свойствами и химическим составом, а также не должен иметь поверхностных и внутренних дефектов [6]. Если эти условия выполняются, то использование холодной высадки при производстве крепежных изделий позволяет достичь коэффициента применения металла 95-98%.

При уменьшении расхода металла на первое место выходит качество исходного проката. Причиной повышенного расхода металла является отбраковка по дефектам «трещины» и «надрывы» горячекатаного проката, поставляемого с металлургических заводов. К поверхностным дефектам относятся такие дефекты, как раскатные газовые пузыри, волосовины, рванины, закаты и др. Также дефектом поверхности металлопроката является образование обезуглероженного слоя, существенно ухудшающего механические свойства в поверхностных слоях проката. Поверхность становится восприимчивой к образованию рисок, задигов, царапин при прокатке, калибровке и холодной высадке [1, 7]. По своему характеру дефекты на поверхности горячекатаного проката, поступающего с металлургических предприятий, могут быть металлургического (при выплавке и разливке стали, охлаждении слитков), прокатного (при деформации и охлаждении проката) и волочильного (при калибровании проката или волочении проволоки) производства [1].

Высокотемпературный нагрев металла в металлургических печах перед его нагревом при прокатке вызывает интенсивное развитие газовой коррозии на его поверхности, следствием которой является окалинообразование, обеднение поверхностных слоев углеродом, перераспределение легирующих элементов в этих слоях (угар легкоокисляемых элементов и повышение концентрации относительно инертных к кислороду элементов).

Если на слитке пороки полностью не удалены, то при прокатке они переходят на блюмы (слябы), заготовки, на горячекатаный прокат, на готовый калиброванный прокат и далее на крепежные изделия в процессе холодной объемной штамповки.

Основной технической дефект при производстве крепежа связан с высокой степенью деформации (до 88%) в процессе холодной объемной штамповки, так как трещины исходного горячекатаного и калиброванного проката, не лежащие на поверхности, распространяются на штампуемом изделии в результате максимальных полных касательных напряжений. Чаще всего трещины, возникающие при холодной штамповке, параллельны оси подката, а трещины, возникающие при отделочных операциях, перпендикулярны его оси. Однако даже соблюдение всех технологических требований и рекомендаций по структуре и механическим свойствам исходного горячекатаного и калиброванного проката еще не гарантирует отсутствие брака металлоизделий при обработке давлением.

Наиболее распространенным видом дефектов металлургического происхождения являются неметаллические включения – частицы шлака и огнеупоров. При выпуске расплавленного металла из печи в ковш и из ковша в изложницу шлак механически извлекается

струей металла из футеровки печи или изложницы. Таким образом, частицы огнеупорного материала попадают в сталь. При дальнейшей обработке круглого проката холодным пластическим деформированием трещины образуются в местах наибольших скоплений неметаллических включений даже при самых благоприятных для холодной объемной штамповки механических свойствах и микроструктуре.

Поэтому одной из проблем изготовления качественного материала для холодной высадки является обеспечение минимального содержания неметаллических включений. При этом осуществляя входной контроль металлопроката для холодной высадки, важно проводить исследование на их наличие.

Причиной образования трещин при штамповке со степенью деформации от 40% и более могут также являться дефекты сталеплавильного (при разливке и охлаждении слитков) и прокатного (при деформации и охлаждении проката) происхождения.

Важным условием повышения технологичности производства калиброванного проката и дальнейшей холодной высадки крепежа является наличие однородной структуры и уровня механических свойств по сечению мотков металла. Структура – основное звено, связывающее технологию материала и его поведение в эксплуатации. Для успешного осуществления технологических операций холодной объемной штамповки калиброванный прокат должен иметь оптимальную макро- и микроструктуру. Макроструктура стали должна быть однородной без усадочных рыхлостей, расслоений, неметаллических включений, не иметь пор, пузырей, трещин, ликвационной зоны, флокенов и других дефектов, видимых невооруженным глазом на поперечных темплетах после травления [1,7]. Площадь ликвационной зоны не должна превышать 40% поперечного сечения заготовки, в противном случае на головках изделий образуются трещины, а при накатывании резьбы – расслоения.

Макроструктура легированной стали должна соответствовать ГОСТ 4543-71. Величина аустенитного зерна в легированной стали должна быть не крупнее номера 5. Характер микроструктуры, применяющейся для ХОШ, влияет на протекание технологического процесса и качество изделий. Для обеспечения стойкости рабочих деталей штампов, исключения появления трещин, разрывов сталь в состоянии поставки должна иметь однородную микроструктуру, в которой не допускается полосчатость, структурно-свободный цементит, расположенный по границам зерен в виде скоплений или сетки. Микроструктура калиброванной стали марки 38ХА не должна иметь грубопластинчатого перлита, игольчатости и видманштеттовой структуры, поскольку они резко снижают пластичность и ударную вязкость стали. К стали для холодной высадки могут быть предъявлены следующие дополнительные требования: повышенные нормы по поперечному сужению, нормированная макро- и микроструктура, размер зерна, глубина обезуглероженного слоя, ограничение содержания кремния.

На штампуемость легированной стали 38ХА большое влияние оказывает размер и ориентировка зерен и структура стали. При значительном размере зерен и резко выраженной их пластичности при холодном выдавливании возможны скалывание и расслоение головки изделия. При очень мелком зерне возрастает усилие деформации. Для этих сталей при высадке изделий наиболее благоприятной является структура, определяемая перлитным числом 70-80, что соответствует процентному содержанию сфероидального цементита в общей массе перлита. Наиболее важной характеристикой поведения металла при холодной объемной штамповке является номер зерна феррита и его твердость. Для достижения оптимального значения по этим показателям необходимо поддерживать химический состав стали в более узких пределах (особенно по углероду). Обычно в структуре малоуглеродистой стали встречается структурно-свободный цементит, который образуется при прокате с последующим замедленным охлаждением или при длительном отжиге стали. Расположение структурно-свободного цементита по границам зерен в виде вкраплений или в виде сетки способствует резкому ухудшению пластичности стали и появлению трещин на изделиях, а также поперечному расслаиванию головок изделий.

Некоторые авторы утверждают, что для холодной высадки необходимо применять только металл с микроструктурой 100% зернистого перлита, так как данная структура спо-

собна воспринимать большие пластические сдвиги. Ряд авторов [8] считает, что с увеличением в структуре стали доли пластинчатого и сорбитообразного перлита наблюдается рост сопротивления пластической деформации и снижение пластичности. В то же время авторы [9] указывают на то, что уже наличие зернистого перлита более 60% обеспечивает требуемую технологическую пластичность.

По мнению [10], наилучшей штампуемостью в холодном состоянии обладают стали со структурой зернистого перлита (не менее 80%) балла 5-7 и относительным сужением не менее 50-60%. Особенно это важно для легированной стали 38ХА. При наличии в микроструктуре указанных сталей менее 80% зернистого перлита они не выдерживают осадки даже 1/3 первоначальной высоты, хотя в производстве крепежных изделий указанная сталь при высадке испытывает деформацию до 75-80%.

Авторы [11] рассматривают несколько способов получения зернистого перлита в доэвтоктоидных сталях: нагрев выше критической точки A_{c1} (надкритический отжиг); нагрев ниже критической точки A_{c1} (субкритический отжиг); отжиг после холодной деформации (рекристаллизационный); изотермический отжиг; маятниковый отжиг; термоциклический отжиг.

Вопрос получения крепежных изделий с микроструктурой металла - сорбит практически не исследован. Широко используется в производстве получение высоконагартованной проволоки, после операции патентирования и волочения. Патентирование позволяет получать в проволоке сорбитообразную структуру, после чего волочением можно добиться её высоких прочностных и пластических свойств.

Ранее [2, 3, 12] нами подробно изучался вопрос разработки рациональной ресурсосберегающей технологии получения упрочненных длинномерных болтов из конструкционной легированной стали 40Х на основе изучения влияния режимов термической (патентирования и изотермической закалки) и пластической (волочением) обработки на структурное состояние и механические свойства проката перед холодной высадкой.

С этой целью были установлены: закономерности влияния структуры и механических свойств горячекатаного проката на качество проката после волочения для различных режимов технологической подготовки; исследовано влияние степени обжатия на структуру и механические свойства проката после волочения; изучено влияние термической (патентирования и изотермической закалки) и пластической обработки на структуру и механические свойства проката горячекатаного и после волочения, и выбраны оптимальные ее режимы перед холодной высадкой крепежных изделий; установлена рациональная технологическая схема подготовки калиброванного проката стали 40Х для дальнейшей высадки упрочненных длинномерных болтов с обрезной головкой.

В настоящей работе предлагается разработанная экологичная и ресурсосберегающая технология подготовки калиброванного проката из стали 38ХА без обточки для холодной объемной штамповки крепежных изделий.

Методика

Технология подготовки горячекатаного проката диаметром 9.65 мм к холодной объемной штамповке высокопрочных крепежных изделий из стали 38ХА на предприятиях часто включает в себя: отжиг на зернистый перлит в камерной печи с выдвижным подом при температуре 750°C (24 часа); травление металлопроката до полного удаления окалины, калибрование с диаметра 12,0 мм со степенью обжатия 26 %; рекристаллизационный отжиг в колпаковых печах с защитной атмосферой, калибрование проката с диаметра 10,2 мм со степенью обжатия 10,0 %. При этом перед холодной высадкой калиброванный прокат должен отвечать требованиям ГОСТ 10702-78: иметь $\sigma_b \geq 600$ МПа; твердость НВ < 207; глубину безуглероженного слоя < 0,05 мм (ГОСТ 10702-78); качество поверхности должно соответствовать группе Е ГОСТ 14955-77 (допускаются отдельные риски глубиной не больше половины предельного отклонения по диаметру).

В процессе подготовки к холодной объемной штамповке ответственного крепежа для

удаления поверхностных дефектов часто на производстве приходится выполнять дорогостоящую обточку поверхности проката.

Поверхностные дефекты в исходном горячекатаном прокате, поступающие с металлургических комбинатов, в связи со значительными степенями деформации, возникающими при холодной штамповке крепежных деталей, могут способствовать экономическим потерям на предприятии. Переработка горячекатаного проката с металлургическими дефектами увеличивает количество бракованных крепежных изделий, а, следовательно, приводит к повышенному расходу металла.

Считается [13], что для калиброванного проката под холодную высадку одинаково нежелательно применение твердой (более НВ 260) и мягкой (менее НВ 150) стали. При высадке стали высокой твердости резко возрастают удельные усилия на инструмент, снижается его стойкость, появляются трещины на металле, ухудшается заполнение полости матрицы при штамповке на прессах. При высадке «мягкой» стали ухудшается стойкость заготовки, деформирование происходит неравномерно и металл быстро «налипает» на инструмент. Анализ литературных данных позволяет рекомендовать следующие основные показатели штампуемости стали применительно к ХОШ: НВ от 170 до 260; $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,5 - 0,65$ - данное соотношение зависит от химического состава; $\Psi \geq 0,6$ сталь весьма пластична; $0,5 < \Psi < 0,6$ - сталь достаточно пластична, $\Psi < 0,5$ - сталь непригодна к высадке, где Ψ - относительное сужение, а σ_s - напряжение течения (истинное напряжение).

Отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_B$ в значительной мере зависит от химического состава, режимов термообработки и калибровки. Величина суммарной деформации (калибровка + все переходы) при штамповке на автоматах достигает 85% [13]. При отношении предела текучести к пределу прочности $\sim 0,9$ наблюдается наилучшая величина такой важной эксплуатационной характеристики крепежного изделия, как высокая релаксационная стойкость. А величина относительного сужения считается [14] основным показателем пластичности штампуемого проката. Наилучшей пластичностью при холодной объемной штамповке обладает калиброванный прокат с относительным сужением 50-60%.

Статистический анализ экспериментальных данных показывает, что калиброванный прокат стали 38ХА, изготовленный по существующей технологии, в абсолютном большинстве случаев имеет σ_B выше 700 МПа (среднее значение $\sigma_B = 790$ МПа) и значения $\sigma_{0,2} > 640$ МПа (среднее значение $\sigma_{0,2} = 690$ МПа), причем разница по $\sigma_{0,2}$ и σ_B при проверке достигает 100-110 МПа. Половина проверяемого металлопроката имеет твердость выше допустимой ГОСТ 10702-78- НВ>207, а в большинстве случаев $\Psi < 60\%$, то есть ниже допустимой, около 20% поставляемого металлопроката имеет обезуглероженный слой величины более 0,05 мм, что превышает норму допустимого значения. Более 50% калиброванного проката по качеству поверхности не отвечает требованиям ГОСТ 14955-77. По микроструктуре только половина металла после отжига на зернистый перлит соответствует требованиям НТД из-за неравномерности прогрева садки металла в рабочем пространстве печи.

С целью исключения названных недостатков исследовался калиброванный прокат стали марки 38ХА из исходного размера горячекатаного проката диаметром 12,0 мм по следующей технологии:

- 1 - травление горячекатаного проката диаметром 12,0 мм в соляной кислоте при температуре 60-67°C до полного удаления окалины;
 - 2 - калибрование проката со степенью обжатия 15,9 %;
 - 3 - отжиг с нагревом ТВЧ при температуре 760-780°C;
 - 4 - травление металлопроката до полного удаления окалины;
 - 5 - калибрование проката со степенью обжатия 23 %;
 - 6 - отжиг с нагревом ТВЧ при температуре 760-780°C;
 - 7 - травление металлопроката до полного удаления окалины;
 - 8 - калибрование в пределах упругой деформации через фильер 9,65 мм.
- Суммарное обжатие при этом составляет 38,9 %. После отжига с нагревом ТВЧ на по-

верхности проката слой окислительного налета возникает очень тонкий, и удаляется в растворе серной кислоты в течение всего двух минут.

По указанной ранее технологии от бунта проката отбиралось по три образца:

- для измерения твердости после калибрования с диаметра 12,0 мм на 11,0 мм и с диаметра 11,0 мм на 9,65 мм;
- для измерения твердости, исследования микроструктуры, определения величины обезуглероженного слоя после отжига проката диаметром 9,65 мм с нагревом ТВЧ;
- для измерения твердости, определения механических свойств, измерения величины обезуглероженного слоя и оценки качества поверхности после калибрования через фильер диаметра 9,65 мм.

При проведении исследовательских работ в качестве исходного материала применялась горячекатаная сталь 38ХА Ø 12,0 мм. Химический состав исследуемой марки соответствовал ГОСТ 10702-78 (Содержание элементов в %: С - 0,40; Mn - 0,64; Si - 0,20; Cr - 0,9; S - 0,017; P - 0,026).

Результаты экспериментов и их анализ

Механические свойства, микроструктура, твердость и качество поверхности горячекатаного проката 38ХА показаны в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Механические свойства и твердость горячекатаного проката стали 38ХА

№ п/п	Ø проката, мм	Механические свойства			
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	Ψ , %	Твердость, НВ
1	12,0	427	806	56,6	229
2	12,0	419	793	55,7	229
3	12,0	441	815	54,7	232
4	12,0	425	807	57,4	231
5	12,0	438	810	56,3	232

Таблица 2

Микроструктура, величина обезуглероженного слоя и качество поверхности горячекатаного проката Ø12,0 мм стали 38ХА

№ п/п	Микроструктура	Величина обезуглероженного слоя	Качество поверхности
1	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	Местное, частичное до 0,12 мм	Риска глубиной до 0,1 мм
2	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	Нет	Дефектов нет
3	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	Нет	Дефектов нет
4	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	Местное, частичное до 0,10 мм	Дефектов нет
5	Перлит сорбитообразный и пластинчатый + разорванная сетка феррита	Нет	Риска глубиной до 0,1 мм

Из таблиц видно, что горячекатаный прокат 38ХА диаметром 12,0 мм имеет неравномерные механические свойства, частичное обезуглероживание и риски на поверхности.

Изменения механических свойств и твердости горячекатаного проката Ø 14,0 мм ста-

ли 38ХА после отжига с нагревом ТВЧ показаны в табл. 3, а изменение микроструктуры и величины обезуглероженного слоя - в табл. 4.

Анализ результатов эксперимента показывает, что после отжига способом ТВЧ микроструктура горячекатаного проката становится значительно мелкодисперсней и более равномерной по сравнению с микроструктурой исходного горячекатаного проката.

Такое изменение структурного состояния приводит к снижению прочностных характеристик, твердости и повышению пластичности:

- σ_b снижается на 70-90 МПа;
- $\sigma_{0,2}$ снижается на 40-70 МПа;
- Ψ повышается от 11 до 13%;
- твердость НВ снижается на 30-31 единицы.

Такой металлопрокат пригоден для дальнейшего калибрования.

Таблица 3

Механические свойства и твердость горячекатаного проката стали 38ХА после отжига с нагревом ТВЧ

№№ п/п	Ø проката, мм	Механические свойства			
		$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	Ψ , %	Твердость НВ
1	14,0	370	740	69,0	199
2	14,0	367	723	70,0	198
3	14,0	381	745	68,0	200
4	14,0	370	734	70,0	199
5	14,0	377	743	69,0	201

Таблица 4

Микроструктура, величина обезуглероженного слоя и качество поверхности горячекатаного проката Ø 14,0 мм стали 38ХА после отжига с нагревом ТВЧ

№ п/п	Микроструктура	Величина Обезуглероженного слоя
1	Перлит сорбитообразный мелкодисперсионный и участки мелкопластинчатого перлита + равномерно распределенный феррит	Местное, частичное до 0,1 мм
2	Перлит сорбитообразный мелкодисперсионный и участки мелкопластинчатого перлита + равномерно распределенный феррит	Нет
3	Перлит сорбитообразный мелкодисперсионный и участки мелкопластинчатого перлита + равномерно распределенный феррит	Местное, частичное до 0,1 мм
4	Перлит сорбитообразный мелкодисперсионный и участки мелкопластинчатого перлита + равномерно распределенный феррит	Местное, частичное до 0,1 мм
5	Перлит сорбитообразный мелкодисперсионный и участки мелкопластинчатого перлита + равномерно распределенный феррит	Нет

С увеличением количества отжигов с нагревом ТВЧ при температуре 760-780°C после холодной пластической деформации калиброванием наблюдается значительное изменение микроструктурного состояния. Сорбитообразный перлит становится менее дисперсным, а после отжига способом ТВЧ на промежуточном размере Ø 11,0 мм в микроструктуре появляется мелкозернистый перлит. После четвертого отжига способом ТВЧ на окончательном

размере $\varnothing 9,65$ мм достигается формирование равномерной микроструктуры, состоящей из мелкозернистого и точечного перлита и равномерно распределенного феррита.

Твердость калиброванного проката с такой микроструктурой не превышает НВ 195.

Изменяются механические свойства калиброванного проката. Снижаются прочностные характеристики и возрастает пластичность.

Трехразовое калибрование и отсутствие окалина после отжига способом ТВЧ приводит к тому, что значительно повышается качество поверхности калиброванного проката. Применение данной технологии переработки способствует устранению эллипсности на окончательном размере металлопроката.

Калиброванный прокат стали 38ХА, подготовленный по предложенной технологии, в отличие от действующей технологии, обладает значительно меньшим сопротивлением пластической деформации, более высокой пластичностью и более низкой твердостью. Обезуглероженный слой на данном металлопрокате отсутствует.

Способность калиброванного проката к деформированию составляет:

$$\sigma_{0,2} / \sigma_b = 41/68 = 0,6 .$$

Такой калиброванный прокат считается пригодным для холодной объемной штамповки методом высадки.

Сравнение механических свойств, твердости, обезуглероженного слоя и других показателей калиброванного проката, подготовленного по действующей и предложенной технологиям, приведено в табл. 5.

Таблица 5

Сравнение механических свойств калиброванного проката подготовленного по действующей и предложенной технологиям

Контролируемый параметр	Предложенная технология	Действующая технология	ГОСТ 10702-78
Твердость, НВ	192,6	217	Не более 207
σ_b , МПа	688	77	Более 60
$\sigma_{0,2}$, МПа	418	66	Не регламентирован
Ψ , %	73,5	59	Не менее 55
Отношение $\sigma_{0,2} / \sigma_b$	0,6	0,85	Не регламентировано
Величина обезуглероженного слоя, мм	Местное частичное 0,02	0,05	Не более 0,05

Выводы

Предложена рациональная технология изготовления калиброванного проката 38ХА $\varnothing 9,65$ мм без обточки для холодной объемной штамповки крепежных изделий. Она является ресурсосберегающей и экологически более чистой по отношению к действующей технологии, так как при этом отсутствуют вредные выбросы от печей, где происходит отжиг проката, травильные растворы освежаются реже, так как после отжига проката способом ТВЧ пленка окалина на нем образуется минимальная. Изготовленный по данной технологии прокат обладает хорошей способностью к холодной высадке и превосходит по всем показателям изготовленный по действующей технологии.

Библиографический список

1. **Филиппов, А.А.** Повышение качества поверхности стального проката под калибровку перед высадкой крепежных изделий / А.А. Филиппов [и др.] // Заготовительное производство. 2007. №3. С. 51–53.
2. **Филиппов, А.А.** Анализ поверхностных дефектов заготовок горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 5. С. 35-37.

3. **Филиппов, А.А.** Анализ контроля качества поверхности горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов, В.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Современные наукоемкие технологии. 2010. №12. С. 115–117.
4. **Бобылев, М.В.** Управление качеством боросодержащих сталей для производства крепежных изделий // Металловедение и термическая обработка металлов. 2001. №11 С. 34.
5. **Филиппов, А.А.** Сравнение технологических вариантов подготовки хромистых сталей под холодную высадку / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Успехи современного естествознания. 2007. №8. С. 17–22.
6. **Пачурин, Г.В.** Экономичная технология подготовки стали 40Х к холодной высадке крепежных изделий / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 53–56.
7. **Пачурин, Г.В.** Ресурсосберегающая и экологичная обработка поверхности металлопроката перед холодной высадкой / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Экология и промышленность России. 2008. С. 2–4.
8. **Хейфец, И.Л.** Подготовка стали 35Х к холодной высадке / И.Л. Хейфец, А.Т. Быкадоров // Кузнечно-штамповочное производство. 1975. №9. С. 13–14.
9. **Трусов, В.А.** Разработка производства подката с ТМО для Фасонных профилей высокой точности / В.А. Трусов [и др.] // Тр. второго конгресса прокатчиков. 1998. С. 515–522.
10. **Пудов, Е.А.** Пути улучшения качества проката 20Г2Р для холодной объемной штамповки // Производство проката. №3. 2001. С. 17–19.
11. **Парусов, В.В.** Усовершенствование технологии игольчатой проволоки / В.В. Парусов [и др.] // Сталь. 1980. №12. С. 1090–1092.
12. Пат. на изобретение RU 2380432 C1 C21D 8/06. 2008151317/02. Способ обработки горячекатаного проката под высадку болтов / Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Заявл. 23.12.2008; опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.
13. **Лавриненко, Ю.А.** Критерий выбора материала для высокопрочных крепежных изделий // Метизы. 2008. №3(19). С. 34–36.
14. **Соколов, А.А.** Критерии выбора материала и технологических параметров производства проволоки и изготовления из нее крепежных изделий / А.А. Соколов, В.И. Артюхин // Фазовые и структурные превращения в сталях: сб. тр. 2006. №3. С. 483–496.

*Дата поступления
в редакцию 26.07.2012*

V.G. Pachurin¹, A.A. Filippov, G.V. Pachurin

FORMATION OF STRUCTURAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF ROLLED STEEL FOR HIGH-38XA FASTENERS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
LLC «Metmach»², LLC «Naw standart»³

Purpose: The cost of high-strength of fasteners made of steel 38XA while improving quality and increasing the sustainability of the production process.

Design/methodology/approach: Based on the analysis of quality factors made the formation of a calibrated steel structure and mechanical properties of steel 38XA intended for cold heading hardware products that provide high-strength fasteners receive.

Findings: Suggested a rational technology of preparation of sized rolled steel 38XA without turning to cold forming fasteners, allowing to get rolling with a good capacity for cold heading and superior on all counts made on the current technology in production.

Research limitations/ implications: The specific parameters of the proposed technological scheme of the preparation are rational sized rolled steel for the 38XA.

Originality/value: The proposed technology of calibrated steel 38XA Ø 9,65 mm resource saving and environmentally clean with respect to current technology, since in this case there are no harmful emissions from the furnaces, where the annealing of steel? pickling solutions are refreshed less frequently, as after annealing steel way of HD film of scale formed on it is minimal

Key words: calibrated rolling, the surface quality of rolled steel, cold forging, annealing, pickling solutions, resource conservation, environmental-friendliness.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 574. 543.5

В.М. Востоков, С.В. Плохов, В.Р. Каргашов

ОСОБЕННОСТИ ЭКОАНАЛИТИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ПРОМЫШЛЕННОЙ БИОПРОДУКЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Выявлены специфические особенности экоаналитического контроля и диагностики промышленных биоматериалов, которые следует учитывать при создании комплексной системы управления качеством биопроизводства и в оценке экологического риска биопроизводства. Предложен оригинальный и доступный способ априорной оценки генетического риска кормовых дрожжей микробиологического производства.

Ключевые слова: качество биопроизводства; контроль промышленных биоматериалов; система качества; экологический риск биопроизводства.

В соответствии с международными нормами сертификации ISO 9000, современное биопроизводство следует оснастить комплексной системой менеджмента качества (СМК), обеспечивающей управление биотехнологическим процессом, по результатам экоаналитического контроля и физико-химической диагностики биоматериалов, включая входной контроль качества биосырья, промежуточный контроль технологических биосубстратов и выходной контроль качества выпускаемой биопроизводства.

Как отмечалось ранее в работах по анализу биологически активных веществ (БАВ) [1-4], в комплексной системе экоаналитического контроля биотехнологического производства востребованы лишь те методы и средства контроля и физико-химической диагностики биоматериалов, в которых отражены специфические особенности количественной оценки биологических объектов.

Важнейшей особенностью контроля качества и экологической безопасности производимой биопроизводства является необходимость одновременной оценки массовой доли контролируемого БАВ и величины биологической активности, обычно выражаемой в международных единицах (МЕ), где численное значение биологической (физиологической) активности БАВ является важнейшим показателем качества и экологической безопасности биопроизводства.

Общепринятая оценка величины биоактивности по величине массовой доли контролируемого биоингредиента не всегда достоверна, так как имеющие место факторы внешнего воздействия на равновесную биосистему могут существенно изменить величину биологической активности. Именно этим можно объяснить установленный факт [1-3], что отсутствие корреляции между двумя важнейшими показателями качества биопроизводства – массовой доли БАВ и биологической активности, всякий раз, ведет к систематической погрешности результатов контроля.

Так, за единицу А-витаминной активности принимается биоактивность некой порции БАВ, содержащей 0,3 мг ретинола [1, 2]. Однако численная оценка биоактивности витамина А в пересчете на ретинол не является достоверной, так как по указанной шкале измерений оценивается лишь антиоксидантная активность витамина. Тогда как для определения сум-

марной А-витаминной активности потребуется еще оценить степень непосредственного участия ретинола в иных биохимических процессах, например, в синтезе зрительного пигмента – родопсина или в биосинтезе липидных мембран, где биоактивность витамина А следует оценивать по совершенно иной шкале.

Можно привести множество других примеров несоответствия величины биоактивности массовой доле контролируемого биоингредиента, обусловленного влиянием разнообразных факторов внешнего воздействия на равновесную величину биологической (физиологической) активности.

Так, типичным примером синергентного воздействия одного БАВ на другое может быть биохимический синергизм фолиевой кислоты – витамина **В₉**, проявляющей биоактивность лишь в присутствии водорастворимого антиоксиданта – витамина **С**. Следовательно, общепринятая оценка **В**-витаминной активности фолиевой кислоты по ее массовой доле, без учета синергизма БАВ, недостоверна.

Из изложенного следует, что для достоверной оценки важнейшего показателя качества биопродукции – величины биологической активности – потребуется оригинальная методика выполнения измерений (МВИ), адекватная биопроцессу, в которой отражены особенности анализа БАВ [1-5].

Если для проверки качества химической продукции достаточно оценить массовую долю контролируемого БАВ, то для определения важнейшего показателя качества биопродукции – величины биологической активности – уже потребуется исследовать весь комплекс ингредиентов и факторов влияния на ожидаемый биологический эффект [2, 3].

Следовательно, научно-техническая разработка МВИ, приемлемой для экоаналитического контроля биопроизводства, как и прямой перенос в ЗЛ биопроизводства некой МВИ, успешно апробированной в химической промышленности, будет корректным техническим решением лишь в том случае, если в данной методике физико-химической диагностики биоматериалов отражены указанные специфические особенности количественной оценки биологических объектов.

О необходимости учета специфических особенностей анализа многофакторных и многопараметровых биологических систем было уже неоднократно указано в ранее выполненных и опубликованных работах [1-5]. В данной работе акцентировано внимание на особенности сертификации биопродукции и на проблемы стандартизации методов и средств измерений, используемых в экоаналитическом контроле и в априорной оценке экологического риска биопроизводства, где также необходимо учитывать специфические особенности анализа многофакторных биологических систем.

Как показано в работе [4], лишь применение статистических методов управления качеством биопродукции, по результатам выборочного контроля на всех критических этапах биопроизводства, с учетом его специфики, позволяет решить острую и актуальную проблему внешнего управления биотехнологическим процессом, с учетом самопроизвольного генетического управления биопроцессом, по уникальной программе, заложенной в геном.

В отсутствии эталонов и стандартных образцов биопродукции, лишь применение статистических методов исследований и оценок позволяет управлять биотехнологическим процессом, по результатам выходного контроля качества биопродукции и априорной оценки экологического риска биопроизводства. А это позволяет сертифицировать данное предприятие биотехнологического профиля по международным нормам ISO 9000.

Вопросы сертификации биопроизводств становятся весьма актуальными в связи с коренной перестройкой национальной системы обязательной сертификации и переходом на международные нормы добровольной сертификации, приемлемые в условиях рыночных отношений.

В условиях цивилизованного рынка “качество” становится важнейшей экономической категорией. Поэтому, сегодня востребованы эффективно действующие СМК биопроизводства, отвечающие международным нормам стандартизации, сертификации и менеджмента

качества, созданные на основе оригинальных МВИ, адекватных биопроцессу, при разработке которых учитываются специфические особенности количественной оценки биологических объектов [1-3], как и особенности численной оценки экологического риска того или иного биопроизводства [5]. По нормам ISO 9000, следует еще учитывать требования заказчика по качеству продукции.

Например, в оценке качества кормовых дрожжей, обогащенных витамином **D**, необходимо учитывать то обстоятельство, что в технологиях кормления с/х животных и птицы может быть востребована лишь одна из двух активных форм витамина **D**, либо эргокальциферол (**D**₂) либо холекальциферол (**D**₃). Так как корма для птицы обогащают витамином **D**₃, а корма для крупного рогатого скота должны содержать лишь витамин **D**₂, поскольку сычужные животные не усваивают холекальциферол (**D**₃).

Однако на отечественных предприятиях реализованы лишь стандартные методики хроматографического определения витамина **D** (ГОСТ Р 50929-96), где эргокальциферол (**D**₂) и холекальциферол (**D**₃) идентифицируются одним пиком. Следовательно, в контроле качества кормовых дрожжей, обогащенных витамином **D**, потребуется не только определить массовую долю витамина **D**, но также, выявить активную форму витамина и ожидаемый биологический эффект.

Но это не предусмотрено в нормах пока еще действующей “Системы стандартизации и сертификации ГОСТ Р”, где продукцию сертифицируют на соответствие жестким и незыблемым нормам обязательной сертификации (в данном случае, ГОСТ Р 50929-96), отклонение от которых ранее, до отмены в 2004 г. законодательного действия ГОСТ, считается нарушением закона.

На самом деле, нормы качества биопродукции не могут долго оставаться неизменными. В условиях рынка они непрерывно растут. Они также могут измениться в зависимости от условий реализации биопродукции и от требований заказчика, мнение которого должно быть решающим, если это не ведет к повышению экологического риска биопроизводства.

Практика показала, что сертификация биопродукции по еще действующим, но устаревшим нормам и требованиям “Системы стандартизации и сертификации ГОСТ Р” становится сдерживающим фактором развития методов и средств экоаналитического контроля современных нанобиотехнологий.

В данной ситуации, ближе подходят международные нормы добровольной сертификации, имеющие рекомендательный характер. В то время как нормы ГОСТ ранее обладали законодательным действием, что препятствовало внедрению в производственный контроль последних достижений науки и техники. Это стало возможным, лишь в 2004 г., после отмены законодательного действия ГОСТ Р.

В последние годы идет коренная перестройка ГСС, с целью перехода на нормы добровольной сертификации производств и статистического управления качеством промышленной продукции [5]. Так, в 2007 г., с целью обеспечения качества и безопасности выпускаемой продукции, была создана промежуточная модель системы сертификации смешанного типа, названная “Системой сертификации ГОСТ Р – ИСО 14000”, где реализованы важнейшие элементы круга качества Исикава Каору, способствующие организации на каждом предприятии комплексной системы менеджмента качества и априорной оценки экологического риска биопроизводства, в рамках современной методологии *Prevention Pollution*.

Следует отметить, что отсутствие СМК, отвечающей международным нормам сертификации и экологической безопасности биопроизводства, уже является сдерживающим фактором развития микробиологической промышленности России. Так, в 70–80-е годы прошлого столетия, по соображениям экологической безопасности, крупнейшие заводы белково-витаминных концентратов (БВК) и гидролизно-дрожжевые заводы (ГДЗ), не оснащенные комплексной СМК, были остановлены и законсервированы на неопределенный срок, что отбросило Россию, ранее выпускавшую более 5% мирового объема биопродукции, на 70-е место в мире (0,25%) [6, 7].

Актуальная необходимость реабилитации заводов БВК, ранее остановленных без серьезного технико-экономического обоснования, востребует скорейшего решения указанных проблем менеджмента качества биопродукции и превентивной оценки экологического риска биопроизводства.

В связи с тем, что неуправляемое биопроизводство неминуемо становится источником экологического загрязнения окружающей природной среды (ОПС), потребовалось оснастить все предприятия биотехнологического профиля комплексной СМК, обеспечивающей выпуск доброкачественной и генетически безопасной биопродукции.

Так, на малых предприятиях биотехнологического профиля получила распространение и стала популярной английская система менеджмента качества *GMP*, где вмешательство человека в биопроцесс, управляемого по программе генома, сводится к обеспечению мягких и стерильных условий пониженной обсемененности чужеродными микроорганизмами поступающего сырья, аппаратуры и производственных помещений.

Но система *GMP* оказалась непригодной для управления качеством крупнотоннажных микробиологических производств, в частности, - гидролизно-дрожжевых заводов, обеспечивающих кормовым белком крупнейшие предприятия Агропромышленного комплекса. Оказалось, что на крупнотоннажном биопроизводстве невозможно создать достаточно благоприятные и стерильные условия микробиологического синтеза, например, кормового белка. А в жестких и нестерильных условиях повышенной обсемененности биотехнологический процесс идет в ином направлении, чем это указано в техническом регламенте. Безусловно, это снижает качество биопродукции и увеличивает экологический риск биопроизводства [3, 6].

Но если под влиянием факторов внешнего воздействия нарушен генетический код, то биопроцесс уже не может саморегулироваться по программе, заложенной в геном. Поэтому, потребуются активное вмешательство человека в управление биотехнологическим процессом, где необходимо помнить о том, что генетическое управление биотехнологическим процессом остается главенствующим, а вмешательство человека в биопроцесс должно быть осторожным и разумным, основанным на знаниях биохимии, молекулярной биологии и генной инженерии.

Соответствующая стратегия и тактика управления качеством биопродукции нужна для разработки оригинальной методики физико-химической диагностики биоматериалов и при оценке экологического риска биопроизводства. Так, для достоверной оценки генетического риска промышленного микробиологического синтеза кормового белка (производства кормовых дрожжей) потребуются достоверные сведения о возможных последствиях экологического загрязнения биосферы генетически модифицированной биопродукцией (ГМБ).

Известно, что нарушение механизмов наследственности в жестких и не стерильных условиях крупнотоннажного микробиологического производства провоцирует мутации живых организмов. Тем не менее, генетическое воздействие ГМБ на объекты ОПС, как и последствия возникшего мутагенеза, оценить очень сложно. Острый мутагенез способен уничтожить вид или даже всю популяцию, что уже является экологической катастрофой. Однако незначительные, фоновые мутации не опасны. Более того, они могут быть полезными живому организму, помогая ему приспособиться к изменениям среды обитания, так как фоновые мутации являются составной частью естественного эволюционного процесса.

Из изложенного следует, что для достоверной оценки уровня генетического риска, всякий раз, потребуются установить тот минимум генетической модифицированности, который становится уже опасным для контролируемого биологического объекта. Если установлен предельный уровень генетической модифицированности, то данную величину следует стандартизовать, как некую норму ПДК, с целью применения ее в качестве эталона (шаблона) при проведении сличительных испытаний качества биопродукции, с использованием различных, как оригинальных, так и стандартных МВИ, адекватных биотехнологическому процессу.

В работах [9, 10] впервые указано на то, что мониторинг качества кормового белка

различными способами определения массовой доли протеинов в кормовых дрожжах позволяет, не только установить качество выпускаемой биопродукции непосредственно в ЗЛ предприятия биотехнологического профиля, но и априорно оценить экологический риск биопроизводства, в рамках современной методологии *Prevention Pollution* [3, 6].

В качестве примера численной критериальной оценки экологического риска микробиологического производства, включая оценку генетического риска, рассмотрим предложенную нами схему мониторинга качества кормовых дрожжей, производимых на трех ведущих предприятиях отрасли: Астраханский ГДЗ, Волжский ГДЗ и Кировский БХЗ. Все три предприятия построены по типовому технологическому проекту, где применяется единый штамм, а сырьем для питательной среды является растительная клетчатка из плавневого тростника; древесной щепы, опилок и иных отходов и компонентов древесины.

Таблица 1

Статистическая обработка (по Стьюденту) результатов анализа образцов кормовых дрожжей Астраханского ГДЗ, на содержание белка, неселективными методами Кьельдаля, Барнштейна и селективным фотометрическим методом, по Лоури

№ п/п	Массовая доля протеина, x_i	Средний результат, x_m	Стандартное отклонение, S_x	Абсолютная погрешность, ε	Относит. станд. отклонение, S_r
Массовая доля протеина, %					
	По Кьельдалю				
1	55,39	54,185	0,2814	0,636	0,012
2	55,10				
3	54,44				
4	54,12				
5	53,77				
6	53,67				
7	53,41				
8	55,27				
9	54,09				
10	52,58				
	По Барнштейну				
1	53,09	52,539	0,4096	0,926	0,018
2	54,40				
3	50,63				
4	52,08				
5	53,78				
6	53,34				
7	53,44				
8	52,08				
9	50,54				
10	52,01				
	По Лоури:				
1	48,90	48,939	0,2519	0,569	0,011
2	48,56				
3	48,21				
4	48,77				
5	48,50				
6	47,95				
7	48,48				
8	50,23				
9	50,15				
10	49,64				

В качестве критерия качества кормовых дрожжей – целевой продукции указанных заводов – было принято численное значение массовой доли кормового белка, определяемое стандартными методами Кьельдаля и Барнштейна (ГОСТ Р 51417-99), а также селективным способом фотометрического определения белка по специфической на протеины, фотометрической реакции Лоури [9, 10].

В качестве критерия численной оценки генетического риска кормового белка была принята массовая доля нуклеотидов – метаболитов нуклеиновых кислот $m_{\text{нукл}}$ [11], которую вычисляют по разности значения массовой доли белка, найденного методом Барнштейна $m_{\text{барн}}$, и массовой доли протеинов, найденной фотометрическим методом, по реакции Лоури – $m_{\text{фот}}$:

$$m_{\text{нукл}} = m_{\text{барн}} - m_{\text{фот}} \quad (1)$$

В табл. 1 представлены результаты контрольных испытаний кормовых дрожжей – целевой продукции Астраханского ГДЗ, проведенных в ИЛ НГТУ, по заказу ВНИИ Гидролиз, с целью сравнительной оценки результатов определения массовой доли кормового белка тремя указанными ранее методами: методом Кьельдаля, методом Барнштейна и оригинальным фотометрическим методом, где белок определяется по специфической на протеины реакции Лоури [10].

Аналогичные сличительные испытания, с целью объективной оценки качества кормового белка, выпускаемого на разных гидролизно-дрожжевых заводах, а также, с целью сопоставления результатов определения белка указанными методами анализа, были проведены с белковой продукцией Волжского ГДЗ и Кировского БХЗ.

Они приведены здесь не полностью, а сведены в табл. 2, в виде конечных результатов статистических исследований и оценок, подтверждающих ранее полученные выводы [3, 6, 9] о целесообразности оценки качества кормовых дрожжей не по массовой доле “сырого протеина” (по Кьельдалю) и не по массовой доле “истинного белка” (по Барнштейну), а по массовой доле хорошо усвояемых протеинов, установленной селективным на белок, фотометрическим методом.

В то время как численная оценка качества кормового белка, по результатам определений стандартными методами Кьельдаля и Барнштейна (ГОСТ Р 51417-99), указывает на систематическое завышение результатов выборочного контроля (табл. 2), что позволяет фальсифицировать белок путем добавления мочевины или иных соединений, содержащих азот.

Обсуждая статистические данные, представленные в табл. 2, можно сделать вывод, что в Астраханских дрожжах меньше небелковых соединений, включая азотсодержащие вещества, чем в продукции двух других заводов. Но еще важнее то, что в дрожжах Астраханского ГДЗ содержится меньшее количество нуклеотидов, что косвенно свидетельствует о не высоком уровне генетической модифицированности выпускаемого кормового белка.

Таблица 2

Мониторинг качества биопродукции микробиологических производств

Оценка массовой доли белка в кормовых дрожжах методами Кьельдаля, Барнштейна и фотометрическим методом по реакции Лоури			
Гидролизно-дрожжевые заводы	Интервальное значение ($n=10$) массовой доли белка, определенное:		
	по Кьельдалю, %	по Барнштейну, %	фотометрическим методом
Астраханский ГДЗ	$54,18 \pm 0,64$	$52,54 \pm 0,92$	$48,94 \pm 0,57$
Волжский ГДЗ	$56,93 \pm 0,97$	$33,36 \pm 1,84$	$30,02 \pm 1,01$
Кировский БХЗ	$46,82 \pm 0,92$	$40,40 \pm 1,34$	$35,94 \pm 0,90$

Таблица 3

Определение массовой доли нуклеотидов в кормовых дрожжах и в истинном белке

Контролируемые заводы	Массовая доля “истинного” белка и протеинов, %		Массовая доля нуклеотидов в дрожжах, %	Массовая доля нуклеотидов в белке, %	Примечания
Астраханский ГДЗ	52,54	48,94	3,60	6, 8	Генетический риск отсутствует
Волжский ГДЗ	33,36	30,02	3,34	10,2	Повышенная экологическая нагрузка
Кировский БХЗ	40,40	35,94	4,46	11,0	

Если сопоставлять результаты оценки генетического риска указанных заводов по критерию $m_{\text{нукл}}$, то генетический риск Астраханского ГДЗ не превышает допустимых пределов (табл. 3), что подтверждается многолетним опытом реализации указанной белковой продукции в России и странах ближнего зарубежья. Но если взять в качестве верхнего предела генетической модифицированности кормовых дрожжей значение массовой доли нуклеотидов в истинном белке, равное 6,8% (табл. 3), то в кормовом белке Волжского и Кировского заводов обнаруживается повышенное содержание нуклеотидов, что косвенно указывает на повышенный генетический риск данных микробиологических производств.

Несмотря на то, что предложенный нами способ численной оценки генетического риска микробиологических производств запатентован [11], авторы не гарантируют полную достоверность результатов косвенной оценки генетического риска по массовой доле нуклеотидов в белке, так как пока не установлена четкая связь между содержанием нуклеотидов в белке и возможными нарушениями нуклеотидного обмена на субклеточном уровне. Это еще не доказано и останется гипотезой до тех пор, пока на основе теоретических и экспериментальных работ, в сфере молекулярной биологии и геномной инженерии, не будут получены убедительные доказательства данной гипотезы о косвенной связи генетического риска с массовой долей нуклеотидов в кормовом белке.

Тем не менее, острые проблемы превентивной оценки генетического риска нанобиотехнологий, непосредственно на производстве, требуют своего незамедлительного решения. В первую очередь, это касается нанотехнологий с применением генетически модифицированных микроорганизмов [7, 8] (ГМО).

Их применение очень выгодно, так как это позволяет многократно ускорить процесс микробиологического синтеза, например, биотоплива – биодизеля, биогаза и пр. Поэтому, несмотря на сдерживающий фактор генетического риска, нанобиотехнологии, на основе ГМО, бурно развиваются в целом ряде стран мира. Так, доля биотоплива уже превышает 10% от всех энергетических ресурсов США, где давно ведутся работы по изучению воздействия ГМО на объекты ОПС. Ведутся бесконечные споры о целесообразности использования ГМО, которые вероятно закончатся, когда человек научится объективно оценивать степень воздействия генетически модифицированной биопродукции на объекты биосферы и будут созданы достоверные способы физико-химической диагностики биоматериалов, в которых отражены специфические особенности количественной оценки биологических объектов.

Библиографический список

1. **Востоков, В.М.** Хроматографический контроль биохимической активности жирорастворимых витаминов (A,D,E) в пищевой и кормовой продукции / В.М. Востоков, В.Р. Карташов // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технологии 2006. Т. 49. №4. С. 115–118.
2. **Востоков, В.М.** Научные принципы выбора физико-химических методов анализа и их реализация при разработке систем контроля биотехнологических производств. /В.М. Востоков, С.А. Плохов // Н. Новгород, Деп. в ВИНТИ 29.12.2006. № 1640-В 2006. – 6 с.
3. **Востоков, В.М.** Особенности инструментального экоаналитического контроля биотехнологи-

- ческих производств / В.М. Востоков, А.Н. Давыдов, Е.Г. Ивашкин // Экоаналитика-2009: материалы VII Всероссийской конференции по анализу объектов окружающей среды / Йошкар-Ола, 2009. С. 79-80.
4. **Востоков, В.М.** Особенности метрологической оценки результатов аналитического контроля биотехнологий / В.М. Востоков, А.П. Арбатский // Изв. вузов. Поволжск. рег. 2005. № 6. С. 231-240.
 5. **Востоков, В.М.** Статистическое управление биопроизводством / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин // Стандарты и качество. 2006. № 5. С. 42-44.
 6. **Востоков, В.М.** Оценка экологического риска биопроизводства / В.М. Востоков, В.М. Смирнова, Г.Л. Дегтяренко // Тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. № 1(86). С. 243-251.
 7. **Василов, Р.Г.** Биоэкономика как следующий шаг развития – шанс для России // Вестник биотехнологии и физико-химич. биологии им. Ю.А. Овчинникова. 2010. № 4. С. 28–32.
 8. **Тарасов, М.Ю.** Генетически модифицированные организмы: “за” и “против”. Существует ли угроза безопасности России? / М.Ю. Тарасов [и др.] // Химическая и биологическая безопасность. 2004. №3-4. С. 3-7.
 9. Востоков, В.М. Аналитический контроль содержания протеинов в продукции предприятий микробиологического синтеза кормового белка / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин, В.Р. Карташов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. №3. С.21-24.
 10. Бейер, Е.М. Некоторые данные о применимости метода Лоури в зависимости от условий определения белка. / Е.М. Бейер // Лабораторное дело. 1976. № 10. С. 590 –595.
 11. Пат. №2413941 от 10.04.11. Способ определения генно-модифицированных нуклеотидов в кормовых дрожжах / Востоков В.М., Смирнова В.М., Дегтяренко Г.Л.; заявка от 21.08.2009.

*Дата поступления
в редакцию 03.07.2012*

V.M. Vostokov, S. Plochov, V.R. Cartashov

INDUSTRIAL CONTROL FEATURES ECOANALYTICAL BIO

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

Specific features of ekoanalytical control and diagnostics of industrial biomaterials which should be considered at creation of a complex control system by quality of bioproduction and in an assessment of ecological risk of bioproduction are revealed. The original and available way of an aprioristic assessment of genetic risk of fodder yeast of microbiological production is offered.

Key words: quality of bioproduction; control of industrial biomaterials; system of quality; ecological risk of bioindustrie.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338

Д.А. Корнилов¹, О.Г. Беляев²

ОЦЕНКА ИННОВАЦИОННОГО ПОТЕНЦИАЛА РЕГИОНА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «АК БАРС» Банк²

Цель: Совершенствование методологических аспектов оценки инновационного потенциала региона.

Методология: Достижение поставленной в работе цели осуществляется за счет применения метода интегрирования отдельных показателей.

Результаты и область их применения: Результатом исследования является разработка методики оценки инновационного потенциала региона.

Выводы: На основании разработанной методики проведена оценка инновационных потенциалов регионов Приволжского федерального округа. Дана оценка эффективности реализации имеющегося инновационного потенциала региона.

Ключевые слова: инновации; инновационный потенциал; анализ; оценка; индикаторы; значимость показателей.

Особенностью инновационного развития Российской Федерации в сравнении с большинством развитых стран является высокая степень неравномерности регионального развития. В большей степени неравенство определяется спецификой каждого региона, характеризующейся исторически сложившейся специализацией, особым географическим положением, а также инновационным потенциалом. В условиях современной экономики именно величина инновационного потенциала и эффективность его использования предопределяют потенциальные возможности и горизонты роста региональной экономической системы. Все это подчеркивает актуальность поиска методов оценки величины инновационного потенциала региона.

За последние два десятилетия в отечественной и зарубежной науке появилось значительное количество методик исследования инновационного потенциала региона (страны в целом).

В настоящее время одним из факторов развития региона является формирование и эффективное использование инновационного потенциала. Оценка инновационного потенциала имеет значение для обоснования инновационной политики на различных уровнях (государство, регион, отрасль, предприятие) и разработки программ социально-экономического развития с учетом эффективного использования инновационных ресурсов.

Работа по определению инновационного потенциала экономического субъекта может проводиться на различных уровнях: государство, регион, отрасль, кластер, корпорация или отдельное предприятие. Изучением вопроса инновационного потенциала на различных уровнях экономических субъектов занимаются как зарубежные, так и отечественные авторы.

За последние годы в международной практике исследований инноваций сложилось множество подходов к оценке инновационного потенциала. Проблемой измерения инновационного потенциала заняты исследователи различных международных школ и научных организаций: Европейская комиссия по инновациям, Организация экономического сотрудничества и развития (ОЭСР), научные подразделения Всемирного экономического форума и Все-

мирного банка, Организация промышленного развития при ООН (ЮНИКТАД) и др. Разрабатываемые этими организациями методы и подходы к оценке используются в различных целях для каждой из сторон, участвующей во внедрении инноваций (крупные инвесторы, общественные институты, государственные учреждения, научные школы и т.д.).

В отечественной экономической литературе сложилось несколько подходов к раскрытию содержания категории «*инновационный потенциал*». Одни авторы трактуют его как совокупность инновационных ресурсов (финансовых, материальных, интеллектуальных, научно-технических), которые обеспечивают возможность инновационной деятельности и создание инновационной технологии, продукции, услуг, что следует рассматривать как ресурсный подход к определению инновационного потенциала. Другие рассматривают инновационный потенциал с позиций результата инновационной деятельности, т.е. реального продукта, полученного в инновационном процессе. В этом случае инновационный потенциал представлен как возможная, произведенная в будущем, инновационная продукция. В ряде экономических статей встречается точка зрения, согласно которой инновационный потенциал необходимо отождествлять с научно-техническим или интеллектуально-творческими потенциалами. Данный подход во многом необоснован, так как, согласно ему инновационную деятельность необходимо рассматривать только в рамках указанных потенциалов.

В целом существующие трактовки категории инновационного потенциала можно разделить на шесть разных подходов.

Первый подход отождествляет инновационный потенциал с понятиями научного, научно-технического, интеллектуального и творческого потенциалов.

Второй подход – ресурсный – рассматривает инновационный потенциал как упорядоченную совокупность ресурсов, обеспечивающих осуществление инновационной деятельности субъекта рынка. Использование ресурсного подхода имеет свои положительные стороны, так как, с одной стороны, он позволяет дать оценку текущей ситуации развития инновационных процессов (выделить сильные и слабые стороны), а с другой стороны, при взаимоувязке основных ресурсных составляющих инновационного потенциала с их пограничными характеристиками и целевыми ориентирами могут быть выявлены возможности реализации инновационных процессов в перспективе. Большинство отечественных авторов придерживаются именно ресурсного подхода в раскрытии содержания категории «инновационный потенциал».

Третий подход основан на разделении ресурсов инновационного потенциала на реализованные и нереализованные (скрытые) ресурсные возможности, которые могут быть приведены в действие для достижения конечных целей экономических субъектов. Данный подход уточняет ресурсный подход и пытается разделить имеющиеся ресурсные возможности инновационного развития экономической системы.

В рамках *четвертого подхода* инновационный потенциал рассматривается как мера способности и готовности экономического субъекта осуществлять инновационную деятельность. Под способностью понимается наличие и сбалансированность структуры компонентов потенциала, а под готовностью – достаточность уровня развития этих ресурсов.

Пятый подход следовало назвать результативным. Именно в нем инновационный потенциал раскрывается через анализ «выхода» инновационной деятельности и является отражением конечного результата реализации имеющихся возможностей (в виде нового продукта, полученного в ходе осуществления инновационного процесса). В то же время в нем не учитывается наличие и сбалансированность структуры компонентов инновационного потенциала и достаточность уровня развития потенциала для формирования инновационной активности экономики.

Шестой подход, являющийся комбинацией ресурсного и результативного подходов, представляет собой совокупность инновационных ресурсов, предоставляемых в виде продукта инновационной деятельности, производственной сферы.

В результате анализа существующих подходов к определению категории «инновационный потенциал» представляется, что определение сущности инновационного потенциала

экономического субъекта должно охватывать следующие основные характеристики:

1) инновационный потенциал выступает подсистемой социально-экономического потенциала региона, при этом все части общего потенциала тесно связаны между собой. Эффективная реализация общего потенциала зависит от состояния как каждой из его частей, так и их взаимодействия. В данном случае развитие всех подсистем должно быть сбалансированным, поскольку отставание одной из них выступает сдерживающим фактором как для системы в целом, так и для отдельных ее составляющих;

2) инновационный потенциал – это наличие и сбалансированность ресурсов, уровень развития которых достаточен для осуществления эффективной инновационной деятельности;

3) инновационный потенциал включает организационный и институциональный механизмы, обеспечивающие инновационную деятельность;

4) инновационный потенциал содержит неиспользованные, предполагаемые (скрытые) возможности ресурсов, которые могут быть приведены в действие для реализации инновационной стратегии;

5) инновационный потенциал – это определенная характеристика способности экономической системы к изменению, улучшению, прогрессу на основе трансформации имеющихся ресурсов в новое качественное состояние.

Указав данные факты, следует предложить следующее определение инновационного потенциала экономического субъекта (регион, отрасль, предприятие): совокупность ресурсных возможностей к созданию, организационных способностей к развитию и экономической готовности к воплощению инновационной деятельности экономическим субъектом разного уровня.

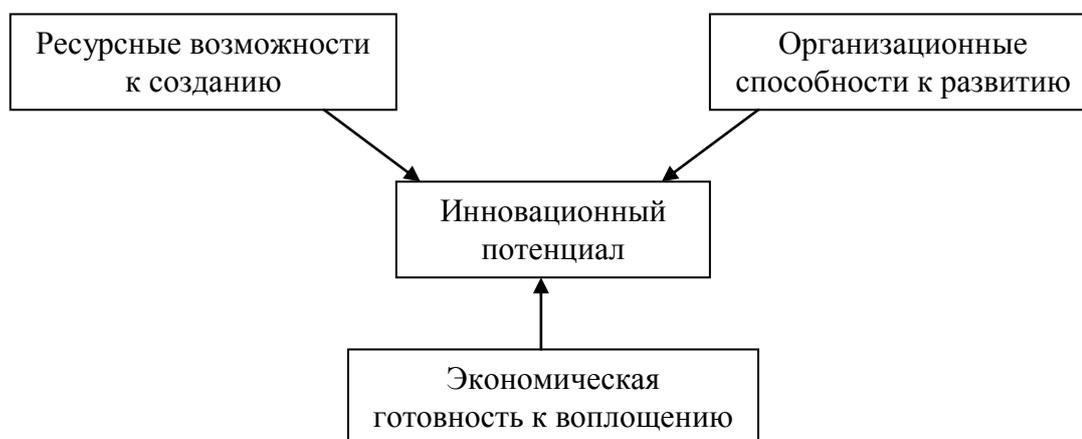


Рис. 1. Структурная взаимосвязь компонентов инновационного потенциала

Ресурсные возможности инновационного развития выступают основой для формирования инновационного потенциала экономической системы. Они включают в себя следующие основные компоненты, имеющие различное функциональное назначение: материально-технические, научно-технологические, финансовые, кадровые ресурсы.

Организационная способность к развитию инноваций в структуре инновационного потенциала отражается степенью развития информационной и консалтинговой инфраструктур. Важность этих структур для обеспечения инновационной деятельности заключается в том, что инновационная деятельность имеет много специфических особенностей, знание которых приобретает только с практическим опытом.

Экономическая готовность к воплощению инноваций показывает способность системы к восприятию и использованию созданных новшеств – коммерциализации инноваций. В триединой структуре инновационного потенциала экономическая готовность выступает качественной основой инновационного потенциала экономической системы (регион, отрасль, предприятие), в то время как ресурсная возможность и организационная способность отоб-

ражают количественные стороны. Качественную сторону инновационного потенциала следует описывать наличием нормативов, стратегий, законов инновационного развития экономической системы.

Предложенное определение раскрывает содержание инновационного потенциала в целом для различных уровней экономических систем. Совокупность инновационных потенциалов отдельных предприятий и их окружающая инфраструктура составляют инновационный потенциал отрасли, совокупность которых, обрамленная региональной инфраструктурой, определяет инновационный потенциал региона. Учитывая возможное влияние эффекта синергии, следует предположить, что инновационный потенциал отдельных предприятий может составлять инновационный потенциал различных отраслей. Также инновационные потенциалы отдельных отраслей взаимосвязаны друг с другом в составлении инновационного потенциала региона.

Инновационный потенциал отдельных предприятий может составлять потенциал нескольких отраслей одновременно. Произведенная предприятием инновационная продукция может нести в себе существенный рост возможностей инновационного развития для других предприятий и отраслей. Также имеющиеся ресурсные и организационные возможности отдельных предприятий и отраслей могут быть использованы для осуществления различных типов инноваций.

Важным вопросом определения инновационного потенциала экономической системы является выявление взаимосвязи между результатом осуществляемой инновационной деятельности и используемым инновационным потенциалом.

Большинство авторов, изучающих количественную оценку инновационного потенциала экономической системы, исходя из определения инновационного потенциала как способности, возможности и готовности экономической системы, при подсчете инновационного потенциала указывает на результат инновационной деятельности как составной его части:

$$\text{Инновационный потенциал} = \text{Ресурсы} + \text{Инфраструктура} + \text{Результат} . \quad (1)$$

В то же время применяемые исследователями определения инновационного потенциала несут в себе лишь понятия возможностей, способностей экономической системы для получения определенного результата. Данное положение противоречит применяемым им определениям инновационного потенциала. Здесь следует остановиться более подробно на определении инновационного результата и инновационной активности экономической системы. Под инновационным результатом (результатом инновационной деятельности) предполагается определять отгруженную (оказанную) инновационную продукцию (услугу). Согласно методологии изучения инновационной деятельности Федеральной службы государственной статистики, под «инновационной активностью» подразумевается отношение общего числа субъектов, осуществляющих инновации хотя бы одного типа: технологические, маркетинговые, организационные и иные – к общему числу субъектов экономической деятельности. Показатели инновационной активности отражают реальные желания и стремления субъектов инновационной деятельности к её развитию и воплощению.

Конечным этапом инновационной деятельности является получение инновационного продукта (услуги) – результата. Для получения этого результата нужен процесс – «*инновационный процесс*».

Инновационная активность влияет на инновационный процесс, степень влияния инновационной активности отражается показателем эффективности осуществления инновационной деятельности. В соответствии с одинаковыми требованиями к управленческим качествам руководства субъектов инновационной деятельности во всех экономических системах (регионах, отраслях, предприятиях), следует предположить, что результатом инновационной деятельности является фактический уровень применения текущего инновационного потенциала. Данное утверждение можно представить следующим образом:

$$IP_{\text{э}} = f(IA; ИП; \alpha), \quad (2)$$

где α - коэффициент эффективности осуществляемой инновационной деятельности.

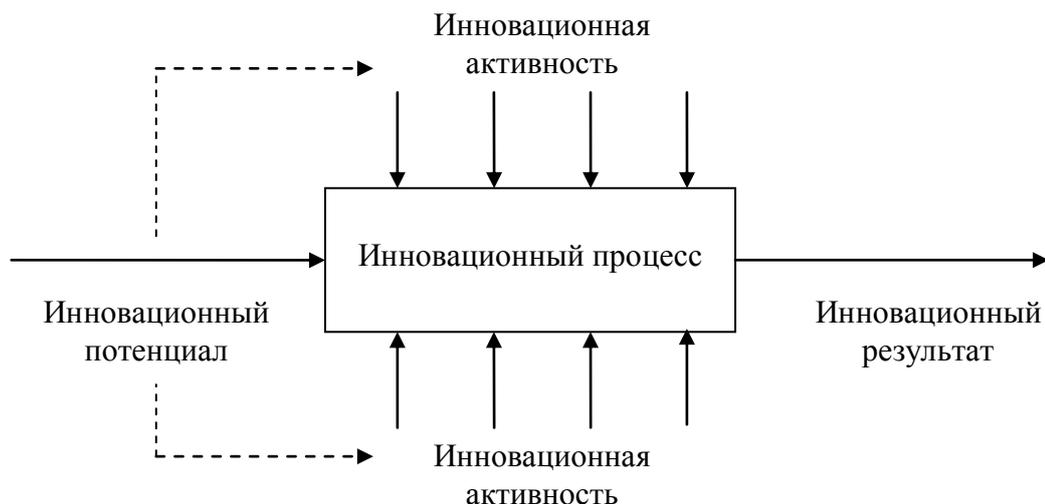


Рис. 2. Структурная взаимосвязь инновационного результата, потенциала и инновационной активности

Инновационный результат есть функция от трех переменных инновационной активности, инновационного потенциала и показателя эффективности использования.

В структуре имеющегося инновационного потенциала и осуществляемой инновационной активности экономических систем можно выделить четыре типа экономических систем:

- экономические системы – инновационные лидеры;
- экономические системы – последователи инноваций;
- экономические системы – умеренные новаторы;
- экономические системы – скромные новаторы.

Инновационный потенциал способствует росту инновационного результата, но не является обязательным условием его высокого получения. Инновационный потенциал экономической системы не является обязательным условием высокой инновационной активности. В свою очередь и значительная инновационная активность не является обязательным условием получения высокого инновационного результата. В связи с этим следует предложить следующую систему равенств и неравенств:

- 1) при $IA_i = IA_j$ и $ИП_i = ИП_j$ может быть $IP_i = IP_j$,
- 2) при $IA_i = IA_j$ и $ИП_i = ИП_j$ может быть $IP_i \neq IP_j$,
- 3) при $IA_i = IA_j$ и $ИП_i \neq ИП_j$ может быть $IP_i = IP_j$,
- 4) при $IA_i = IA_j$ и $ИП_i \neq ИП_j$ может быть $IP_i \neq IP_j$,
- 5) при $IA_i \neq IA_j$ и $ИП_i = ИП_j$ может быть $IP_i = IP_j$,
- 6) при $IA_i \neq IA_j$ и $ИП_i = ИП_j$ может быть $IP_i \neq IP_j$,
- 7) при $IA_i \neq IA_j$ и $ИП_i \neq ИП_j$ может быть $IP_i = IP_j$,
- 8) при $IA_i \neq IA_j$ и $ИП_i \neq ИП_j$ может быть $IP_i \neq IP_j$.

Указанная функция (2) может быть как линейной, так и нелинейной. Выбор конкретной из типов функций зависит от текущих социально-экономических условий:

$IP = \alpha * IA + \beta * ИП$ - линейная функция,

$IP = \alpha * IA * ИП$ - нелинейная функция.

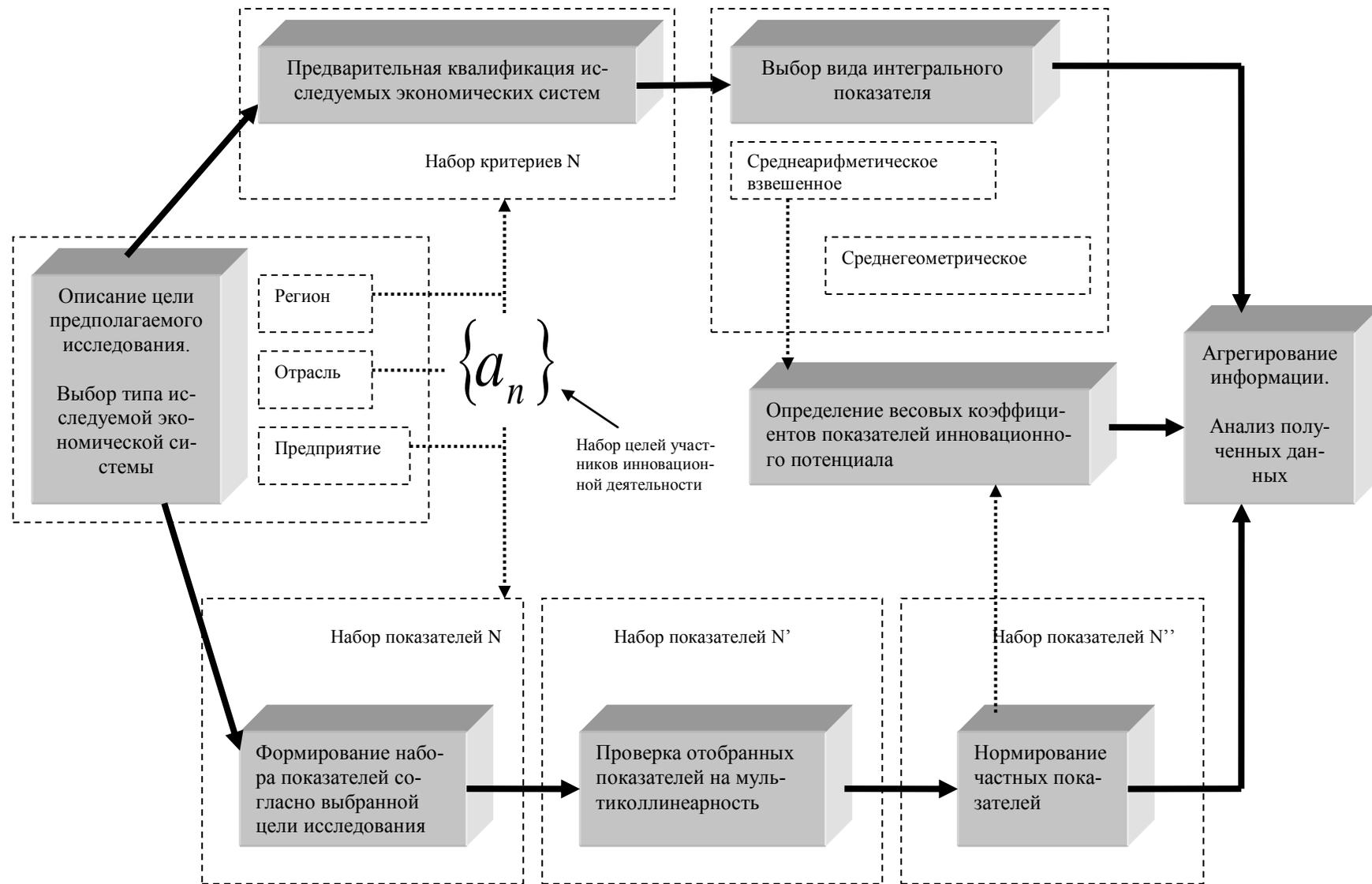


Рис. 3. Основные этапы методики оценки инновационного потенциала

В случае линейной функция α - показатель эффективности осуществляемой инновационной активности, а β - эффективность использования инновационного потенциала. В случае применения нелинейной функции α - коэффициент эффективности осуществляемой инновационной деятельности; $IP_{эс}$ - результат инновационной деятельности экономической системой, например, доля инновационной продукции (услуг) в общем объеме отгруженной продукции (услуг). Инновационный результат представляется как текущий процент использования имеющегося инновационного потенциала.

Проведенный анализ различных подходов к оценке уровней инновационного развития стран, регионов, отраслей и предприятий позволяет предположить необходимость использования интегральных, комплексных показателей для оценки инновационного потенциала разного уровня экономических систем. Для комплексной обобщающей характеристики инновационного потенциала предлагается использовать интегральный показатель, характеризующий величину инновационного потенциала региона. Интегральная оценка инновационного потенциала проводится в несколько этапов (рис. 3):

- 1) описание цели предполагаемой оценки, выбор исследуемого уровня экономической системы,
- 2) предварительная квалификация отобранных экономических систем;
- 3) выбор частных индикаторов (системы показателей/индексов/субиндексов), составляющих интегральный показатель;
- 4) проверка выбранных показателей на мультиколлинеарность в разрезе каждого из изучаемых объектов (регион, отрасль, предприятие);
- 5) нормирование частных показателей для их сравнения друг с другом;
- 6) выбор вида интегрального показателя;
- 7) определение весовых коэффициентов показателей, входящих в состав интегрального показателя;
- 8) агрегирование информации;
- 9) анализ полученных данных (ранжирование исследуемых экономических субъектов).

Данный подход последовательного выполнения действия проведения интегральной оценки от формирования системы показателей до непосредственного анализа данных (ранжирования экономических субъектов) наиболее полно отражает возможности потенциала.

Согласно предложенной методике оценки инновационного потенциала был осуществлен анализ инновационного потенциала регионов ПФО (табл. 1).

Таблица 1

Инновационный потенциал регионов ПФО

	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Республика Башкортостан	1,83	1,93	1,68	1,73	1,89	1,78
Республика Марий Эл	1,27	1,61	1,88	1,55	2,58	3,84
Республика Мордовия	2,95	5,68	2,81	1,63	4,46	1,99
Республика Татарстан	1,74	1,71	1,53	1,52	1,71	1,91
Удмуртская Республика	3,14	3,27	3,24	2,43	2,97	4,97
Чувашская республика	2,10	2,10	1,98	1,56	1,74	1,59
Пермский край	1,95	1,92	1,66	1,73	1,99	2,19
Кировская область	1,61	1,60	1,46	1,41	1,49	1,41
Нижегородская область	10,98	8,18	8,74	17,83	22,48	11,21
Оренбургская область	3,72	3,06	3,29	2,75	2,54	2,58
Пензенская область	2,00	1,97	1,89	1,88	1,97	2,23
Самарская область	2,36	2,35	4,61	2,10	2,39	2,36
Саратовская область	1,88	1,97	2,17	1,90	2,05	2,21
Ульяновская область	2,48	3,07	2,04	2,11	2,31	2,18

Полученные данные свидетельствуют о высоком инновационном потенциале в Нижегородской области, в то же время анализ инновационного потенциала относительно инновационной активности и результатах инновационной деятельности говорит о неполноте использования фактически наличного инновационного потенциала.

Библиографический список

1. Федеральный Закон РФ от 20.07.2011 №249 «О внесении изменений в Федеральный закон "О науке и государственной научно-технической политике" и статью 251 части второй Налогового кодекса Российской Федерации в части уточнения правового статуса фондов поддержки научной, научно-технической и инновационной деятельности»
2. **Амосенко, Э.П.** Интегральная оценка инновационного потенциала регионов России / Э.П. Амосенко, В.А. Бажанов // Регион: Экономика и Социология. 2006. №2.
3. **Данилова, Т.Н.** Подходы к оценке инновационного потенциала региона / Т.Н. Данилова, В.А. Грищенко // Региональная экономика: теория и практика. 2007. №5.
4. **Егорова, М.В.** Метод Инновационного позиционирования региона // Региональная экономика: теория и практика. 2007. №5.
5. **Задумкин, К.А.** Научно-технический потенциал региона: оценка состояния и перспективы развития: монография / К.А. Задумкин, И.А. Кондаков. – Вологда: ИСЭТ РАН, 2010. – 205 с.
6. **Заусаев, В.К.** Инновационный потенциал восточных регионов России / В.К. Заусаев, С.П. Быстрицкий, Н.Ю. Криворучко // ЭКО. 2005. №10. С. 40–52.
7. **Капреева, Е.Г.** Инновационный потенциал как основа развития региональных инновационных систем // инновационная деятельность. 2009. №31. С. 24–30.
8. **Мухамедьяров, А.М.** Методолого-методические основы оценки уровня инновационного потенциал / А.М. Мухамедьяров, Э.А. Диваева // Экономика и управление: научно-практический журнал. 2009. №1.
9. **Москвина, О.С.** Инновационный потенциал как фактор устойчивого развития региона // (режим доступа) <http://journal.vscs.ac.ru>
10. Руководство. Осло: Рекомендации по сбору и анализу данных по инновациям. 3-е изд. ОЭСР/ЕС, 2005. Перевод на русский язык. Государственное учреждение «Центр исследований и статистики науки» (ЦИСН), 2006.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

D.A. Kornilov¹, O.G. Belyaev²

ESTIMATION OF INNOVATIVE POTENTIAL OF THE REGION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
AK BARS Bank²

Purpose: Improvement of methodological aspects of an estimation of innovative potential of the region.

Methodology: Achievement of the aims laid down in work is carried out at the expense of application of a method of integration of separate indicators.

The results and their application area: Result of research is development of a technique of an assessment of innovative capacity of the region.

Conclusions: On the basis of the developed technique the assessment of innovative capacities of regions of the Volga Federal District is carried out. The assessment of efficiency of realization of available innovative capacity of the region is given.

Key words: Innovations; innovative potential; the analysis; an estimation; indicators; the importance of indicators.

УДК 347.736

А.С. Узбекова

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО РОССИЙСКОГО КОРПОРАТИВНОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА. ПРОБЛЕМЫ И ИХ РЕШЕНИЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Диагностика основных проблем современного российского корпоративного законодательства.

Методология: В ходе работы автором проведены: идентификация, анализ текущего состояния и оценка перспектив решения основных проблем современного российского законодательства о банкротстве и некоторых смежных нормативных правовых актов. Детально исследованы основные проблемные моменты по трем аспектам: банкротство физических лиц, трансграничная несостоятельность, противодействие рейдерству в России.

Результаты и области их применения: Институт банкротства физического лица сегодня в России отсутствует. Законопроект, решающий этот вопрос, подготовлен в 2010 году, но до сих пор не принят. Российскому корпоративному законодательству требуется четкое регламентирование отношений, осложненных иностранным элементом. Принятие законопроекта о трансграничном банкротстве значительно повысило бы привлекательность российских компаний для иностранных инвесторов. Актуальность проблемы противодействия рейдерству в России не вызывает сомнений. Принятие «антирейдерских» поправок является важным, но все-таки недостаточным шагом в решении данной проблемы.

Выводы: Решение обозначенных в статье проблем позволит вывести российское корпоративное законодательство на качественно новый уровень.

Ключевые слова: корпоративное законодательство, признаки банкротства, банкротство физических лиц, должник-гражданин, реструктуризация долга, трансграничная несостоятельность, параллельные производства, рейдерство, захват предприятий.

Современное российское законодательство о банкротстве, по мнению большинства специалистов, не соответствует объективным потребностям экономики и общества, а также мировым стандартам. Существует ряд вопросов, законодательное регулирование которых недостаточно четкое и устаревшее, либо вообще отсутствует как таковое. Так, с момента появления первой редакции закона в 1993 году, ведутся споры о том, какой принцип «неоплатности» или «неплатежеспособности» должен быть положен в основу принятия решения о банкротстве, либо стоит применять их в совокупности. Каковы должны быть признаки банкротства? Если те, которые закреплены в 127-ФЗ, то каким образом сделать их «жизнеспособными». Не единожды, общественность настаивала на введении прогрессивной шкалы сумм неисполненных обязательств, что, на первый взгляд, видится вполне логичным. Но при подробном рассмотрении выясняется, что определить критерий данной шкалы крайне затруднительно. Так, например, при делении всех юридических лиц на крупные, средние и малые, не учитывается неоднородность каждой из групп, т.е. среди крупных предприятий, к которым по статистическим нормам относятся предприятия с численностью работников более 100 человек, окажутся предприятия, как с минимальной численностью, так и с «десятилетиями». Возникает вопрос – справедливо ли в отношении обоих предприятий применять одинаковую сумму неисполненных обязательств. Также, в литературе часто обсуждается, и стоит отметить, вполне справедливо, вопрос несоответствия суммы неисполненных обязательств и предельных сроков их исполнения для стратегических предприятий и субъектов естественных монополий особенностям их производственных циклов. Кроме того, огромное количество «претензий» к нормам 127-ФЗ у правоведов и практикующих юристов. С точки зрения экономической составляющей особого внимания заслуживают три основные проблемы, точнее отсутствие регламентирования в современном российском законодательстве по трем вопросам: банкротство гражданина, трансграничная несостоятельность и «антирейдер-

ские» нормы. Эти три проблемы затрагивают различные сферы жизни современного российского общества, от прав и свобод гражданина, до вопросов международного права, но значимость их решения одинаково высока.

Банкротство физических лиц

Институт банкротства физического лица можно считать одним из самых важных достижений мирового гражданско-правового развития. Практически во всех странах с рыночной экономикой поддержка должника-гражданина в ходе рассмотрения дела о его несостоятельности (банкротстве) есть неотъемлемая часть всех его прав и свобод. В рамках данной нормы гражданин может получить так называемую защиту от кредиторов на необходимый и достаточный промежуток времени, а также рассчитывать на реструктуризацию долга или даже списание его части. В США данный институт можно назвать самым востребованным, особенно во времена финансовых кризисов. В России, однако, положение дел в этом вопросе пока не соответствует «западным» достижениям. В действующем законодательстве о банкротстве (127-ФЗ от 26.10.2002 г.) существует глава X, посвященная регламентированию вопросов, связанных с несостоятельностью физических лиц. Действие данной главы распространяется на физических лиц, являющихся индивидуальными предпринимателями и фермерские хозяйства. В отношении гражданина в законе сказано следующее: «...арбитражные суды не вправе возбуждать дела о банкротстве граждан, не являющихся индивидуальными предпринимателями, поскольку, согласно пункту 2 статьи 231 закона «О несостоятельности (банкротстве)», предусмотренные им положения о банкротстве граждан вступают в силу со дня вступления в силу федерального закона о внесении соответствующих изменений и дополнений в федеральные законы» [1]. Таким образом, гражданин РФ не может рассчитывать на какую-либо помощь в случае своей несостоятельности и фактически остается один на один с постигшими его финансовыми трудностями. Потребительский бум, который возник в России к 2008 году, породил огромный спрос на потребительские кредиты. В свою очередь, мировой финансовый кризис внес в экономическую жизнь нашей страны свои коррективы. Множество людей лишились основных источников доходов, а значит, утратили возможность исполнять свои обязательства, т.е. могли бы заявить о своей несостоятельности. Но пока должник-гражданин в нашей стране не может рассчитывать на цивилизованные меры регулирования отношений с кредиторами.

В январе 2010 года отечественными законодателями был предложен законопроект «О реабилитационных процедурах, применяемых в отношении гражданина-должника» (Закон о банкротстве физических лиц). В данном законопроекте предусматривается присваивать статус банкрота человеку, накопившему долгов больше, чем на 50 тыс. руб., при условии, что данные обязательства не исполнены в течение полугода. Так же, как и для физических лиц, являющихся индивидуальными предпринимателями, и фермерских хозяйств, законопроект предполагает применение к гражданину-должнику двух основных процедур: конкурсное производство и мировое соглашение. Конкурсное производство в отношении должника вводится на срок до шести месяцев и может быть продлено не более чем на 6 мес. В ходе конкурсного производства, должник вправе представить в арбитражный суд план реструктуризации долгов. Требования кредиторов, перед которыми должник несет ответственность за причинение вреда жизни или здоровью, морального вреда, требования по алиментным обязательствам, по выплате выходных пособий и оплате труда лиц, работающих по трудовому договору, и по выплате вознаграждений авторам результатов интеллектуальной деятельности в план реструктуризации долгов не включаются [2]. К плану реструктуризации долгов прилагаются: перечень имущества и имущественных прав; сведения о постоянных доходах должника за шесть месяцев, предшествующих представлению плана реструктуризации долгов в арбитражный суд; сведения о кредиторской задолженности, включая задолженность по те-

кущим обязательствам; кредитный отчет, полученный из бюро кредитных историй, либо документ, подтверждающий отсутствие кредитной истории у должника [2].

В случае вынесения арбитражным судом определения об отказе в утверждении плана реструктуризации долгов, арбитражный суд принимает также решение о признании должника банкротом, что предусматривает погашение имеющихся обязательств за счет распродажи имущества должника. Все имущество должника, имеющееся на дату открытия конкурсного производства и выявленное в ходе конкурсного производства, составляет конкурсную массу, за вычетом сумм, ежемесячно оставляемых должнику и членам его семьи для обеспечения их жизнедеятельности. Так, например, не подлежит продаже жилое помещение (его часть), если оно является единственным пригодным для постоянного проживания помещением, денежные средства на общую сумму не более двадцати пяти тысяч рублей, предметы обычной домашней обстановки и обихода, вещи индивидуального пользования (одежда, обувь и другие), за исключением драгоценностей и других предметов роскоши.

Заявление должника может быть подано только при наличии средств на выплату в размере фиксированной суммы вознаграждения конкурсного управляющего за два месяца, и на опубликование сведений об открытии конкурсного производства, которые вносятся в депозит арбитражного суда. Долг не будет считаться погашенным, если судом будут выявлены признаки преднамеренного банкротства или будет доказано, что перед процессом человек пытался избавиться от имущества.

Объявлять себя банкротами граждане смогут не чаще, чем раз в пять лет. Кроме того, ставшее банкротом физическое лицо в течение года не сможет заниматься предпринимательской деятельностью и учреждать свою фирму с образованием юридического лица, а также в течение пяти лет не сможет брать кредиты в банках. Законопроект одновременно распространяет свое действие, как на физических лиц, так и индивидуальных предпринимателей, которые сейчас банкротятся как юридические лица.

Принятие рассмотренного законопроекта решило бы огромное количество проблем, а главное, позволило бы гражданину РФ чувствовать себя в известной степени защищенным в случае возникновения финансовой несостоятельности. Возможно, он до сих пор не принят, по причине потенциально высокого риска тяжелых последствий для банковской системы России в переходный период, связанный с действием норм данного законопроекта. Так, или иначе, закон «О реабилитационных процедурах, применяемых в отношении гражданина-должника» необходим и все-таки будет принят в обозримом будущем.

Трансграничная несостоятельность

Следующий, вопрос, на котором хотелось бы остановиться, посвящен проблемам законодательного регулирования отношений, осложненных иностранным элементом, так называемой трансграничной несостоятельности. Глобализация масштабов движения капиталов, международная интеграция финансовых и торговых связей, интернационализация производства привели к возникновению такой проблемы, как трансграничное банкротство. Появление транснациональных компаний на российском рынке, а также участие отечественных компаний в экономической жизни других стран, создали необходимость регулирования вопросов трансграничной несостоятельности в России. До недавнего времени в отечественном правовом лексиконе такого понятия не существовало. Да и на мировом уровне корректировка законодательства о банкротстве с учетом явления трансграничного банкротства еще не завершена. И, тем не менее, в некоторых «передовых» странах регулирование вопросов трансграничного банкротства существует и вполне работает. Так, на страны, входящие в Европейский Союз, распространяется Регламент Совета Европейского Союза о производстве по делам о несостоятельности от 29 мая 2000 г. № 1346/2000.

Действующее отечественное законодательство о банкротстве (127-ФЗ от 26.10.2002 г.)

не содержит положений, регулирующих отношения, осложненные иностранным элементом (иностранные кредиторы, наличие имущества должника за рубежом). Министерством экономического развития были предложен ряд законопроектов, регулирующих связанные с банкротством процедуры. Пожалуй, важнейшим «достижением» является введение понятия "трансграничное банкротство" – это отношения, связанные с банкротством российских и иностранных юридических лиц, а также индивидуальных предпринимателей, осложненные иностранным элементом [3]. Как правило, речь идет о предприятии должника, ведущем основную деятельность за пределами государства, в котором зарегистрировано, либо, активы которого полностью или частично расположены на территории других государств. В случае несостоятельности такого предприятия возникает ряд проблем, связанных с ведением судебного производства, либо нескольких производств, в рамках законодательств разных государств. В качестве основного решения данной проблемы специалисты видят так называемый принцип параллельных производств. Так, в пояснительной записке к проекту закона «О трансграничной несостоятельности (банкротстве)» подчеркивается: «сущность принципа параллельных производств, в соответствии с законопроектом, заключается в наличии основного и неосновного производств по делу о банкротстве» [4]. Согласно законопроекту, российские арбитражные суды рассматривают дела о трансграничном банкротстве должников – российских и иностранных юридических лиц и индивидуальных предпринимателей в зависимости от центра основных интересов должника. При определении центра основных интересов должника, кроме места регистрации должника как юридического лица или как индивидуального предпринимателя, могут приниматься во внимание такие обстоятельства, имеющие место в течение последних трех лет, как местонахождение основного имущества должника, большинства кредиторов должника, производственных ресурсов должника и другие.

В законопроекте предполагается, что заявление о признании должника банкротом подается в арбитражный суд по месту нахождения центра основных интересов должника, по тому же критерию выбираются и правовые основы, по которым будет рассматриваться дело о банкротстве. Основное производство будет охватывать все имущество должника, вне зависимости от места его нахождения. Кроме того, наряду с основным производством может быть открыто неосновное производство в стране, где находится часть бизнеса должника. В этом случае производство будет распространяться лишь на имущество, находящееся в этой стране, и будет определяться правом этой страны. В случае если установлено, что центр основных интересов должника находится на территории Российской Федерации, производство по делу о банкротстве возбуждается в соответствии с законодательством Российской Федерации. Следовательно, арбитражные суды в этом случае применяют российское право по таким вопросам, как основания возбуждения дела о банкротстве, включение имущества должника в конкурную массу, порядок удовлетворения требований кредиторов и другие существенные вопросы, связанные с несостоятельностью должника. При этом по заявлению управляющего иностранным производством, кредиторов, иных заинтересованных лиц может быть возбуждено неосновное производство по делу о банкротстве на территории Российской Федерации.

В настоящее время, практика рассмотрения дел о банкротстве, связанных с трансграничной несостоятельностью, в России ограничена лишь рассмотрением дел с участием иностранных кредиторов. Принятие рассматриваемого законопроекта позволит более эффективно использовать потенциал реабилитационных процедур в деле о банкротстве, а также распространить национальный режим рассмотрения дела о банкротстве на зарубежные активы российских компаний [4].

И, наконец, следует отметить, что наличие или отсутствие в законодательстве о банкротстве конкретной страны четкого и прозрачного регулирования всех аспектов трансграничного банкротства оказывает значительное влияние на степень привлекательности «местных» компаний для иностранных инвесторов.

Противодействие рейдерству

Последняя в указанном ранее списке, но далеко не последняя по значимости проблема рейдерства в современной России стала одной из самых обсуждаемых на всех уровнях. Рейдерство в России, т.е. в той или иной степени насильственный захват предприятий, имущества или имущественных прав, становится всё более острой проблемой. Уже развита своего рода инфраструктура – есть те, кто занимаются рейдерством профессионально. Но вот с законным противостоянием данным деяниям дела обстоят очень сложно. Мировой опыт позволяет сделать вывод, что явление рейдерства можно практически однозначно разделить на три группы:

1. «Черное» рейдерство подразумевает использование противоправных способов достижения основной цели. Речь идет о подделке документов, откровенного шантажа, и даже применения насильственных мер, таких как силовой захват имущества.

2. «Серое» рейдерство, как правило, также использует нелегитимные способы и инструменты, но результат имеет законную силу. Так, «серые» рейдеры используют неиссякаемый коррупционный потенциал сотрудников российских правоохранительных и судебных органов для принятия решений на основании фальсифицированных документов.

3. «Белое» рейдерство – это наивысший уровень «профессионального» рейда. Все действия имеют исключительно законный характер.

История российского рейдерства изобилует примерами «черных» схем, особенно в период 90-х годов прошлого столетия. И сегодня «институт» рейда в нашей стране постепенно переходит к «светло-серому» этапу своего развития. При этом до недавнего времени такого преступления, как рейдерство или его составляющих не существовало. Единичные случаи привлечения «чёрных» рейдеров за мошенничество, вымогательство, подделку документов, самоуправство и т.п. Конечно, собственникам и менеджменту российских предприятий известны основные меры по защите от подобного рода неприятностей. Так, необходимо вести политику снижения объема кредиторской задолженности и жесткий контроль за ее составом. Уменьшить распыленность компании, сократив количество акционеров. Разделить компанию и ее активы на несколько юридических лиц. Усилить контроль над возможными путями утечки информации внутри компании. Установить дружеские отношения с чиновниками. Если речь идет об ООО, то рекомендуется крайне щепетильно относиться к составлению Устава предприятия. Эти меры значительно затруднят захватчику его действия, увеличат стоимость захвата и сделают компанию непривлекательной для рейдера. И, тем не менее, потребность в четко прописанных определениях, сущности и наказании деяний, подпадающих под понятие рейдерства, уже очевидны всем.

В рамках разрешения данного рода проблем в последние годы были приняты законы, в рамках так называемых «антирейдерских» поправок. В июле 2009 вступили в силу поправки в законодательство об обществах с ограниченной ответственностью (ООО), имеющие «антирейдерский» характер. В результате, сделки по продаже долей в уставном капитале подлежат обязательному нотариальному удостоверению, что, безусловно, должно решить проблему незаконных манипуляций в этой сфере. Но существует опасение, что таким образом осложнится процедура вхождения в российский бизнес иностранных инвесторов. Изменения касаются всех участников ООО. Согласно принятому закону, нотариус должен проверять полномочия участников сделки на распоряжение долями. Они переходят к приобретателю лишь с момента нотариального удостоверения сделки или внесения соответствующих изменений в Единый государственный реестр юридических лиц. Сведения о заключении сделки нотариус передает в налоговые органы.

В июне 2010 года Президентом РФ был подписан федеральный закон "О внесении изменений в Уголовный кодекс Российской Федерации и в статью 151 Уголовно-

процессуального кодекса Российской Федерации". Дополнение кодекса указанными нормами позволит привлекать рейдеров к уголовной ответственности уже на начальных этапах рейдерского захвата, упреждая наступление последствий, при которых истребование захваченного имущества ограничено институтом защиты добросовестного приобретателя. Теперь, в соответствии с законом, можно привлечь к ответственности за фальсификацию единого государственного реестра юридических лиц или реестра владельцев ценных бумаг, в том числе и за внесение заведомо недостоверных сведений в реестр владельцев ценных бумаг, за фальсификацию решения общего собрания акционеров или решения совета директоров. Сроком до десяти лет лишения свободы будут наказываться действия, повлекшие наступление тяжких последствий, таких как: уничтожение имущества, нанесение вреда здоровью. Кроме того, преступлением будет считаться и умышленное искажение результатов голосования при принятии решения на общем собрании акционеров [5].

По мнению законодателей, подобные поправки должны существенно повысить качество действующего корпоративного законодательства и будут иметь позитивные экономические последствия. Кроме всего прочего, отсутствие «антирейдерской» составляющей законодательства РФ значительно ухудшает инвестиционный климат в стране, так как, иностранные инвесторы явно опасаются возможных последствий. Но следует отметить, что за прошедшие два года столь ценные поправки так и не начали работать. Практикующие юристы говорят о том, что, несмотря на очевидность состава преступления по обозначенным статьям, Следственный комитет РФ отказывает в возбуждении дел. По мнению большинства специалистов, основной причиной отсутствия правоприменительной практики является недостаточная квалификация следователей и судей, не желающих работать с новыми законами.

Выводы

Проведен анализ и оценка текущей ситуации и перспектив изменения российского законодательства в отношении вопросов банкротства физических лиц, трансграничной несостоятельности и противодействия рейдерству. Актуальность данных вопросов не вызывает сомнений, так как их решение поможет вывести отечественное законодательство о банкротстве и регламентирование противодействия рейдерству на мировой уровень. Что, в свою очередь, значительно улучшит инвестиционный климат в России и обеспечит гарантии, столь необходимые иностранным инвесторам. Кроме того, появление института банкротства физического лица, не являющегося индивидуальным предпринимателем, позволит гражданам РФ решать вопросы несостоятельности на цивилизованном уровне.

Библиографический список

1. Федеральный Закон «О несостоятельности (банкротстве)» № 127-ФЗ.
2. Проект Федерального закона «О реабилитационных процедурах, применяемых в отношении гражданина-должника»
3. Проект Федерального Закона «О трансграничной несостоятельности (банкротстве)».
4. Пояснительная записка к проекту ФЗ «О трансграничной несостоятельности (банкротстве)».
5. Уголовный кодекс РФ, ст. 170.1, 185.5
6. Федеральный закон «Об обществах с ограниченной ответственностью» № 14-ФЗ
7. **Борисов, Ю.Д.** Рейдерские захваты. Узаконенный разбой / Ю.Д. Борисов. – СПб.: Питер, 2008. – 224 с.
8. **Бирюкова, О.Ю.** Приемы антикризисного менеджмента: учеб. пособие / О.Ю. Бирюкова. – М.: Дашков и К, 2008.
9. Антикризисное управление: учеб. пособие. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Дашков и К°, 2009.
10. **Узбекова А.С.** Применение методов гармонического анализа в прогнозировании экономических процессов // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачев-

ского. Сер. «Экономика и финансы» / Нижегород. гос. ун-т. им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород. 2006. №2(9). С. 556.

11. Колесов, К.И. Контроллинг на предприятии как интегрированная управленческо-информационная система // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. «Экономика и финансы» / Нижегород. гос. ун-т. им. Н.И. Лобачевского. Н. Новгород 2006. №2(9). С. 217.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

A.S. Uzbekova

ANALYSIS OF CONTEMPORARY RUSSIAN CORPORATE LAW. CHALLENGES AND SOLUTIONS

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

Purpose: Diagnostics of the main problems of the modern Russian corporate legislation.

Methodology: During work as the author are carried out: identification, analysis of current state and assessment of the solutions to main problems in modern Russia's law on bankruptcy and some other related laws and regulations. The paper takes a deep insight into three areas: bankruptcy of individuals, cross-border insolvency, opposition to raiding in Russia.

The results and their application area: The bankruptcy of an individual has not yet emerged in Russia as a phenomenon at present. The relevant bill was drawn up in 2010, yet it has not been adopted. Russian corporate law desperately requires clear regulation into the relationships where a foreign party is involved. Adoption of law on cross-border bankruptcy would greatly enhance attractiveness of domestic companies to foreign investors. The importance of adopting anti-raiding laws in Russia is seen undoubtful. Adoption of this "anti-raider" amendment is an important, yet insufficient step in solving this problem.

Conclusions: Attempts to solve the problems outlined in the paper will bring Russian corporate law to a new level.

Key words: corporate law, attributes of bankruptcy, bankruptcy of individuals, private debtor, debt restructuring, cross-border insolvency, parallel productions, raiding, business captures.

УДК 681.3

С.В. Ратафьев

МОДЕЛИРОВАНИЕ В ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Успешная инновационная деятельность в условиях современного бизнеса должна широко использовать моделирование как способ построения научно обоснованного прогноза её результатов. Однако приёмы и методы построения прогнозов, вполне успешно применяемые в условиях стабильно работающего бизнеса, нередко оказываются бесполезны для прогнозирования последствий инноваций. В статье показано, что одна из причин таких неудач состоит в использовании моделей, непригодных для описания организационно-экономических систем. Рассматриваются возможности применения различных моделей для прогнозирования последствий инновационной деятельности на предприятиях.

Инновации и инновационная деятельность – в центре внимания современного бизнеса и социально-экономических исследований. Вместе с тем, любая инновация несёт с собой множество различных последствий для бизнеса: не бывает сколько-нибудь серьёзных «точечных» инноваций. Некоторые последствия являются желательными, позитивными, другие – нежелательными, негативными, и сила позитивных и негативных эффектов инноваций соизмерима. Таким образом, любая инновация – это «обоюдоострое оружие», и прежде, чем её применять, мы должны быть уверены в том, что пользы от неё будет больше, чем вреда. Внедрению инновации должен предшествовать прогноз, позволяющий оценить последствия планируемых нововведений: непосредственные, первичные результаты, долговременные последствия, побочные эффекты.

Одним из важнейших этапов построения прогнозов является построение (или выбор) моделей объекта прогнозирования и окружающей среды [1, 2]. Очевидно, что для описания организационно-экономической системы (ОЭС) потребуется совокупность, *система* моделей. В качестве *метамодели*, или модели нулевого приближения, представляется целесообразным представить модель ОЭС как объекта с системой управления, находящегося в некотором окружении (рис. 1).



Рис. 1. Классическое представление системы «среда – объект – система управления»

Эта схема является основой для анализа и проектирования технических устройств различного назначения. Для них подробно разработаны математические модели подсистем и звеньев, спроектированы и воплощены в реальные устройства многочисленные технические системы. Несмотря на то, что управление в ОЭС значительно отличается от управления техническими системами, приведённая на рис. 1 схема вполне годится в качестве отправной точки для последующих построений.

Подход к моделированию инновационных процессов в ОЭС, основанный на анализе процессов управления, можно объяснить следующим образом. Йозеф Шумпетер, классик экономической теории, стоявший у истоков изучения инноваций, выделял пять форм проявления последних: 1) использование новой техники в производственном процессе; 2) выпуск продукции с новыми свойствами и предложение её на рынок; 3) использование нового сырья в производственном процессе; 4) изменение и организация производства и его материально-технического обеспечения; 5) выявление новых рынков сбыта для существующей продукции. Все перечисленные формы инноваций, как видно, представляют собой последствия принятия управленческих решений об инновациях в ОЭС.

В представленной на рис. 1 модели объект управления (ОУ) и управляющая система (УС) отделены друг от друга и от внешней среды. Целевая функция задается пользователем системы, и ОУ на неё не влияет. Внешняя среда считается статистически стабильной – она описывается средними либо предельно допустимыми значениями показателей, и за пределами граничных значений конструктор системы не гарантирует работоспособности системы с заданным качеством. Считается, что ОУ – полностью детерминированная система, не имеющая никаких «собственных» целей; любые изменения свойств ОУ (в результате поломок, старения или несанкционированных *инновационных* вмешательств) есть явление ненормальное: за ними должны следовать ремонт, замена. То же самое относится и к другим подсистемам.

Схема на рис. 1 даёт самое общее представление об управлении в ОЭС, но в них, по сравнению с техническими системами, все аспекты и обстоятельства становятся качественно иными и существенно усложняются. Рассмотрим некоторые особенности построения моделей подсистем ОЭС.

Объект управления (ОУ) в ОЭС также является сложнейшей системой, включающей людей (работников и управленцев), имеющих свои собственные цели, свои позиции по отношению к происходящим событиям. Моделирование ОУ в ОЭС заслуживает отдельной статьи, здесь же мы обозначим некоторые проблемы и особенности моделирования ОЭС, в том числе и с целью анализа инновационной активности.

Модели ОУ в естественных и технических науках строят, используя математический аппарат интегрального и дифференциального исчисления, однако его возможности наиболее проявляются при описании равновесных систем, а при моделировании принципиально неравновесных систем применение этого аппарата малоэффективно. Особенно в процессе инновационной деятельности ОЭС, относится именно к неравновесным системам, поэтому для построения моделей социальных систем следует применять подходы, используемые в *когнитологии*, о которой будет сказано далее.

Построение модели системы предполагает выявление элементов и подсистем, из которых состоит система, и связей между ними т.е. *состава* и *структуры* системы. В классическом системном анализе считается, что состав и структура остаются неизменными либо изменения считаются несущественными. Серьёзные изменения в ОУ, в том числе вследствие внедрения *инноваций*, означают изменение модели ОУ и необходимость изменений в устройстве управления. Таким образом, ОУ в данной интерпретации – это машина, функционирующая по заранее заданному алгоритму, с устойчивой заранее заданной структурой, и любые инновации – это результат вмешательства человека. Совсем иначе выглядит процесс моделирования ОЭС.

Понимание ОЭС как некоторой машины, нацеленной на выпуск продукции и получение прибыли, принятое в неоклассической экономической теории, оказывается малопродуктивным. Бизнес-организация – это в большой степени социальный организм, несмотря на присутствие в его составе машин и механизмов различного назначения, в том числе сложнейших компьютеров, сетей, баз данных и т.п. В работе известного российского специалиста по моделированию социальных процессов Ю.М. Плотинского отмечается: «Основное затруднение, с которым столкнулась теория систем, заключалось в том, что ключевые понятия классического системного анализа ориентированы на изучение систем в статическом состоянии. В такой ситуации адекватным было понимание системы как целого, зафиксированного устойчивой структурой взаимодействия элементов. Однако, если мы начнем наблюдать за

динамикой системы, то легко убедимся, что чёткость и ясность основных системных понятий начинает размываться» [3].

В социальных системах многие связи возникают и разрушаются в процессе функционирования ОЭС, поэтому структура системы изменчива, непостоянна. Это же утверждение справедливо и для состава ОЭС. Отмеченные особенности порождают проблему самоидентичности (самоидентичности) социальных и биологических систем: остаётся ли изменившаяся во времени система той же, или это уже другая система? Становится понятно, что подходы к моделированию *живых систем* (биологических и социальных, в том числе ОЭС) принципиально отличаются от подходов к моделированию систем *неживых*.

Решая проблему самоидентичности, биологи пришли к выводу, что ключевым понятием теории живых систем должна стать *организация*, описывающая главные отношения, которые конституируют систему как целое, определяют её суть. «Именно в организованности (согласованном взаимодействии частей) системы заключается её способность сохранять своё тождество» [9].

Исследуя отличие живых систем от неживых, чилийские учёные У. Матурана и Ф. Варела [10] вводят понятие «аутопойезис» (аутопоз), с помощью которого живые системы воспроизводят свои компоненты, составляющие её организацию, и поддерживают таким путём самоидентичность системы. Живая система – это долгоживущее образование, составленное из короткоживущих компонент. «Сохранение единства и целостности, в то время как сами компоненты непрерывно или периодически распадаются и возникают, создаются и уничтожаются, производятся и потребляются, и называется *самовоспроизведением*» (или *аутопойезисом*) [11, с. 398].

Живые системы обладают свойством самоорганизации, т.е. способностью увеличивать свой порядок или изменять свою организацию [6, с. 410]. Система сама выбирает способ реагирования на изменение внешней среды: «Посредством своей организации живая система определяет область всех взаимодействий, в которые она может вступать без утраты собственной идентичности» [12, с. 99].

Внешняя среда (ВС), окружающая ОЭС, должна рассматриваться не просто как источник возмущающих воздействий, мешающий достижению поставленных перед ОЭС целей. Внешняя среда – это источник информации, объект прогнозирования, наконец объект активного целенаправленного воздействия. Это сложная система, потребляющая результаты деятельности ОЭС и поставляющая ресурсы и информацию в неё. Способность распознавать, познавать среду и предвидеть её поведение отличает живое от неживого. Матурана предлагает следующее определение познающей (когнитивной) системы: «это система, организация которой определяет область взаимодействий, где она может действовать значимо для поддержания самой себя, а процесс познания – это актуальное (индуктивное) действие или поведение в этой области. Живые системы – это когнитивные системы, а жизнь как процесс представляет собой процесс познания. Это утверждение действительно для всех организмов как располагающих нервной системой, так и не располагающих ею» [12, с. 103].

Отметим ещё одну особенность моделирования ОЭС: живые системы претерпевают изменения, проходят ряд стадий в своём существовании и развитии. Принято выделять от трёх до десяти стадий в жизненном цикле организации, но чаще говорят о четырех основных стадиях развития: становления, роста, зрелости и упадка (последняя может перейти в стадию обновления). На каждой из стадий ОЭС имеет особый набор целей, ценностей, задач, ресурсов и т.д., что также необходимо учитывать при построении моделей ОЭС.

Целевая функция ОЭС – одна из самых сложных, фундаментальных категорий теории систем [13]. «Анализ определения цели и связанных с ней понятий показывает, что в зависимости от стадии познания объекта, этапа системного анализа, в понятие «цель» вкладывают различные оттенки – от идеальных устремлений (цель – «*выражение активности сознания*»; «*человек и социальные системы вправе формулировать цели, достижение которых невозможно, но к которым можно непрерывно приближаться*»), до конкретных целей – конечных результатов, достижимых в пределах некоторого интервала времени, формулируемых иногда даже в терминах *конечного продукта* деятельности» [6].

Для моделирования целевых аспектов ОЭС можно воспользоваться понятием *ориентиров деятельности организации* [4]. «Когда речь идёт о целевом начале в поведении орга-

низации и, соответственно, о целевом начале в управлении организацией, то обычно говорят о трёх составляющих: видении, миссии, целях. Всю совокупность ориентиров деятельности организации можно разделить на три основных типа: (1) *идеалы* – ориентиры, которых мы не рассчитываем достичь в обозримом периоде, но допускаем приближение к ним, (2) *цели* – наиболее общие ориентиры деятельности ОЭС в плановом периоде, достижение которых предполагается в полном объёме или в своей большей части, (3) *задачи* – конкретные, количественно измеряемые ориентиры, описание серии рабочих функций, определяющих форму и время выполнения задания» [4]. Рисунок 2 иллюстрирует взаимодействие основных категорий, связанных с целевой функцией.

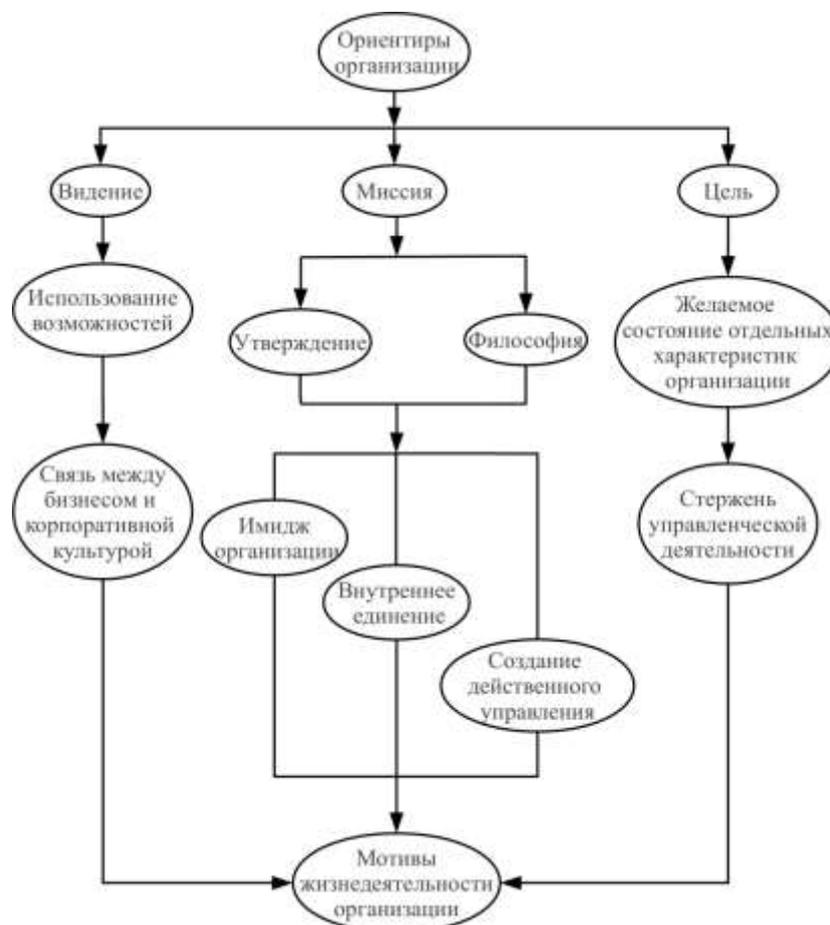


Рис. 2. Ориентиры деятельности организации

Видение в ОЭС, особенно в бизнесе, важнейший аспект упорядочения деятельности системы на основе природного таланта предпринимателя. Появлению организации предшествует её *видение*, т.е. её образ, существующий перед внутренним взором её лидера. Разработка и внедрение инновации – это, в сущности, создание нового будущего ОЭС, поэтому способность к предвидению (видению) результатов инновационной деятельности – залог успеха этой деятельности. «Сосредоточившись на видении будущего, лидер оперирует эмоциональными и духовными ресурсами организации, её ценностями, обязательствами, устремлениями. Менеджер, напротив, имеет дело с материальными ресурсами компании, её капиталом, человеческими навыками и умениями, сырьём и технологией... Если лидерство предполагает хоть искру таланта, то он должен заключаться в необыкновенной ... способности вызывать ... отчётливое видение будущего, одновременно простого, понятного, желательного и захватывающего» [16, с. 118]. В отличие от планирования и, в большой степени, прогнозирования, неплохо обеспеченных математическими методами, предвидение – чисто человеческий фактор, и моделирование его возможно средствами *когнитологии*, упомянутой выше.

Миссия – более конкретный, чем видение, ориентир в деятельности организации: миссия должна быть реализована по истечении некоторого заданного времени. Она позволяет посмотреть организации на себя со стороны, выйти за рамки внутренних проблем, понять, как видит организацию её окружение. Миссия: 1) формирует имидж организации, 2) способствует формированию внутреннего единства и созданию корпоративного духа, 3) создаёт возможность эффективного управления организацией.

Цель – это конкретное состояние характеристик организации, достижение которых является для неё желательным и на достижение которых направлена её деятельность [4, с. 27]. Цели принято подразделять на долгосрочные и краткосрочные, в ряде случаев указывают и среднесрочные цели. ОЭС состоят из функционально и структурно обособленных подразделений, у каждого из которых существует своя собственная цель. Таким образом, в ОЭС складывается иерархия уровней управления и целей. Введение целеполагания для подсистем организации основано на допущении о том, что подсистемы обладают свободой выбора, имеют свою судьбу, видение мира и собственные цели, которые могут в большей или меньшей степени совпадать с целями, предписанными вышестоящим уровнем. Мера свободы, которая может быть предоставлена подсистемам организации, – предмет самостоятельных исследований.

Укажем на ещё одну причину, по которой в моделях ОЭС следует выделять подсистемы и устанавливать иерархию целей. Дело в том, что ОЭС, работая в динамичном и конкурентном окружении, внедряя инновации, не только использует готовые, кем-то ранее добытые знания, но и сама должна добывать знания разного рода, чтобы потом использовать их в операционной и управленческой деятельности. Знания, необходимые для успешного функционирования ОЭС, добываются не только и не столько некоей специализированной структурой (научно-исследовательским подразделением), но и всеми участниками процессов, протекающих в ОЭС. Возможность применить новое знание, полученное в подсистеме, имеется только в случае *относительной свободы*, самостоятельности этой подсистемы, т.е. тогда, когда ей предписан не жёсткий алгоритм работы, но указана цель, гармонизированная с целью ОЭС в целом.

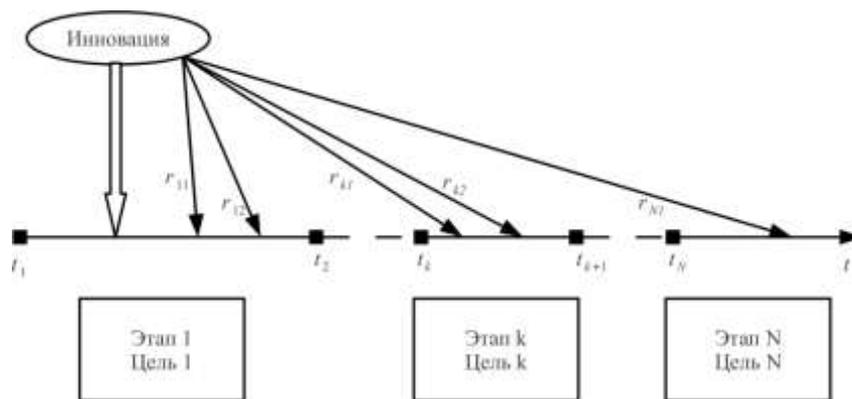


Рис. 3. Последствия введения инноваций

Модель целевой функции применительно к ОЭС, функционирующей в сложном, нестабильном, плохо прогнозируемом окружении, трансформируется в модель ориентиров организации. Именно с позиции ориентиров и следует оценивать перспективы и последствия внедрения той или иной инновации, а последствия эти многочисленны и разнесены во времени. На рис. 3 показано распределение последствий инновации во времени и по целям. Горизонтальной линией изображена ось времени. Существование ОЭС рассматривается как смена этапов жизненного цикла. Начало каждого этапа обозначено t_i ; свойства и цели существования при переходе на новый этап изменяются. В момент t_N внедряется инновация, имеющая ошутимое влияние на работу системы в течение нескольких этапов её жизненного цикла.

Стрелками на рис. 3 обозначены результаты (последствия) внедрения инновации r_{ij} , где i – индекс номера цели; j – индекс результатов инновации. Часть результатов будут благопри-

ятны, а часть – нежелательны или даже опасны для ОЭС и её окружения. Возможен вариант, когда результаты инновации благоприятны, например, для этапа № 1 и нежелательны для этапа №3 и далее. Какие и как принимать решения в этих случаях – тема специального исследования, здесь же мы заметим, что для ОЭС нужно прогнозировать (планировать) систему, своего рода «вереницу» целей, и увязывать её с системой (тоже – «вереницей») последствий инновационной деятельности.

Классический пример инновации – строительство атомных электростанций: ближайшие, желанные результаты – энергообеспечение региона, создание рабочих мест и т.д.; более отдалённые и нежелательные последствия – проблема утилизации отходов, затем демонтаж отслужившего оборудования и др. Моделирование целей и последствий инноваций – специфические задачи прогнозирования в инноватике.

Обратимся теперь к вопросам управления системой. Как видно на рис. 1, с помощью блока датчиков собирают данные о состоянии объекта управления. Затем эти данные поступают на вход системы распознавания, задача которой – обеспечить «информационный стык» между описанием целевых установок (целевой функции) и массивом информации, поступающим с блока датчиков. Далее, выходные данные системы распознавания и значения целевой функции поступают на блок сравнения (компаратор), обозначаемый кружком со знаком + внутри, и результаты рассогласования поступают на вход *системы управления*. Задача последней состоит в том, чтобы, используя соответствующие математические модели, сформировать управляющие сигналы, призванные вернуть ОУ на заданную, заранее рассчитанную оптимальную траекторию движения к заранее указанной цели.

Значительно сложнее обстоит дело в ОЭС. Ранее мы выяснили, что задать для ОЭС цель в собственном смысле – задача совсем не тривиальная. Одна из проблем – наличие иерархии целей подсистем в сложной ОЭС. Цели ОЭС изменяются по мере прохождения ею различных этапов жизненного цикла, но проблему создаёт не смена целей (что можно заранее запрограммировать и заложить в алгоритм управления), а неопределённость моментов смены целей и расплывчатость описания последних. Наконец, ОУ в ОЭС – не просто механизм, а система, способная к развитию, росту, самосовершенствованию, получению новых знаний и способностью использовать их в своей деятельности и т.д. Более того, распространённым является конфликт между системой управления и ОУ, когда последний не принимает стиль управления и выходит из-под контроля управляющего органа.

Управление ОЭС невозможно свести к отработке неких формальных алгоритмов, заранее продуманных и оптимизированных, поскольку непрерывно изменяется окружение ОЭС, сама ОЭС, её цели. В таких условиях управление предполагает выработку и реализацию *управленческого решения* (УР) – процесса, который складывается из ряда актов и процедур, таких как анализ, прогнозирование, оптимизация, экономическое обоснование и выбор альтернативы из множества вариантов достижения цели.

Необходимость в разработке УР в ОЭС возникает тогда, когда в ОУ создаётся *управленческая (проблемная) ситуация* (УС) – рассогласование (фактическое или возможное) между реальным (текущим) и желательным (целевым, ожидаемым) состоянием ОУ. Другими словами, управленческая ситуация возникает тогда, когда естественное течение процессов в ОУ не устраивает по каким-либо причинам управляющую систему, а управленческое решение есть средство преодоления УС. Заметим, что уход системы с оптимальной траектории, ведущей к заданной цели – лишь один из источников возникновения УС; другой причиной может быть ожидаемое изменение целей, условий внешней среды и внутреннего устройства ОУ. На рис. 4 представлена последовательность этапов принятия и реализации УР.



Рис. 4. Этапы принятия и реализации УР

Можно выделить три аспекта к разрешению УС и выработке УР: неформальный (интуитивный, эвристический); формализованный, предполагающий использование моделей (обычно, экономико-математических); и экспертный, использующий формальные и неформальные методы и занимающий промежуточное положение между двумя названными.

Сущность *интуитивного подхода* состоит в том, что лица, принимающие решения (ЛПР), опираясь на свои знания, опыт и интуицию, предлагают некоторое УР. *Интуиция* – это способ прямого, непосредственного постижения истины без предварительных логических рассуждений и без доказательств. Формирование интуитивного решения протекает вне прямого сознательного контроля, в то время как *опыт, или опытное знание*, – знание, приобретённое в процессе переживаний, впечатлений, наблюдений, практических действий, в отличие от знания, достигнутого посредством абстрактного мышления [13].

Эвристический подход универсален, зачастую позволяет получить решение быстро, даже в условиях, когда предыдущий опыт (свой или чужой) невозможно использовать (например, его просто нет или сведения о нём недоступны). В таких случаях, особенно характерных для инновационной деятельности, эвристический подход незаменим. Вместе с тем, следует помнить, что он имеет ряд недостатков: 1) даже опытный менеджер не может избежать ошибок и промахов, ведущих к ощутимому ущербу; 2) управленцы-самородки – явление редкое, в то время как потребность в грамотных менеджерах велика; 3) передача и фиксация интуитивных умений, знаний и опыта весьма затруднительна; 4) сложная система имеет свойство вести себя «контринтуитивно».

Формализованный подход к описанию проблемной ситуации основан на использовании формальных (математических) моделей – статистических, аналитических, логических, теоретико-множественных и др. Весьма популярно междисциплинарное направление, получившее название «исследование операций» (ИО) [6/, с. 191]. Предметом его является разработка методов анализа целенаправленных действий (операций) и объективная сравнительная оценка получаемых решений. Однако, несмотря на впечатляющие успехи в решении многочисленных оптимизационных задач, применение методов ИО не находит должного применения в практической деятельности менеджеров. «Несмотря на широкое распространение методологии ИО в различных прикладных областях, всё же исходная терминология этого направления часто трудно интерпретируется в практических условиях проектирования сложных технических комплексов, в экономических задачах, при решении проблем организации производства и управления предприятиями, научно-исследовательскими организациями, объектами непромышленной сферы и т.п.» [6, с. 192]. Другими словами, результаты формального моделирования нуждаются в «привязке» к практической управленческой деятельности весьма нетривиальная задача.

Экспертный подход основан на предположении о том, что мнение группы экспертов надёжнее мнения отдельного эксперта, однако это условие не выполняется автоматически: эксперты в группу должны быть соответствующим образом подобраны. «Экспертные оценки (решения) – это суждения высококвалифицированных специалистов-профессионалов, высказанные в виде содержательной, качественной или количественной оценки объекта, предназначенные для использования при принятии решений» [15, с. 38].

Нам важно подчеркнуть то обстоятельство, что для выработки и принятия управленческих решений необходимо использование человеческого интеллекта, поскольку его синтетические, эвристические способности не могут быть заменены даже самыми математическими методами и вычислительными системами. «Гораздо реалистичнее рассматривать компьютеры не как конкурентов человека, но в гуманистическом плане как инструмент, совершенствующий человеческие способности» [7, с. 99]. Символически это обстоятельство изображено на рис. 5. Из рисунка видно, что разработка УР идёт параллельно по двум путям: формальному, предполагающему построение формальной модели, её анализ и интерпретацию полученных результатов, и интуитивному, использующему эвристические подходы, инсайт и т.д. Окончательное решение есть результат синтеза формального и эвристического результатов, и этот синтез может быть произведён только человеческим интеллектом (хотя и с помощью компьютера).



Рис. 5. Моделирование в процессе разрешения управленческих ситуаций

Заметим, что ни эвристический, ни экспертный подходы не анализируют сам процесс получения оценок и решений человеческим интеллектом: эти решения рассматриваются как озарение, откровение, подсознательное обобщение большого опыта работы, наконец, проявление врождённых способностей и т.п.

В настоящее время, ознаменованное широчайшим развитием инновационной активности во всех сферах человеческой деятельности, недостаточно опираться на накопленный опыт (даже очень богатый и многосторонний), ибо он может оказаться бесполезным при оценке последствий инновационной деятельности. Талантливые и проницательные эксперты, способные заглянуть в будущее, были и будут редкостью, да и они не всегда могут быстро сформулировать практически полезные решения. Для того, чтобы сделать поиск новых, нетрадиционных решений более надёжным и своевременным, необходимо уметь моделировать интеллектуальную деятельность человеческого мозга (или хотя бы её некоторые аспекты). Помочь в этом может *когнитология* – «... наука, изучающая закономерности процессов восприятия, познания, понимания, преобразования, представления, мышления, рефлексии и обучения и моделирующая принципы организации и работы естественных и искусственных интеллектуальных систем, основываясь на аналитическом, синтетическом и синергетическом подходах» (7, с. 96).

Словосочетание «искусственный интеллект» (ИИ), впервые произнесённое в 1956 году на конференции по искусственному разуму, обещало заманчивую возможность моделирования человеческого интеллекта и эмоциональной деятельности, включая творчество. Эйфорические настроения по поводу возможностей ИИ существовали первое десятилетие его развития, затем, с начала 1970-х годов, наступило затишье. Новое оживление интереса к системам ИИ связано с созданием микроминиатюрных компьютеров с огромными размерами памяти и высоким быстродействием, но это скорее, технологический прорыв, поскольку понимание интеллекта естественного остаётся на начальных стадиях исследования. Согласно тонкому замечанию, помещённому в [7, с. 99], «методологические трудности исследования ИИ в значительной степени идентичны трудностям философского рационализма. Вся предшествующая технология определена и ограничена парадигмой рационалистического мышления. Должна возникнуть качественно новая плоскость имитации человеческого мышления». Заметим, что концепции и подходы ИИ развивались в основном для управления в технических системах, где этот самый рационализм не уместен и, порою, неизбежен. Организация управления ОЭС с помощью моделей, применявшихся для технических систем, не просто нецелесообразна, но – недопустима.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что моделирование в инновационной деятельности с целью прогнозирования последствий, оценки их экономической целесообразности совершенно необходимо, однако следует помнить, что объект моделирования – это живая, самоорганизующаяся и саморазвивающаяся система. В связи с этим методы классической математики, успешно применяющиеся для моделирования технических систем, могут дать тривиальные или практически мало-полезные результаты. Следует искать новые подходы к построению интеллектуальных систем. Когнитология, в том числе ИИ, находятся на начальных фазах развития, поэтому опыт применения когнитивных подходов как положительный, так и отрицательный, даст толчок развитию ИИ в применении к управлению в ОЭС, а также в понимании интеллекта естественного.

Библиографический список

1. **Социально-экономическое прогнозирование:** учебник / Ф.Ф. Юрлов [и др.]. – Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексеева, 2010. – 232 с.
2. **Лапыгин, Ю.Н.** Экономическое прогнозирование: учеб. пособие / Ю.Н. Лапыгин, В.Е.Крылов, А.П. Чернявский. – М.: Эксмо, 2009. – 256 с.
3. **Жданов, А.А.** Автономный искусственный интеллект / А.А. Жданов. – 2-е изд. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. – 359 с.
4. **Лафта, Дж. К.** Теория организации: учеб. пособие / Дж. К. Лафта. – М.: ТК Велби, Изд-во Проспект, 2003. – 416 с.
5. Разработка и принятие решений в управлении инновациями: учеб. пособие / И.Л. Туккель [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 352 с.
6. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник: учеб. пособие для вузов; под ред. В.Н. Волковой, В.Н. Козлова. – М.: Высш. шк., 2004.
7. Когнитивная бизнес-аналитика: учебник; под науч. ред. Н.М. Абдикеева. – М.: ИНФРА-М, 2011. – 511 с.
8. **Плотинский, Ю.М.** Модели социальных процессов: учеб. пособие для вузов / Ю.М. Плотинский. – М.: Логос, 2001. – 296 с.
9. **Рапопорт, А.** Мир – созревшая идея / А. Рапопорт. – Дармштадт: Дармштадт Блаттер, 1993. – 230 с.
10. **Maturana, H.R.** Autopoiesis and Cognition: The Realization of Living / H.R. Maturana, F.G. Varela. – Dordrecht: Reidel, 1980. – 273 с.
11. **Клир, Дж.** Системология. Автоматизация решения системных задач / Дж. Клир. – М., Мир, 1990. – 544 с.
12. **Матурана, У.** Биология познания. Язык и интеллект / У. Матурана. – М.: 1996. С 95–142.
13. **Акофф, Р.Л.** О целеустремлённых системах: [пер. с англ.] / Р.Л. Акофф, Ф.Э. Эмери; под ред. и с предисл. И.А. Ушакова. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 272 с.
14. <http://ru.Wikipedia>
15. **Литвак, Б.Г.** Экспертные технологии в управлении: учеб. пособие / Б.Г. Литвак. – М.: Дело, 2004. – 400 с.
16. **Минцберг, Г.** Школы стратегий: [пер. с англ.] / Г. Минцберг, Б. Альстрэнд, Дж. Лэмпел; под ред. Ю.Н. Каптуревского. – СПб.: «Питер», 2001. – 336 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

S. Ratafiev

MODELLING IN THE INNOVATIONAL ACTIVITY

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

Purpose: The analysis of potential applications of various models for the purpose of forecasting the output of innovative activities in specific business environment.

Design/methodology/approach: Business system is described as a purposeful complex system, which includes the object of control, the control system and a number of subsystems. The introduction of any innovation is termed as part of decision making process, which inevitably leads to both desirable and undesirable consequences. The modeling of the innovative activity results in economical systems makes it possible to seem full range of consequences in order to take measures to prevent unwanted consequences.

Findings: It is necessary to combine the mathematical approaches with human intuition to prevent mistakes in the decision making process. Methods of the artificial intelligence are also available to evaluate the consequences innovative activities in the economical systems.

Research limitation/application: The present provides a starting point for further research in the area of using the formal and no formal models for forecasting of innovation consequences.

Originality/value: There are a lot of mathematical and no formal models which describes different aspects of economical systems, but it is a problem to create available description of the specific managerial problem. In this article the author made an attempt to put in order usage of any models for forecasting the output of innovative activities.

Key words: innovations, models of economical systems, modeling, forecasting the output of innovative activities, cognitive science.

УДК 338

А.А. Иванов

ACTIVITY-BASED COSTING КАК ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ПРИНЯТИЯ СТРАТЕГИЧЕСКИХ УПРАВЛЕНЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ

ООО «Премьер-Продукт»

Цель: Совершенствование методических аспектов калькулирования затрат для создания информационной базы, что будет способствовать принятию обоснованных стратегических управленческих решений хозяйствующими субъектами.

Методология: Достижение поставленной в работе цели предполагает создание последовательности применения причинно-следственной модели распределении затрат Activity-Based Cost System (ABC).

Результаты и область их применения: Результатом исследования является разработка новой последовательности применения системы ABC. Обоснована необходимость и целесообразность перехода российских компаний с традиционных методов калькулирования на системы ABC. Изложены результаты практического применения системы ABC при принятии стратегического управленческого решения.

Выводы: Российскому менеджменту необходим новейший адаптированный инструмент управленческого учета, который способствовал бы современным требованиям бизнеса при принятии стратегических решений в условиях высокой конкуренции.

Ключевые слова: Activity-Based Cost System, калькулирование себестоимости, традиционные системы учета затрат, объект затрат, база распределения, коэффициент распределения

Современная теория и практика экономического прогнозирования предлагает широкий спектр методов, позволяющих принимать как долгосрочные, так и краткосрочные управленческие решения, в том числе и в условиях неопределенности. Но, если выбор какого-либо метода прогнозирования зависит от целого ряда факторов, в том числе от субъективного взгляда исследователя, то достоверность отобранных исходных количественных данных лежит за пределами возможностей моделей прогнозирования и не ставится под сомнение. Например, данные, опубликованные на сайте Федеральной службы государственной статистики, принимаются как объективные, имеющие небольшую погрешность.

С одной стороны, достоверность таких сведений, как численность населения Российской Федерации, количество занятого населения, количество реализованного товара, действительно зависят лишь от добросовестности ответственных за подсчеты лиц.

С другой стороны, сведения, подсчитанные на основе данных, выраженных в денежном выражении, такие как объем выпущенной продукции, индекс цен производителей, могут быть достоверными с точки зрения статистического наблюдения, но не действительных затрат на их изготовление. Поясним данное утверждение.

На уровне хозяйствующего субъекта такие сведения, как численность производственного персонала, количество отсутствующих по болезни, количество контрагентов или объем привлеченных за период кредитных средств являются объективно достоверными. Значения, характеризующие, например, рентабельность (рентабельность произведенной или проданной продукции, рентабельность клиента или структурного подразделения), определяются с помощью принятой в организации системы калькулирования себестоимости (суммы прямых и косвенных затрат). Отнесение прямых затрат на объект затрат не предоставляет собой сложности, но распределение косвенных расходов – в полной мере зависит от выбранного метода калькулирования.

Вне зависимости от выбранного метода, косвенные расходы «привязываются» к какому-либо количественному показателю, который точно можно подсчитать, и при «участии» данного показателя в производстве товара или оказании услуги списываются на объект затрат.

Методика распределения затрат довольно проста:

1. Накладные расходы калькулируются по статьям затрат.

2. Выбирается база распределения (фактор распределения).
3. Подсчитывается коэффициент распределения:

$$K_p = \frac{\sum H.P.}{\sum Б.Р.},$$

где K_p - коэффициент распределения; $\sum H.P.$ - общая сумма запланированных накладных расходов; $\sum Б.Р.$ - общее запланированное количество базы (фактора) распределения.

4. Количество базы распределения для отдельного объекта умножается на имеющийся коэффициент распределения. Полученное значение – сумма накладных расходов на объект затрат.

Описанный алгоритм называется *одноуровневой традиционной системой распределения затрат*. Наиболее распространенные и простые базы распределения – часы труда основных рабочих, машино-часы и прямые расходы.

В усовершенствованной традиционной двухуровневой модели добавляется предварительное распределение накладных расходов по центрам издержек. Принцип распределения аналогичен одноуровневой системе, отличие составляет в перечне возможных баз распределения, в роли которых могут выступать, например, площадь помещения, количество наладок оборудования. Общий вид традиционных систем учета издержек представлен на рис. 1.

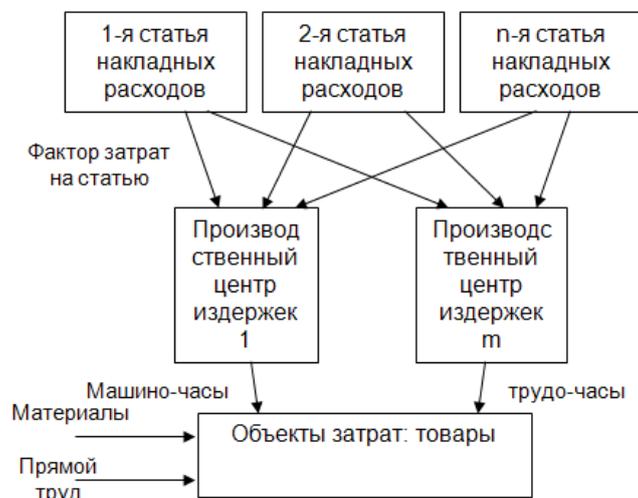


Рис. 1. Модель традиционной системы учета издержек

Точность и адекватность исходных экономических данных, используемых для принятия управленческих решений, зависит от выбранной концепции распределения косвенных расходов. Обычно российскими компаниями применяется двухуровневая модель. Количество статей накладных расходов определяется величиной организационной структуры предприятия и принятыми нормативами. Например, на предприятиях тяжелого машиностроения применяются «Основные положения по планированию, учету и калькулированию себестоимости продукции на промышленных предприятиях», введенные в действие 1 января 1971 года, и количество центров издержек соответствует перечню производственных цехов или структурных подразделений. В общем виде структура системы калькулирования задается требованиями финансового (бухгалтерского) учета, который, в свою очередь, направлен на удовлетворение нужд внешних потребителей информации – налогового органа, акционеров, инвесторов, органов статистического наблюдения. Одним из ключевых индикаторов, которые анализируются внешними пользователями информации, является прибыль или рентабельность анализируемого предприятия, а не точность распределения накладных расходов или рентабельность отдельного канала сбыта. Таким образом, исходные данные для принятия управленческих решений заимствуются из «налаженного» финансового учета.

Традиционные системы были актуальными и единственно возможными на протяжении XX века: «... многие процессы компаний зависели от интенсивности использования живого труда...» [3]. С уменьшением жизненного цикла продукции, с разработкой товаров, требующих достаточное количество интеллектуального труда, доля накладных расходов многократно возросла. На текущий момент их величина на производственных предприятиях составляет 150-300 % от суммы прямых затрат, а в сфере услуг – до 1000 %. В таком случае «точность» определения стоимости объекта затрат снижается, а принимаемые решения подвергаются обоснованной критике. Увеличение количества центров издержек даже до нескольких сотен единиц не дает адекватного решения проблемы: системы данного уровня, становясь более дорогостоящими в содержании, при этом не наделяются причинно-следственными связями между понесенными затратами и объектами затрат. «Системы учета издержек второго уровня <традиционные>, практически никогда не попадают ... в мишень – из-за сильного искажения затрат. Целью должно стать построение оптимальной системы управления затратами, которая бы уравнивала потери от ошибок при неточном измерении и стоимость самой измерительной процедуры» [3].

Альтернативой традиционным системам учета издержек является система Activity-Based Costing (ABC), разработанная американскими учеными Р. Капланом и Р. Купером в конце 80-х годов прошлого столетия и получившая широкое распространение на Западе. В России данная система известна под названиями «операционно-ориентированный метод калькуляции себестоимости», «анализ затрат по видам деятельности», «пооперационный анализ затрат», «метод разнесения затрат на основе процессов (операций, работ)», «учет затрат по функциям», а также «функционально-стоимостной анализ» (ФСА). Последний перевод приводит к ошибочной аналогии с одноименным методом, ориентируемым на конечную стоимость продукта. В связи с таким количеством разнообразных переводов и пока не устоявшейся в российской литературе терминологией будем использовать оригинальное название метода в его аббревиатуре – система ABC.

Изначально данная система рассматривалась лишь как более точный метод калькулирования себестоимости продукции, – такое поверхностное суждение до сих пор распространено среди многих российских экономистов. В данной статье автором перечисляются наиболее частые заблуждения относительно нового метода и опровержения этих убеждений, полученные из анализа литературы и практического применения данной системы.

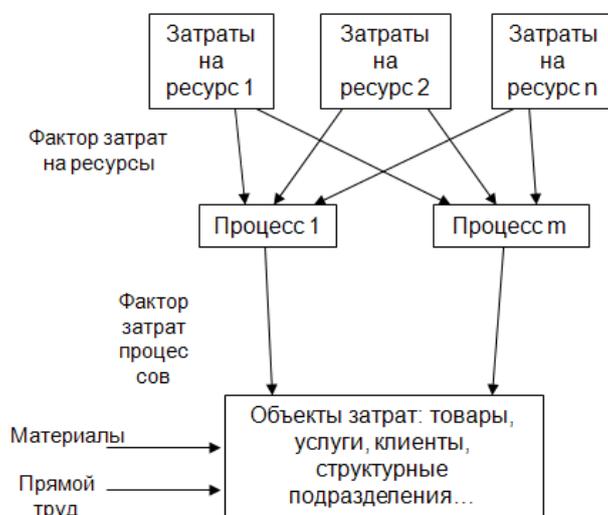


Рис. 2. Системы Activity-Based Costing

Прежде всего отметим, что в отличие от традиционных систем учета издержек, ABC-система решает следующие вопросы:

1. Выявляются функции, выполняемые ресурсами (персоналом и машинами) организации.

2. Осуществляется подсчет себестоимости организационных мероприятий и производственных процессов.

3. Выявляется необходимость в мероприятиях и производственных процессах.

4. Определяется объем деятельности каждого вида для производства продукции, оказания услуг, обслуживания клиентов [3].

Таким образом, с расширением сферы применения, система ABC наделяется функциями менеджмента.

Также заблуждением является представление о методе ABC как о непомерно трудоемком процессе, требующем значительных финансовых вложений. Для опровержения данного высказывания требуется описание процесса построения системы ABC (рис. 2).

При первом приближении, система ABC кажется похожей на традиционные системы калькуляции. Но внутренняя структура и основная идея значительно отличаются (табл. 1).

Таблица 1

**Сравнение построения традиционных методов калькулирования
и системы Activity-Based Costing**

№ п/п	Объект сравнения	Традиционные системы	Activity-Based Cost System
1	Исходные данные	Накладные расходы, разбитые по традиционным статьям калькулирования	Затраты на ресурсы (персонал, машины)
2	База распределения первого уровня	Фактор затрат на статью калькулирования	Фактор затрат на ресурсы
3	Пулы затрат	Производственные и вспомогательные подразделения (цехи)	Операции и состоящие из них процессы
4	База распределения второго уровня	Наиболее встречающиеся: - труд работников основного производства; - машино-часы; - прямые затраты.	Факторы затрат по операциям и процессам
5	Объекты затрат	Продукция, работы, услуги	Продукция, работы, услуги; клиенты, каналы сбыта; товарные партии, линии; структурные подразделения компании и другие
6	Точность итоговых значений	Невозможно определить	Варьируется в зависимости от детализации операций и процессов

Первоначально базу для системы ABC можно создавать с помощью общедоступного программного продукта Microsoft Excel, что снижает затраты на разработку в режиме обкатки. Переход на более дорогостоящие продукты необходим. Это связано с тем фактом, что системы ABC будут эффективными в случае их дискретного применения и систематического обновления. Затраты сопоставимы с текущими затратами на поддержание большинства распространенных на российских предприятиях программ для финансового и управленческого учета. Итоговой целью должна быть замена разрозненных управленческих и финансовых программ на систему ABC, являющейся единой базой данных предприятия, содержащей сведения экономического характера и позволяющей:

- 1) принимать тактические и стратегические управленческие решения;
- 2) вести финансовый учет и готовить отчетность;
- 3) готовить отчетность для внешних пользователей;

4) установить обратную связь между принимаемыми управленческими решениями и количеством использованных ресурсов для принятия данных решений.

Рассмотрим на конкретном примере построение системы ABC. Общество с ограниченной ответственностью «Премьер-Продукт» является итало-российской компанией оптовой торговли, имеющей представительства и филиалы во многих регионах Российской Федерации, и занимается реализацией на территории РФ парафармацевтической продукции средней ценовой категории, производимой на итальянских заводах партнеров. В связи с принятой в данной организации учетной политикой калькулирование осуществляется традиционным способом. Прямые затраты складываются из закупочной цены продукции; затраты, связанные с получением, складированием и сбытом товаров, классифицируются как накладные. Общая величина накладных расходов достигает 250 % прямых затрат. Как в большинстве российских компаний – управленческие решения здесь принимаются на основе данных, полученных из финансовой (бухгалтерской) системы.

За последние несколько лет рынок парафармацевтики и лекарственных препаратов претерпел значительные изменения, в связи с увеличением на рынке России иностранных компаний и новых товаров конкуренция ужесточилась. С другой стороны, изменяющееся российское законодательство и влияние другой сферы бизнеса – торговли продуктами питания – повлекли возникновение на рынке лекарственных препаратов такой формы сотрудничества между контрагентами, как подписание маркетинговых соглашений (оплата компанией-дистрибьютором «присутствие» своего товара в аптеках компании-покупателя). Принятие решения данного уровня требуют значительных финансовых затрат, что, в свою очередь, приводят к замене традиционных систем учета издержек более информативными.

Еще одним фактором, выступающим в пользу перехода на системы ABC, является вступление Российской Федерации во Всемирную торговую организацию (ВТО). В связи с обязательным условием снижения государством импортных пошлин, на российском рынке появится еще больше иностранных товаров и компаний, имеющих более совершенные инструменты управления и принятия стратегических решений. Изучение, апробация современных инструментов управленческого учета отечественными организациями в данных условиях должно носить превентивный характер.

Исходные данные для создания первоначальной системы ABC в ООО «Премьер-Продукт» (Нижегородский филиал) были взяты из стандартной финансовой отчетности компании. На начальном этапе предполагается определить объект затрат. Данный пункт определяется автором статьи как основополагающий, что связано с дальнейшим выбором перечня затрат, соответствующих определенному уровню в иерархии процессов. Например, традиционные системы рассматривают уровень единицы продукции, в системах ABC появляется возможность выделения затрат по следующим уровням:

- 1) единица продукции;
- 2) партия продукции;
- 3) поддержка товара (заказов);
- 4) поддержка торговой марки (клиента);
- 5) поддержка товарной линии (канала сбыта).

В данной работе объектом затрат была выбрана рентабельность отдельных клиентов компании (четвертый уровень иерархии затрат), условно разделенных на три типа: общероссийские (имеющие аптеки в нескольких регионах Российской Федерации), крупные нижегородские (более 20 аптек), средние и мелкие нижегородские аптечные сети.

На следующем этапе был определен перечень ресурсов организации для целей ABC (сотрудники и машины); это связано с тем, что все процессы (производственные, вспомогательные, управленческие и инновационные) выполняются сотрудниками фирмы или с помощью машин и оборудования. Таким образом, налаживается причинно-следственная связь между понесенными расходами и объемом выполненных процессов (операций). Распределение накладных расходов по ресурсам не представляет особых сложностей. Например, затра-

ты на аренду и коммунальные платежи складских помещений распределяются на сотрудников, являющихся работниками склада пропорционально отработанному ими времени, затраты на канцелярские принадлежности и оплату телефонных переговоров – пропорционально коэффициенту их потребления сотрудниками.

Выбор процессов и детализирующих их операций, является наиболее ответственным этапом в последовательном применении системы ABC, что связано с выбором между точностью подсчетов и трудоемкостью создания модели ABC. Автором был применен хронометраж рабочего времени сотрудников фирмы, что является одним из наиболее трудоемких, но достоверных методов как выявления протекающих в организации процессов, так и способов распределения затрат на ресурсы по процессам организации. Этап завершается созданием перечня процессов (рис. 3).



Рис. 3. Перечень процессов ООО «Премьер-Продукт»

Таблица 2

Перечень процессов и потребляемых ими ресурсов ООО «Премьер-Продукт»

№ п/п	Процесс	Описание процесса	Затраты ресурсов на процесс
1	2	3	4
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ:			
I. Маркетинг и продажи			
	1. Реклама товаров		
O11	<ul style="list-style-type: none"> Запрос рекламной продукции у поставщика 	Рекламная продукция (пробники, буклеты, пакеты, подарки) запрашивается у поставщика электронным письмом (при заказе товара) или по телефону. Затраты малы, можно не выделять из «Заказ ТМЦ у поставщика»	R11 (10 мин в месяц), R41 (5 мин. в месяц)
...	•
O19	<ul style="list-style-type: none"> Доставка пакетов с рекламой до клиентов 	Осуществляется вместе с доставкой товара клиентам	Затраты целесообразно учесть в операции «доставка товаров клиентам»
<p><i>Вывод:</i> O11, O15, O16, O19 – тяжело выделить из затрат на другие операции, связанные с получением заказов от поставщиков, формирование товара и его доставку клиентам.</p> <p>Оставшиеся операции (O12, O13, O14, O17, O18) следует объединить в один процесс: «Снабжение клиентов компании рекламной информацией».</p> <p>Затраты: R11 (2 ч 30 мин в неделю), R12 (1 ч в неделю), R31 (5%), R41 (75%), R42 (75%), R51 (10%), R52 (10%), R61 (% от R11, R12).</p>			

На рис. 3 отображены три типа протекающих в организации процессов: производственные, управленческие и вспомогательные. Каждый из них состоит из ряда подпроцессов – операций («реклама товаров»), которые, в свою очередь, подразделяются на детализирующие их операции нижнего уровня («запрос рекламной продукции у поставщиков») Фрагмент перечня производственных процессов представлен в табл. 2.

Для снижения информативной нагрузки на таблицу и с возможной целью кодировки управленческой информации каждой операции был присвоен идентификационный код (например, «O11» – «Запрос рекламной продукции у поставщика», «O19» – «Доставка пакетов рекламной продукции до клиента» и так далее). Затраты на ресурсы, распределяемые по операциям описаны также кодами (например, «R11» - «заработная плата руководителя подразделения»). После каждого пункта, отмеченного арабскими цифрами (в них перечисляются процессы высшего уровня, выявленные в первом приближении), изложены выводы отбора значимых процессов и расшифровка израсходованных накладных расходов, выраженных через отношение к ресурсам. Величина потребляемых ресурсов получается путем суммирования затрат на операции, входящие в данный процесс (то есть во втором приближении – более точном). Анализ информации, представленной в таком виде, дает возможность менеджерам принимать управленческие решения операционного уровня.

После проведенного предварительного анализа и принятия ряда решений по объединению части операций (критерием может служить процентное отношение затрат на операцию к затратам на процесс), была подготовлена сводная таблица, в которой на вновь созданный перечень процессов была отнесена стоимость ресурсов (через затрачиваемое ими время). Фрагмент такой таблицы представлен в табл. 3.

Таблица 3

Распределение затрат на ресурсы по процессам

№ п/п	Статья затрат	Шифр	Всего понесенных затрат	Процессы				Итого ресурса, отнесено на процессы, руб.
				Снабжение клиентов рекламной	Обработка заказов	...	ние ревизи на складе	
	1	2	3	4	5	...	15	16
1	Заработная плата					...		
	торгового представителя	11	91000	5987	31132	...	7184	91000
	Прочих работников	14	99000	-	-	...	-	99000

6	Арендная плата					...		
	Офис	61	15000	897	8077	...	-	15000
	Склад	62	24000	-	-	...	7082	24000
	Итого затрат отнесено на процесс, руб.			10330	80426	...	25651	414308

Полученные результаты дают возможность для дальнейшего анализа информации по стоимости протекающих в организации процессов. Примером может служить определение текущей рентабельности клиентов компании или распределение всех клиентов по себестоимости обслуживания. Для наглядности мы сравнили итоговые показатели рентабельности, полученные с помощью традиционного метода калькулирования и системы ABC (рис. 3).

Как видно из рис. 3, традиционные системы распределения накладных расходов приводят к усреднению показателя рентабельности отдельных клиентов, тем самым не предоставляя менеджерам компании экономического обоснования для принятия ряда управленческих решений (например, по предоставлению скидки, по заключению маркетингового соглашения, по прекращению сотрудничества и другие).

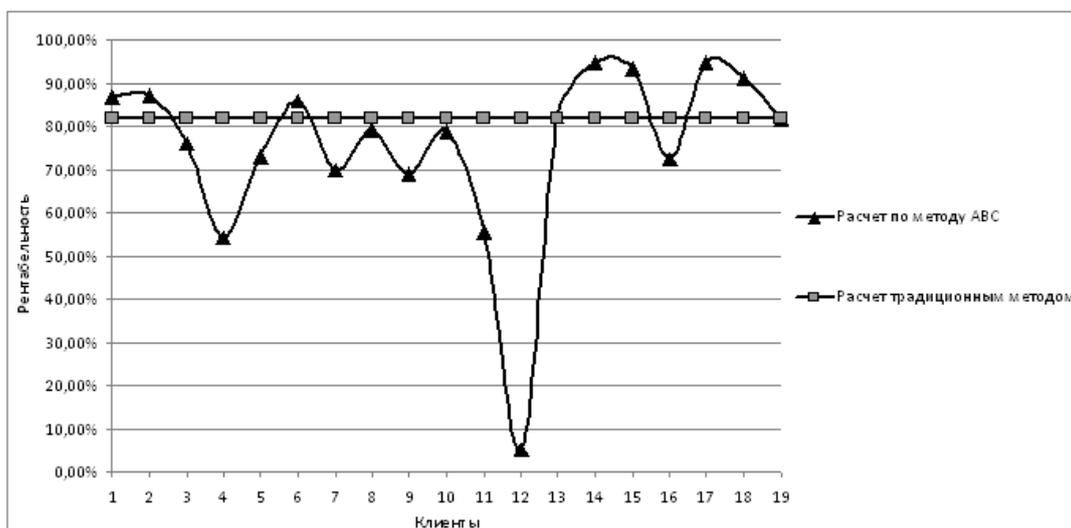


Рис. 3. Сравнение рентабельности клиентов, полученной с помощью системы ABC и традиционным методом калькулирования затрат

Таким образом, имея одинаковые начальные данные по затратам, мы получаем существенную разницу между значениями прибыльности, рассчитанными по традиционному подходу и с помощью системы ABC. Это вполне объяснимо: традиционным способом все расходы делятся по объектам пропорционально выручке от каждого клиента. Если заменить базу распределения, например, на количество центров издержек, то будут получаться иные значения рентабельности, но вероятность достижения точных результатов (или хотя бы приближенных к ним) ничтожно мала.

В свою очередь, система ABC, позволяя анализировать статьи затрат, их использование ресурсами и отнесение на процессы (например, при порче, простое оборудования и прочих нецелевых тратах), распределяет по объектам затрат (клиентам фирмы) только те издержки, которые действительно составляют ценность, о чем свидетельствует табл. 4.

Таблица 4

Сравнение затрат, отнесенных на клиентов системой ABC и традиционным методом калькулирования затрат

Клиент	Затраты (традиционный метод), руб.	Затраты (метод ABC), руб.	Отклонение, руб.	Процент отклонения
1	2	3	(4)=(2)-(3)	(5)=(4)/(3)* *100%
ООО «Аптека Народная»	80 108	58 756	21 352	36
ООО «Аптека 313»	71 001	50 836	20 164	40
«Нижегородская аптечная сеть»	49 155	65 380	-16 225	-25
НСА	477	1 210	-733	-61
...
ГП НО Нижегородская областная Фармация	28 397	8 258	20 139	244
ООО «Армос», «Наш Доктор», «Вита»	34 472	16 990	17 481	103
ООО «Вита +»	4 113	4 198	-85	-2
Итого отнесенных затрат	415 760	373 776		

Разница между значениями затрат, распределенных на объекты традиционным мето-

дом калькуляции и системой ABC, является суммарным выражением потерь от брака, порчи, простоев оборудования, нерациональным распределением должностных обязанностей между сотрудниками фирмы. При принятии решений высшим менеджментом по сокращению затрат (например, при общей убыточности деятельности) именно данные процессы должны быть проанализированы в первую очередь и приняты оперативные решения по устранению потерь от конкретных операций.

При применении традиционных систем под сокращение подпадают такие статьи, как заработная плата сотрудников и маркетинговые затраты, что является предпосылкой для возникновения более значительных проблем у компании в будущем.

Мы предлагаем следующую последовательность применения системы ABC:

1. Определить объект затрат.
2. Идентифицировать ресурсы организации (персонал, машины).
3. Провести хронометраж рабочего времени сотрудников (ресурсов).
4. Выявить дублирующиеся процессы (операции), простой в работе ресурсов.
5. Распределить накладные расходы на ресурсы на основе хронометража и с помощью ставок распределения.
6. Составить первоначальный перечень процессов и операций организации.
7. Распределить стоимость ресурсов на процессы и операции, исходя из времени участия ресурса в выполнении конкретного процесса.
8. Составить уточненный перечень процессов и операций (пулы затрат).
9. Выбрать базы распределения (факторы себестоимости, кост-драйверы) для каждого задействованного процесса.
10. Рассчитать коэффициенты распределения (ставки факторов себестоимости, кост-драйверов) для каждого процесса.
11. Отнести затраты процессов на конечный объект затрат.
12. Проанализировать полученные результаты и сделать выводы.

Activity-Based Cost System является не только современной системой калькулирования затрат, но и инструментом стратегического управленческого учета, наделенного элементами менеджмента. Значение возможных результатов применения на практике данной системы недооценены российским бизнесом, что связано с рядом таких барьеров, как накопленный опыт применения традиционных систем калькулирования, повышенное внимание внешних пользователей информации к показателям прибыли, отсутствие внутренних убеждений высшего менеджмента большинства отечественных компаний в необходимости перехода на новый уровень управления бизнесом.

Таким образом, одной из задач современной экономической науки является адаптация системы ABC к российским реалиям, а также донесение перспектив и преимуществ ее использования до конечных пользователей, то есть руководителей предприятий и высшего менеджмента.

Библиографический список

1. **Бьёрн, А.** Бизнес-процессы. Инструменты совершенствования: [пер. с англ. С.В. Ариничева] / науч. ред. Ю.П. Адлер. – М.: РИА «Стандарты и качество», 2007. – 272 с.
2. **Друри, К.** Управленческий и производственный учет: учебник / К. Друри. – М.: Юнити, 2010. – 1424 с.
3. **Каплан, Р.** Функционально-стоимостной анализ. Практическое применение: [пер. с англ.] / Р. Каплан, Р. Купер. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2008. – 352 с.
4. **Ковылкин, Д.Ю.** Методические аспекты оценки привлекательности видов экономической деятельности / Д.Ю. Ковылкин, А.Ф. Плеханова // Межотраслевой научно-практический журнал Интеграл. 2011. Вып. 4(60). С. 76–76.
5. **Корнилов, Д.А.** Разработка классификации видов планирования // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. Сер. Экономика и финансы / НГТУ. Н. Новгород. 2010. – С. 133.

6. **Узбекова, А.С.** Применение методов гармонического анализа в прогнозировании экономических процессов // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского. Сер. Экономика и финансы. Изд-во ННГУ, 2006. Вып. 2(9). С. 566.

*Дата поступления
в редакцию 30.06.2012*

A.A. Ivanov

ACTIVITY-BASED COSTING AS INFORMATION STORAGE AND ANALYZE SYSTEM FOR STRATEGIC MANAGERIAL DECISION MAKING

Premier-Product Ltd

Purpose: Improving methodological aspects of the cost accounting for the information base creation that will promote more reasonable strategic managerial decision making by business entities.

Methodology: Achieving the goal requires the work to build a progression to apply the causal model of the cost sharing - 'Activity-Based Cost System (ABC)'.

The results and their application area: The result of this study is a new progression of the ABC-system application building. The author established the necessity and the expediency of the Russian companies' transition from traditional calculation methods to ABC-system. There are the results of the ABC-system practical application when strategic managerial decision making in the article.

Conclusions: Russian management has a strong need for the latest adaptable instrument of the management accounting, that would meet the modern business requirements while strategic managerial decision making under the conditions of high business competition.

Key words: Activity-Based Cost System, cost calculation, traditional cost accounting system, target cost, cost sharing basis, cost driver rate.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 100.199

Ю.В. Смирнов

К ВОПРОСУ О РЕАЛИЗМЕ И ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИЯХ

Учебно-методический центр по гражданской обороне
и чрезвычайным ситуациям Нижегородской области

Анализируется понятие *реализма*, приобретающее в последнее время востребованность в отечественной философии как парадигма осмысления традиционных философских проблем, противоположная вошедшему в моду конструктивизму: соотношения знания и бытия, истины и знания о бытии.

Рассматриваются различные виды реализма в философии, в ходе анализа делается попытка целостного осмысления конструктивизма как философской программы и позиции.

Особое внимание уделяется рассмотрению оснований реализма, в особенности радикального, имеющего наибольшее выражение в философии и науке. Выделяются основные проблемы, с которыми сталкивается реализм в различных своих проявлениях при последовательной экспликации своих положений относительно соотношения знания и реальности.

Ключевые слова: реализм, неореализм, критический реализм, внутренний реализм, гипотетический реализм, животная вера, объективная реальность, субъект и объект познания.

Понятие *реализма*, столь важное для мировой философской мысли, не получило за всю историю своего толкования какой-либо однозначной трактовки. Эта ситуация может быть наглядно проиллюстрирована обращением к текстам философских энциклопедий, философов, отражающих наиболее общепринятые значения этого понятия. Так, согласно А.Л. Никифорову, реализм есть, прежде всего, научный реализм, характеризующийся признанием реального существования абстрактных объектов, постулируемых научными теориями. Одной из его основных черт является тезис, что «термины зрелой науки имеют референцию, поэтому задача реализма - установить такие правила установления референции, при которых фиксация объектов теории была бы истиной» [1, с. 721-722]. Чертами научного реализма является признание инвариантности, взаимодозначности терминов научных теорий и их приближительной истинности. Также утверждается, что «реализм есть адекватное отражение реальности, что, согласно авторам данной статьи, соответствует установке *наивного реализма*, по которой все предметы и явления этого мира суть таковы, как они нам представляются» [2, с. 342]. Как отмечает Н.С. Юлина, «смысл «научного реализма», собственно говоря, состоит в обосновании в противовес неопозитивистскому конвенционализму и инструментализму дескриптивистского, референциального, онтологического характера терминов науки» [3, с. 22-23]. Данная трактовка реализма является весьма узкой, поскольку не учитывает наличия философского и искусствоведческого реализмов, не столь сциентистски нагруженных.

Подобной трактовке противостоят как более широкие, так и более узкие. Так, согласно общераспространенной трактовке, *реализм* – это направление, признающее находящуюся вне сознания реальность, которая истолковывается либо как бытие идеальных объектов, либо как объект познания, не зависимый от субъекта. В исторических своих формах он получил свое бытие в естественно-научном материализме, теории отражения, позитивизме XIX века.

Однако здесь ни слова нет о наивном реализме, что опять же неоправданно сужает объем понятия «реализм». В философском словаре под редакцией И. Т. Фролова *реализм* сводится исключительно к направлению в искусстве и литературе [4, с. 406].

Наиболее фундаментальная и общепринятая трактовка отражена А. Л. Доброхотовым в Новой философской энциклопедии. *Реализм* трактуется как философское направление, признающее лежащую вне сознания реальность, которая истолковывается либо как бытие идеальных объектов, либо как объект познания, не зависящий от субъекта. Наиболее явными формами проявления были средневековый реализм и научный реализм XX века. Реализм не является внутренне однородным течением, поскольку в современной философии он представляется как *совокупность учений*, общая черта которых – признание реальности предмета познания, его независимости от сознания и актов познания субъекта [5, с. 427]. Признание объективности знания и его предмета связано с метафизическим противопоставлением субъекта и объекта познания в гносеологическом и онтологическом плане. Главным же отличием реализма от всех остальных учений является требование *адекватности* знания предмету познания [6, с. 427-428]. В качестве предварительного итога можно отметить, что внутри реализма существует противоречие между необходимостью быть единственно истинным отражением реальности и признанием *множественности* трактовок как самой реальности, так и самого реалистического учения.

В рамках трактовок предметного поля реалистической философии выделяются следующие подвиды научного реализма:

1. *Неореализм* или непосредственный реализм, признающий однородность субъекта и объекта познания в онтологическом плане, а также непосредственность получаемого знания о реальности.

2. *Критический реализм* или теория опосредованного знания, который признает однородность субъекта и объекта познания, но выступает против изначальной данности объекта субъекту познания. Для получения полного знания об объекте необходим посредник (метод), позволяющий отличать истину о нем от лжи, переносящий информацию от субъекта к объекту.

Так, в частности, *неореализм* утверждает, что внешние объекты не просто существуют независимо от субъекта, но и непосредственно даны ему в акте восприятия. Согласно теоретикам данного направления, анализ интенциональной природы сознания различает в нем психические акты и то, на что эти акты направлены. Другими словами, несомненно существование того, что противостоит сознанию как неподвластное ему. Можно отождествить позицию неореализма с позицией радикального эмпиризма, согласно которой объект без изъяснения открывается субъекту в акте непосредственного восприятия. Размежевываясь с абсолютным идеализмом, говорящим об идеальной, а не чувственной данности объекта, неореализм выступает против доктрины «внутренних отношений», согласно которой реальность объекта определяется сознанием, проникающим в связываемые им объекты, сущностно определяя их природу своей способностью к трансцендентальной апперцепции [5, с. 427]. Согласно Д. Муру, «невозможно сомневаться, что чувственно-данные вещи действительно существуют, несмотря на то, что некоторые философы (да и я сам в прошлом) употребляли этот термин в таких смыслах, которые действительно внушали сомнение в их существовании» [7, с. 130-154]. В данном случае Д. Мур выступает против тезиса солипсизма, утверждающего, что все факты суть восприятия, утверждая, что «нет достаточного основания предполагать, что они причинно зависят от каких-то ментальных фактов» (фактов сознания)» [7, с. 130-154]. Убежденность, что объект дан через чувственные восприятия принадлежит британскому неореалисту единственно возможной гипотезой, поскольку обратное доказать невозможно, ибо все попытки апеллировать к идеальной реальности за пределами чувственного заведут анализ в тупик.

Все, что мы видим, есть всего лишь чувственно-данное. Каким же образом мы можем удостовериться в существовании трехмерных физических объектов? Д. Мур отвечает, что мы не нуждаемся в доказательстве существования физических объектов, поскольку мы

уже знаем о нем. Он достоверно знает, как он пишет в статье «Защита здравого смысла», что мировоззрение здравого смысла истинно [7, с. 130-154]. Он знает, например, что существуют живые человеческие существа, с которыми он может общаться. Любой философ, пытающийся отрицать, что существует кто-либо, кроме него самого, предполагает, что другой человек существует, в самой попытке сообщить свое отрицание другому. Действительно, даже самое беглое упоминание о «мировоззрении здравого смысла» уже предполагает его истинность: это выражение не имеет смысла, если не существуют люди, придерживающиеся обших взглядов, т.е. если мировоззрение здравого смысла не является истинным.

Справедливо выступая против формализма абсолютного идеализма в отношении вещи как всецело определяемой актами сознания, неореализм сам впадает в ошибку эмпиризма, полагая, что акты сознания не оказывают никакого влияния на данность объекта, не изменяют природу познаваемых объектов, данных нам *непосредственно* [5, с. 427]. Таким образом, неореализм разделяет заблуждение наивного реализма, который склонен отождествлять объективную данность вещи с ее образом. Но что означает *непосредственная данность*: то, что объект дан нам, *как он есть*, в субъективном восприятии либо дан нам как образ (в соответствии с законами оптики, физиологией организма и избирательностью нашего зрения). Для того чтобы первый случай был верным, необходимо, чтобы объект был дан нам одновременно в своей пространственно-временной протяженности, во всех своих существенных и несущественных признаках, отношениях с другими объектами. Да и что может означать стремление определить предмет в рамках пространственно-временных координат, пусть даже и общезначимых, когда всякой подобной фиксации препятствует изменчивость сущего? Понятно, что такой объект, как *стол*, не может быть нам дан вот в таком смысле непосредственно, поэтому мы вправе говорить только об образе или понятии вещи, которые даны нам через их посредство. А понятия и образы, как известно, схватывают объект лишь частично, в наиболее существенных или важных для субъекта чертах, в «сжатом», а если мы говорим о субъективном образе, то в искаженном с точки зрения реализма виде. Причем не все объекты могут быть эмпирически созерцаемы, например, дома, в десятки раз большие человека, или потенциально бесконечный ряд объектов (к примеру, числовой ряд), однако разум человека способен не только дать понятие о таковых объектах, но и убедиться в истинности такового представления. Ошибка неореализма заключается в преувеличении чувственной составляющей нашего опыта о мире и недооценке способности разума к творческому воображению при познании реальности. Это возвращает нас к известной формуле Канта о том, что без чувственных данных наш опыт о мире пуст, но в то же время пассивное отражение потока феноменов не способно дать новое знание.

Другим парадоксом неореализма является провозглашение логического атомизма в качестве своей опоры [8]. Согласно данной доктрине, базовым объектом реалистического знания оказываются элементарные языковые и логико-математические сущности, которые не принадлежат ни идеальному, ни материальному миру, являясь нейтральными. Провозглашая, что природа реальности и материальна, и идеальна, реализм тем самым устраняется от ответа на вопрос, какова же реальность в своих фундаментальных свойствах. Провозглашая логические сущности базовыми элементами реальности, неореализм в то же время отвергает эпистемологию (а значит, и логику) как предварительную ступень ее познания. Объявляя же, что не только любые материальные, но и идеальные объекты обладают реальным статусом, неореализм подменяет свой же собственный онтологический дуализм гносеологическим монизмом, подразумевающим, однако, что любые идеальные объекты (сновидения, воображения, заблуждения) претендуют на равный с миром вещей статус и, по всей видимости, способны «содержать» его в себе. Данный тезис очень важен, поскольку означает, что субъект способен постигать реальность объектов своего опыта не только исходя из мира вещей, но и из себя, своей субъективности. Отвергая дополнительные по отношению к опытному познанию методы концептуализации объекта, неореализм вновь возвращается к необходимости их включения в порядок описания реальности.

С другой стороны, нельзя утверждать, что неореализм предполагает только способ познания реальности. Он немислим без предваряющей всякое постижение реальности онтологии, которая является основанием выбора того или иного метода ее постижения. Неореализм проецирует на бытие каркас сложной дедуктивной системы, постулируя, что мир есть система нейтральных элементов, входящих в иерархически разнящиеся по сложности физические и психические комплексы. В рамках данных комплексов сложное выводимо из простого, а простое из сложного. Однако может ли в рамках доктрины логического атомизма неореализм претендовать на постижение целого как универсалии сугубо эмпирическим путем? Думается, что нет, поскольку познание сложного как целого будет неизбежно приводить к необходимости опираться на дедуктивный метод и так далее, словом, на все, что позволяет реалистически достраивать не данный в ощущении и восприятии комплекс в рамках теории. Получается, что для постижения реальности познающий индивид вынужден трансцендировать за пределы чувственной данности и, полагаясь на правильное схватывание им базовой универсалии или комплекса, достраивать недоступные чувственному познанию уровни реальности.

Таким образом, при описании реальности неореализм сталкивается с противоречиями, исходя из которых он не может непосредственно познавать искомый объект. Конечный индивид, сталкиваясь с проблемой постижения бесконечной, не всегда данной в своей *предметности* реальности, вынужден формулировать априорные суждения, понятия об идеальных объектах, претендующих на схватывание истины бытия. Закономерен в данном случае вопрос о реальном или вымышленном статусе объектов мысли, и данный вопрос ставится в рамках неореализма. Однако разрешение его сколь радикально, столь и спорно, поскольку наделение объектов мысли и вещей равным реальным статусом ведет к размыванию базового для любого реализма понятия реальности. Именно данную слабость, попытку смешать восприятия и ощущения с понятием реальности, выявил критический реализм.

Критический реализм, являясь по названию течением, оппозиционным неореализму, сосредотачивает свое внимание на критике таких базовых положений неореализма, как имманентность актов сознания миру внешних предметов и отсутствие необходимости в наличии методического посредника между субъектом и объектом. Соглашаясь с суждением неореализма о существовании не зависимой от актов сознания реальности, представители данного направления настаивают на различении субъекта и объекта познания, а точнее, объекта знания и его субъективного образа. Критикуя неореализм за «естественную установку» и феноменализм, реализм критический настаивает на гносеологической и онтологической разнице между субъективно воспринимаемыми качествами и самим объектом, который эти качества вызывает. Согласно данной позиции, любое восприятие включает в себя *три составляющих*:

1. Сам акт сознания или акт восприятия;
2. Непосредственно данное или образ объекта, как он дан в восприятии;
3. Воспринимаемая субъектом вещь или объективное содержание восприятия [5, с. 427].

Таким образом, объекты не могут быть непосредственно даны в восприятии, но субъект воспринимает «данное» как посредник между субъектом и объектом. В акте познания субъект приобретает знание об объектах, а не о содержании собственного сознания. «Данное» является *знаком*, указывающим на существование объекта, который в некотором смысле этому объекту соответствует.

Получается, что критический реализм во многом воспроизводит классическую для атомизма Демокрита формулировку, согласно которой существует мир чувственно-воспринимаемых качеств и предметов самих по себе. Введение разницы между объективным содержанием восприятия и иллюзорным вряд ли спасет данную позицию от критики. Дело в том, что, отказывая ощущению и восприятию в онтологическом статусе их содержания, критический реализм раздваивает мир на две прямые – мир субъекта и объекта, которые практически не пересекаются. Это суждение фактически отрицает онтологический статус объективных содержаний восприятий, поскольку те являются неотъемлемой частью любого восприятия. Возникает проблема их атрибутирования, различения существенных и несущест-

ственных признаков объекта, проверки их на соответствие самому объекту описания. Поскольку объектов наблюдения бесконечно много, как и свойств, отношений, в которые они вступают, то невозможно обойтись без опоры на дополнительные языки описания, созданные субъектом, например, на научный метод.

Делая общее в вещах или математически исчислимым привилегированным объектом реалистического объяснения и описания, научный метод и обыденное сознание зачастую минуют проблематический вопрос о том, почему таковым не может считаться уникальное и индивидуальное, оставаясь в кругу нововременной рациональности. Данный анализ показывает, что любой таковой реализм отталкивается не всецело от фундаментальной реальности, а от господствующих интуиций и точек зрения на проблему бытия, помогающих субъекту абдуктивно трансцендировать от недифференцированно данной наглядности к фундаментальной реальности. Господствующее в рамках позитивистской парадигмы противопоставление чувственного знания рациональному, а также принижение статуса субъекта приводит к тому, что последний и мир его восприятий, оценок, смыслов оказывается замкнутым на самом себе, налагаясь на объект как нечто чуждое ему. Как в рамках критического реализма, так и неореализма, полностью отождествляющего субъект и объект, существует предпосылка радикального конструктивизма, согласно которой смысл привносится «в априори бессмысленный объект» [9, с. 132-144].

Можно привести еще целый ряд попыток определения понятия реализма. Так, в книге Я. Хакинга «Представление и вмешательство» приводится следующее определение понятия «реализм»: «научный реализм есть теория, согласно которой «объекты, состояния, процессы, описываемые правильными теориями, существуют» [10, с. 35]. Цель такового реализма – «открытие внутренней структуры вещей» в противовес антиреализму, который постулирует, что «мы вводим теоретические конструкты, чтобы объяснять события» [11, с. 35]. При этом американский философ отмечает, что «слово «реализм» указывает не только на множество философских коннотаций, но и обозначает ряд художественных направлений», а также, что в науке «реализм и антиреализм... скорее интеллектуальные движения, нежели сложившиеся доктрины» [10, с. 39-40]. Я. Хакинг выделяет следующие составляющие научного реализма:

- онтологическая: ложность/истинность теорий есть следствие состояния мира;
- причинная: если теории истинны, то ее термины обозначают объекты теории, которые являются причинами наблюдаемых явлений;
- эпистемологическая: у нас может быть обоснованная вера в теории и их объекты [11, с. 105-106].

Как попытку классификации реализмов можно выделить и концепцию другого американского философа Х. Патнэма, сторонника теории «внутреннего реализма». Данный интеллектуал отличает от своей философской позиции «метафизический реализм» с «экстерналистской перспективой относительно объектов и истины». Согласно этой теории, «мир состоит из некоторой фиксированной общности объектов, не зависящих от разума. Существует одно истинное описание того, каков мир» [10, с. 105-106]. В разряд такового метафизического реализма попадает докантовская метафизика и схожие с ней более поздние философские системы, претендующие на получение абсолютного знания о реальности в противовес мнимому. Х. Патнэм переосмысливает идеи реализма с позиций аналитической философии в интерналистском ключе, утверждая, что «вопрос о том, из каких объектов состоит мир, осмысленно задавать только внутри некоторой теории или дескрипции» [10, с. 105-106]. Это необходимо постольку, поскольку познающий субъект налагает порядок логически выстроенной теории на внешний мир, рассекая его устройство в соответствии с терминами и пропозициями теории. Опираясь на суждение представителей логического позитивизма о том, что выход за пределы языка невозможен, Х. Патнэм утверждает, что «истина – некоторый вид рационального восприятия, некоторая разновидность идеального соответствия наших представлений друг другу и нашему опыту в той мере, в какой опыт представим в нашей системе знания» [10, с. 105-106]. Объекты не существуют независимо от наших концептуальных схем, «мы разрезаем мир на объекты, когда вво-

дим тот или иной знак» [10, с. 105-106]. Поэтому Х. Патнэм заключает: «Поскольку объекты и знаки в равной степени являются внутренними для описательной схемы, можно сказать, что чему соответствует» [10, с. 105-106]. Истина для американского философа есть внутренняя адекватность теории, вещи интерпретируются тем реалистичнее, чем более они могут быть согласованы с внутренним порядком наших теорий и нашего разума. В то же время, с его точки зрения, не может существовать одновременно полная и непротиворечивая теория, репрезентирующая вещи и их порядок (т.е. реальность). Так что в отличие от метафизического реализма Х. Патнэм занимает более скептическую позицию. Сходной является позиция Д. Серла, Д. Розенберга, М. Хессе – представителей семантического реализма. Критика метафизического (представленной Р. Бойдом, У. Селларсом), а также физикалистского реализма (Д. Мур, Б. Рассел, М. Шлик) проводилась такими философами, как Н. Решер, Д. Уоррелл, сторонниками референциальной концепции истины [10, с. 105-106].

Скептицизм при анализе категории «реализм» характерен и для известного американского философа Д. Сантаяны. Он утверждает, что ни один язык, ни одна логика не могут быть правильными в смысле тождественности фактам, поэтому для него характерно то, что Э. Гуссерль назвал бы отказом от «естественной установки». Однако в отличие о феноменолога, Д. Сантаяна останавливается на скептицизме, утверждая, что познание и его базовые категории детерминированы телесной организацией человека, его инстинктами. Доводя философский скептицизм до логического завершения, американский интеллектуал отмечает, что последовательный скептицизм, утверждающий, что реальны лишь факты сознания вследствие их непосредственной данности самосознанию, должен усомниться и в их существовании. Они, как и вещи внешнего мира, тоже существуют во времени и поэтому не могут быть познаны ясно и отчетливо. Кроме того, суждение о том, что мысли и чувства суть наши мысли и чувства, означает, по мнению Д. Сантаяны, лишь предположение, веру в то, что они наши. Другими словами, именно «животная» вера человека превращает данные сознания в знание об объективном мире, без чего невозможно построение любой системы познания. Сохраняя, однако, понятие среды как стимула человеческого знания, Д. Сантаяна постулирует, что именно ее воздействие привело к росту человеческого знания, которое служило и служит в нем естественным ориентиром [11, с. 213].

Примерно в том же духе рассуждает и Г. Фоллмер, а также ряд философов, представителей «умеренного» (К. Поппер) или близкого к нему «предположительного» реализма» (А. Масгрейв). Г. Фоллмер выделяет *гипотетический реализм*, провозглашающий гипотетический характер всего познания. «Наличие не зависящего от сознания, закономерно структурированного и взаимосвязанного мира; частичная познаваемость и понимаемость этого мира посредством восприятия, мышления и интерсубъективной науки. По Г. Фоллмеру, «любой реализм делает утверждения как о существовании, так и познаваемости (не зависящего от сознания) внешнего мира, то есть представляет собой одновременно онтологическую и теоретико-познавательную позицию» [12, с. 21-22]. Он предлагает следующую классификацию:

Наивный реализм	Имеется реальный мир; он таков, каким мы его воспринимаем
Критический реализм	Имеется реальный мир; но он не во всех чертах таков, каким нам представляется
Строго критический реализм	Имеется реальный мир; однако, ни одна из его структур не является таковой, какой она представляется
Гипотетический реализм	Мы предполагаем, что имеется реальный мир, что он имеет определённые структуры, что эти структуры частично познаваемы, и проверяем, насколько состоятельна эта гипотеза

Согласно Г. Фоллмеру, гипотеза о реальности опирается на многочисленные аргументы. *Во-первых*, существует «психологическая очевидность, которая нас, наивно пережи-

вающих и действующих, непрестанно убеждает в фактическом наличии такого мира. Она вызывается, прежде всего, переживаниями сопротивления или боли, а также тем, что другие люди с той же самой самоочевидностью говорят о вещах в мире, как и мы» [12, с. 21-22].

Во-вторых, «человеческий язык в существенной степени является дескриптивным, и эти описания постоянно реалистичны: он описывает нечто - положение дел, которое может быть действительным или недействительным [12, с. 21-22].

В-третьих, «необходимо, чтобы наше исследование вообще имело смысл, предполагать реальное существование того, что мы собираемся исследовать. Без этой предпосылки исследователь отказался бы от поисков новых явлений и законов, так как то, что ищется, должно предполагаться как существующее» [12, с. 21-22].

В-четвертых, «совершенно различные структуры служат организму для успешного взаимодействия с объективными данностями окружающего мира» [12, с. 21-22]. Из изложенного можно сделать вывод, что реализм в представлениях рассмотренных ранее философов предполагает не просто теорию, которая дает истинное представление о реальности без участия субъекта, но теоретическую и мировоззренческую установку, которая не может осуществляться помимо субъекта, производящего вероятностные умозаключения о причинно-следственных связях в действительности, верящего в их всевременность и наличность в объекте, существующем до всякого познания.

Попробуем отобразить важнейшие черты реалистической философии и методологии, отталкиваясь от упомянутых точек зрения на интересующую нас проблему. Не существует никакого фундаментального понятия реализма, которое было бы строго и последовательно прописано. Как говорит В. Н. Порус, последний термин имеет почтенную историю, «восходящую к античности и средневековой схоластике», который, «тем не менее, не имеет однозначного и общепринятого смысла; обычно он применяется по отношению к философским теориям, признающим объективное существование «реальности», понимаемой либо как бытие идеальных объектов (Платон, средневековый реализм), либо как объект познания, независимый от субъекта, познавательного процесса и опыта» [13, с. 60]. Оно оказывается исторически изменчивым, становящимся, начиная с философского реализма и вплоть до наших дней, будучи своеобразным «гнездом смыслов». Да и как может понятие *реальности* быть общезначимым, когда само его определение уже требует «преждевременной» ссылки на исходную реальность, которая уже заранее, до всякого определения, «дана» интеллектуалу и выступает как внедискурсивное онтологическое основание следующей далее дефиниции. Поэтому всякое одновременно непротиворечивое и полное определение реальности вряд ли возможно, так как оно упирается в порочный круг. Ибо, что такое *реальность*, что такое «типические черты» как понятия, столь важные для выстраивания реалистического дискурса, реализм не объясняет. Да и объяснимы ли эти понятия, часть которых является последними, через род и видовое отличие, перечисление признаков и т.д. Но разве это означает, что они интенционально пусты, бессодержательны? Ведь каждое из этих понятий стремится к тому, чтобы в себе отразить те или иные черты реальности, высказать нечто о содержании понятия, его объекта. Вопрос заключается в том, насколько осознанно или неосознанно схватывается смысл этих понятий, развертывающих перед собой то или иное поле *предметности*. И откуда он схватывается? Возможно, это интуиция, которая недискурсивно «слышит» голос самого бытия в его многоликости? Не потому ли оно является интенционально наполненным, поскольку «истинное бытие, выражающее идею реальности, есть ценностное бытие» [14, с. 9]. То есть, реальность есть то, что и наиболее ценно для субъекта.

Всякое познание, именуемое себя реалистическим, начинается с того, что познающий субъект отличает себя от недифференцированно данной ему в обыденном опыте действительности, задаваясь вопросом о том, насколько картина мира, данная ему посредством элементарных познавательных средств, адекватна этому миру. Однако, пытаясь разрешить эту проблему, познающий субъект, будучи конечным общественно-историческим индивидуом, сталкивается с потенциально бесконечной во времени и пространстве реальностью, не полностью данной ему в ощущении и восприятии. Но для разрешения познавательной задачи

необходимо указание таких ее атрибутов, принципов существования, которые и делают реальность устойчивой и неизменной в основных чертах.

Данная проблема разрешается в реализме следующим образом. *Во-первых*, ставится и разрешается в рамках бинарной оппозиции проблема разграничения вымышленного и реального (ложного / истинного), причем в рамках господствующей онтогносеологии той или иной исторической культуры. *Во-вторых*, после выполненного разграничения всякий реализм фиксирует ту или иную часть сущего в качестве достоверной реальности: так позитивистский реализм идентифицирует реальность с опытно познаваемыми явлениями, материализм – с данным через ощущения внешним по отношению к субъекту миром материи и т.д. Однако даже самый наивный позитивистский натурализм, не говоря уже о более фундаментальных концепциях (например, **критический**, **гипотетический** реализм и так далее), сводя реальность к множеству явлений, имплицитно вынужден толковать частный опыт как проявление всеобщего, поскольку сам язык наблюдения состоит из общих понятий. Поэтому даже наивный реализм, к которому позитивизм близок, неизбежно переносит частные наблюдения на фундаментальную реальность в целом, сталкиваясь с проблемой истолкования частного знания.

Возникновение проблемы реальности и реализма неизбежно приводит к делению на субъект и объект познания. Это приводит к следующей проблеме: как достигнуть чистого, не вымышленного субъектом знания, в то время как субъект и внешний мир разграничиваются по принципу **конечный / бесконечный** и **постоянный / изменчивый**. Однако, несмотря на утверждаемую разницу между субъектом и объектом, реализм все равно вынужден постулировать, что существует некая инвариантная, единственно истинная теория, которая способна дать ответ на вопрос о том, что такое реальность. Начиная с противопоставления реальности и субъекта как объекта и субъекта познания, реализм заканчивает прямо противоположным тезисом о том, что существуют теории, структуры которых в той или иной степени совпадают с познаваемой реальностью. Однако эта степень может варьироваться: на одном полюсе будет находиться **наивный реализм**, постулирующий, что нет никакой разницы между тем, что дано познавательными структурами, и реальностью, на другом – **строго критический реализм**, который говорит о практическом отсутствии изоморфности между фактом и теорией. Всякий рефлектирующий над своими основаниями реализм склонен считать свое знание о бытии сущего неполным логически и семантически, вследствие чего вынужден полагаться на неverified суждения, социокультурный исторический опыт и так далее – все, что помогает концептуализировать реальность в ее существенных чертах, основах.

Выходит, что реализм есть не просто метод описания бытия, который предполагает адекватное его отображение во всех фундаментальных свойствах, но склонен к трансцендированию за пределы чувственной данности. Базируясь на противопоставлении конечного индивида и бесконечного мира, реализм предполагает критику обыденного сознания, считающего мир уже данным в изначальном восприятии, и идеализма, полагающего, что предмет не дан мышлению, а задан им. Критикуя субъективизм и неполноту чувственного познания, беря на вооружение только общезначимый метод, реализм, тем не менее, сталкивается с проблемой доскональной атрибуции реальности, не будучи способным окончательно преодолеть пропасть между субъективным восприятием, опытом и самодостаточной реальностью. Данный момент приводит к существованию многочисленных разновидностей реализма (которые будут также нами рассмотрены), предлагающих различные подходы к определению реальности и методы ее постижения. Это заставляет познающий субъект опираться на «дополнительные языки описания», помогающие достроить не данную в наглядном представлении реальность.

Библиографический список

1. **Никифоров, А. Л.** Реализм // *Философский энциклопедический словарь* / под ред. А. А. Ивина. – М.: Гардарики, 2006. – 722 с.
2. *Философский словарь*: [пер. с нем. М. М. Беляева] / под ред. Г. Шишкоффа; общ. ред. В. А. Малинина. – М.: Республика, 2003. – 842 с.

3. Юлина, Н.С. О буржуазной философии 60-70-х годов // Проблемы и противоречия буржуазной философии 60-70-х годов XX в. – М., 1982. С. 22–23.
4. Философский словарь / под ред. И. Т. Фролова. – 7-е изд. – М.: Республика, 2001. – 722 с.
5. Доброхотов, А.Л. Реализм // Новая философская энциклопедия. – М.: Наука, 2002. – 1054 с.
6. Шахов, В. Ю. Реализм как общая основа религиозного и научного знания // Вопросы философии. 2008. №10. С. 32.
7. Мур, Д. Защита здравого смысла // Аналитическая философия: Становление и развитие (антология). – М., 1998.
8. Рассел, Б. Избранные труды: [пер. с англ. В.В. Целищева, В.А.Суровцева] / Б. Рассел. – М.: Идея-Пресс, 2007. – 260 с.
9. Фатенков, А. Н. Реализм против конструктивизма и теории отражения в предметном поле исторического познания // Диалог мировоззрений: коллективная социально-историческая память и вызовы современности: программные и рабочие материалы X международной конференции, 27-29 мая 2009 г.; под ред А.В. Дахина. – Нижний Новгород: Издательство ВВАГС, 2009. С. 132–144.
10. Хакинг, Ян. Представление и вмешательство / Ян Хакинг. – М.: Логос, 1998. – 148 с.
11. Зотов, А.Ф. Современная западная философия / А. Ф. Зотов, Ю. К. Мельвиль. – М.: Проспект, ТК Велби, 1998. – 432 с.
12. Фоллмер, Г. Эволюционная теория познания: врождённые структуры познания в контексте биологии, психологии, лингвистики, философии и теории науки: [пер. с нем. А. В. Кезина] / Г. Фоллмер. – М.: Наука, 1998. – 751 с.
13. Порус, В.Н. «Научный реализм» и развитие научного знания // Современная аналитическая философия. – М., 1988. № 1. С. 60.
14. Замалеев, А. Ф. Десять тезисов о философии реализма // Философия реализма: из истории русской мысли: сб. статей / под ред. А. Ф. Замалеева. – СПб.: Изд-во С.-Пб. университета, 1997. С. 9.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

Y. V. Smirnov

THE NOTION OF REALISM AND ITS INTERPRETATION

Training Centre for Civil Defense and Emergency Situations of Nizhny Novgorod Region

Subject, theme, purpose of the work: The notion of realism as a way of understanding of being, the types of realism in philosophical knowledge.

The purpose is to analyze the concept of "realism" in philosophy, namely:

1. Clarification of the concept of «realism».
2. Identification of the specific descriptions of realistic philosophy.
3. Identification of the main features of realism.

Methodology: The methodology is based on the dialectic paradigm of acts, supplemented by hermeneutic approaches.

The results and their range of application: In this paper we analyzed the concept of «realism» which is important for philosophical knowledge and methodology of science, namely:

1. Clarified the concept of «realism" in a methodological perspective».
2. The general and specific features of various versions of realism in philosophy.
3. Identified as the archetype of a realistic description of being through its conceptual «completion».

Value: Content article can be used in the preparation of lectures, seminars and tutorials at the rate of general philosophy, epistemology, philosophy and methodology of science.

Conclusions: Assuming that realism is a universally valid method, we can face the problem of thorough attribution of reality, so it is impossible to investigate objective reality in terms of knowing subject who possesses a limited perception of space and time. This point leads to the existence of numerous varieties of realism, offering different approaches to the definition of reality and methods for its attainment. This makes the knowing subject to investigate reality basing on the «additional description languages».

Key words: Realism, neo-realism, critical realism, internal realism, speculative realism, animal faith, objective reality, subject and object of knowledge.

УДК 159.001

Л.А. Шестакова

**ПСИХОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УПРАВЛЕНИЯ
СОЦИАЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМИ СИСТЕМАМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются психологические и педагогические аспекты обеспечения учебного процесса в инженерно-технических образовательных системах и вузах. Инженерно-технические вузы в современной России нуждаются в психологическом и педагогическом обеспечении учебного процесса. Это связано с современным состоянием производства и с теми производственными задачами, которые перед ним стоят.

Ключевые слова: управление, психология, социально-технические системы, образовательные системы, педагогика, образовательные технологии.

Психологические аспекты управления современными социально-техническими образовательными системами отличаются большим разнообразием. Системное социально-техническое взаимодействие базируется на отношении «человек-техника» и оказывается сегодня востребованным во всех областях жизни, в том числе, в сфере науки и образования. Человеческий и технологический фактор активно взаимодействуют между собой, проникая друг в друга, и оказываются взаимосвязанными на всех уровнях. К современным социально-техническим образовательным системам можно отнести все современные образовательные организации и предприятия, деятельность которых регулируется законодательными актами РФ. К ним сегодня относятся дошкольные учреждения, школы, средние специальные учебные заведения, вузы, учреждения послевузовского образования и т.д., оснащенные техническими средствами обучения. Техническое оснащение образовательных учреждений необходимо для обеспечения современного учебно-воспитательного процесса и направлено на формирование и развитие учебно-воспитательной деятельности различных профилей.

Общественная образовательная деятельность детерминирована включенностью человека в объективно существующие и технически организованные образовательные и воспитательные процессы [1-6]. Организация образовательных социально-технических систем неизбежно несет в себе все личностные особенности участников учебно-воспитательных процессов и порождает своеобразный, обусловленный личностными особенностями характер мотивации этой деятельности. Психология управления современными социально-техническими образовательными системами органично включается в целостный процесс их функционирования. Как любая человеческая деятельность, управление современными социально-техническими образовательными системами и действия, входящие в ее состав, служат для удовлетворения как общественных, так и личных потребностей человека. Ключевым психологическим моментом этого вида деятельности является выстраивание особых отношений между мотивами и целью этой деятельности.

В русле управления образовательными социально-техническими системами представляется необходимым выявить их организационные и технологические аспекты [2]. С точки зрения организации процесса управления социально-техническими образовательными системами можно выделить следующие их организационно-технологические аспекты:

1) технологический аспект, который отражает уровень развития конкретного образовательного учреждения, особенности используемых в нем техники и технологии, учебно-воспитательные условия;

2) организационно-экономический и правовой аспекты, которые содержат вопросы, связанные с организацией учебно-воспитательного процесса, планированием численности и состава работающих преподавателей и воспитателей, моральным и материальным их стимулированием;

3) социально-психологический и управленческий аспекты, которые включают в себя социологическое и психологическое обеспечение учебно-воспитательного процесса, вопросы работы с обучающим персоналом, социопсихологическую практику кадровой работы;

4) собственно воспитательно-педагогический аспект предполагает решение вопросов, связанных с обучением и развитием преподавательского и ученического коллективов, реализацией определенного комплекса их потребностей и их профессиональным и личностным развитием.

Взаимодействие названных аспектов управления образовательными социально-техническими системами происходит на всех их уровнях. При взаимодействии этих аспектов с психологической точки зрения получается следующее. В специализированную образовательную социально-техническую и технологическую функциональность включаются особые психологические стратегии поведения человека. Эти психологические, социальные (общественные) и личностные стратегии поведения в образовательных социально-технических системах обладают целым набором свойств и средств. Так, с позиций психологического обеспечения в любой образовательной социально-технической системе проявляются определенные противоречия. С одной стороны, системная технологическая организация учебно-воспитательного процесса с позиций его технического и технологического обеспечения требует от человека понимания общих образовательных стратегических целей, участия в целостном процессе и выполнения, таким образом, общественных задач. Преподаватель любого уровня решает в этом процессе, прежде всего, задачи общего образования и воспитания. Он, например, взаимодействует с учащимися по принципу «я тебя научу этому всеми доступными методами». С другой стороны, от человека требуется выполнение специализированных функций, которые базируются на реализации его собственных целей — человеческих личностных потребностей. Преподаватель и воспитанник вступают в сложную систему личностных взаимодействий. Они исследуют и оценивают друг друга, выбирая стратегию взаимодействия, но при этом постоянно продвигаются к своим собственным, личностным целям. Участниками образовательно-воспитательного процесса выбирается каждый раз новая, а нередко и уникальная стратегия взаимодействия. При этом участниками взаимодействия используются как методы, которые развивают их способности к профессиональному и личностному росту, так и методы замедления и торможения этого роста.

Процесс управления образовательными социально-техническими системами сводится к воспроизводству функций образовательного производства, регулированию их количества, качества и последовательности в общем процессе образовательной деятельности. То есть, с позиций психологии управления, с одной стороны, мы имеем четко организованную управляемую образовательную социально-техническую систему с набором однотипных и воспроизводимых технологических операций, обеспеченных психологической установкой на включение человека в эту систему. А с другой стороны - налицо процесс личностного достижения цели конкретным человеком, включенным в определенные производственные отношения и выполняющим определенные общественно необходимые функции. Последний процесс оказывается настолько психологически качественно сложным, что превращает относительно простые функциональные отношения типа «оператор-машина» в многомерные взаимодействия типа «человек-машина-человек», то есть - в сложно организованную психологическую систему личностных взаимодействий, далеко выходящую за рамки взаимодействий собственно функциональных. Любой современный высокотехнологический процесс управления образовательной социально-технической системой – это процесс, где технологические взаимодействия подчиняются, а иногда даже и замещаются личностными взаимодействиями.

Выступая в качестве организатора или исполнителя социально-технического проекта, организатор образовательного процесса имеет дело со сложно организованной системой исполнительства, в которой техника выполняет свои функции, а люди стремятся к достижению своих личностных целей. При этом, с психологической точки зрения, ограниченная, функциональная, структурная, строго нормированная деятельность человека провоцирует постоян-

ное усиление контроля со стороны руководства за этой деятельностью, за функционированием, как техники, так и людей. Руководитель образовательного процесса ищет новые и новые возможности контролировать исполнителей и руководителей подчиненных подразделений. Он вынужден постоянно участвовать в производственных совещаниях разного уровня, работать с руководителями разных подразделений, контролировать каждый шаг членов своего коллектива, понимая, что при уменьшении контроля с его стороны коллектив немедленно «перестанет работать». Такая организация системы управления требует бесконечного контроля и улучшения, Однако парадокс состоит в том, что желаемого результата может и не быть вовсе. Сам руководитель и исполнители всех уровней будут выполнять определенные образовательные и производственные функции, а психологически лишь отрабатывать заработную плату. Они будут работать, возможно, более или менее качественно, но при этом, не считаясь с необходимостью развития данной образовательной социально-технической системы и не заботясь об общественной пользе результатов своего труда. С другой стороны, социальные личностные позиции и функции бесконечно разнообразят психологические процессы взаимодействия в образовательных социально-технических системах [3]. Они отличаются разнообразием форм и содержания, регулируют обширную систему социально-технических взаимодействий, - всей системы воспитания, обучения, воспроизводства и реализации общественно необходимых знаний, умений и навыков.

Технологическая организация процесса управления образовательными структурами без учета личностно-ориентированных мотивов человеческой деятельности реально обеспечивает параметры своей структуры, технологические средства производства и его обеспечения, технические средства реализации продукции. Казалось бы, обеспечив школу компьютерным центром, средствами связи, коммутаторами, телефонами, факсами и всеми необходимыми техническими средствами обеспечения, можно говорить об установлении системы должного контроля и управления в коллективе. Однако там, где результат деятельности начинает зависеть не только от технологических механизмов этой деятельности, а и от психологических человеческих параметров, он перестает быть не только гарантированным, но и просто предсказуемым. Каждый участник управления образовательным процессом, выполняя определенные производственные функции, параллельно работает на выполнение своих собственных целей и потребностей, которые не всегда и практически нигде не фиксируются, кроме сознания самого человека. Понять эту сложную систему взаимосвязанных мотиваций нередко не в состоянии не только руководитель или коллеги этого человека, но даже его близкие родственники или он сам. Конечно, не следует считать, что для понимания данной ситуации всегда необходима помощь специалиста-психолога. Большинство людей осознают свои собственные потребности и цели. Но, тем не менее, роль такого специалиста в процессе управления образовательными социально-техническими системами представляется достаточно важной.

Таким образом, выявляется следующая закономерность. Чем более прямая и линейная взаимосвязанность технологических параметров образовательной социально-технической системы выстраивается, тем она более надежно и оптимально функционирует и прогнозируется, то есть чем меньше роль человеческого фактора в процессах деятельности, тем они надежнее и более управляемы. Но при появлении социального обеспечения этих процессов, включении в них возможно большего числа руководителей подразделений и исполнителей, то есть увеличении количественного и качественного состава коллектива образовательного учреждения, надежность и управляемость его падает, но они получают новое и качественное развитие. Личностное же взаимодействие превращает всю образовательную социально-техническую систему в сложно организованную систему личностных взаимодействий. При этом она далеко выходит за рамки взаимодействий собственно функциональных, а становится действительно личностным взаимодействием людей с помощью технических средств. Коллективы, во многом стихийно складывающиеся на рынке образовательных услуг, начинают регулироваться сложными диффузными механизмами. Плановая деятельность по

управлению процессом предоставления образовательных услуг с помощью технических средств обеспечения этих процессов сложно сочетается со всем многообразием личностных мотиваций участников этого процесса. Сложные и многомерные личностно-производственные взаимодействия протягиваются и за пределы самого учреждения, и за пределы времени производственного общения сотрудников. Они могут проявить себя и гораздо позже при взаимодействии сотрудников уже в другом образовательном учреждении или организации, при личностном взаимодействии на других производственных площадках или вообще в других условиях. При этом наблюдается следующая закономерность. Если личностные отношения в производственном процессе складывались успешно, само производство развивалось, конфликты были конструктивными, а люди раскрывали свой профессиональный и личностный потенциал достаточно полно, и в дальнейшем эти связи становятся крепкими и протягиваются через годы и расстояния без особых изменений. Если даже личностные мотивации и цели через какое-то количество времени у этих людей меняются, они по-прежнему готовы помочь друг другу и могут даже рекомендовать друг друга для работы в любом другом образовательном учреждении, если это необходимо. При этом объективность их оценки друг друга со временем повышается. Что касается технического обеспечения этих психологических процессов, то это техническое обеспечение в них занимает подчиненное положение и полностью зависит от производственных или личностных целей участников такого взаимодействия. Очевидно, однако, что технические способы взаимодействия людей определенным образом влияют на их отношения. Так, если люди привыкают взаимодействовать по телефону, по электронной почте или в письменной форме, то неизбежно, позже они будут общаться именно таким способом. Исключение составляют сложные и глубокие личностные взаимодействия, которые базируются на личностных контактах. В таком случае, все технические средства обеспечения связи будут восприниматься как частные, и не всегда адекватные заменители такого общения.

Таким образом, только соединив производственную функцию с процессами реализации личностных потребностей человека, можно говорить об оптимальном психологическом управлении и функционировании всей образовательной социально-технической системы, об организации общей системы образовательной социально-технической деятельности, необходимой для личностного роста человека, то есть для его постоянного развития и реализации всего комплекса его потребностей.

Психолого-педагогическое обеспечение учебного процесса инженерно-технических вузов регламентируется государственными образовательными стандартами Российской Федерации и включается в общую систему организации и управления учебного процесса. Основой психолого-педагогического обеспечения учебного процесса инженерно-технических вузов является сложная система взаимодействия людей – участников инженерно-технического производственного процесса. Особенно важным здесь является психолого-педагогический процесс становления и развития инженерно-технического сознания студента как будущего участника инженерно-технического целостного производства и различных производственных процессов. Феномен инженерно-технической деятельности определяется особенностями деятельности производственной. Инженер по роду своей деятельности включается в объективно существующие трудовые процессы, а значит – в социальное многоуровневое производственное взаимодействие. При этом в инженерно-технической деятельности особое значение имеет социально-производственное взаимодействие между людьми, в котором каждый человек проявляет себя как зрелая, самостоятельная, творчески мыслящая личность.

Психолого-педагогические особенности учебной деятельности инженерно-технических вузов состоят в том, что в процессе производственной деятельности результат каждого отдельного действия осознается и переживается каждым участником производственного проекта по-разному: как средство, как цель, как частичная цель или как промежуточное средство для достижения результата. Так, мелкие задачи и преследование частных целей каждым членом инженерно-технического коллектива, превращаясь для него в самоцель, могут привести к измельча-

нию самой его деятельности, что неизбежно сказывается на качестве его работы. Однако этого можно избежать, если каждый человек и весь инженерно-технический коллектив постоянно видят перед собой крупные задачи, которые вбирают в себя все частные задачи, и главную цель, которой все они подчиняются. Целеустремленная деятельность, осознание перспективы развития, общий положительный эмоциональный настрой всего инженерно-технического коллектива и каждого его члена, - все это позволяет создать созидательный, творческий наполненный новый психологический контекст, в котором становится возможным решение любых производственных задач. Создание такого общего широкого и полного психологического контекста позволяет по-новому будущему специалисту осознать смыслы и внутреннее содержание инженерно-технической производственной деятельности и добиться наилучших ее результатов.

Учебный процесс в технических вузах с психолого-педагогической точки зрения можно условно разделить на три основных направления: профессиональное, личностное, творческое (креативное). Все эти три направления основаны на развивающем принципе. Для современного инженера важно быть состоявшимся профессионалом в своей области, реализовавшей себя личностью и творчески развивающимся индивидом, способным к многосторонней креативной деятельности. Идеальным в этом процессе является совпадение личностных и общественных целей. При этом человек может даже выполнять задачи и не связанные непосредственно с решением данной проблемы, однако наличие общей цели любую его деятельность в коллективе делает личностно и общественно значимой и целенаправленной.

Одной из наиболее сложных задач психолого-педагогического обеспечения учебного процесса инженерно-технических вузов является вопрос о мотивах инженерно-технической деятельности. Мотивы инженерно-технической деятельности, как осознанное побуждение для определенного действия, складываются под влиянием ее целей и задач. В свою очередь, сами цели и задачи инженерно-технической деятельности определяются ее мотивами. Мотивы для данной деятельности заключаются, прежде всего, в самом отношении к цели, задачам и условиям, при которых протекает эта деятельность.

Мотивация формируется по мере того, как человек учитывает, оценивает, применяет к себе обстоятельства, в которых он находится, и осознает цель, которая встает перед ним. Из этого сложного конгломерата отношений рождается мотив, его конкретное содержание, которое и становится основой для реального жизненного действия. Мотив, как побуждающий источник действия, проходит несколько стадий формирования.

Мотивация инженерно-технического коллектива и каждого его члена, как важнейшая составляющая деятельности, является предметом постоянного пристального внимания со стороны руководителей всех уровней. Включаясь в процесс инженерно-технической деятельности, человек учитывает и оценивает те обстоятельства, в которых он находится, и осознает цель, которая встает перед ним. Из отношения к ним и рождаются мотивы его конкретной деятельности, необходимой для реального жизненного действия. Сформировавшийся мотив является источником действий человека, но, чтобы стать мотивом инженерно-технической деятельности, он сам должен сформироваться определенным образом.

Логика инженерно-технической деятельности состоит в том, что личностные мотивы в ней нередко отступают на второй план в силу их несущественности, в то время как общественные оказываются наиболее существенными. При этом действует следующая психологическая закономерность – чем более интересными, захватывающими, перспективными являются объективные цели и задачи, стоящие перед коллективом, тем менее существенными становятся личностные мотивы каждого члена этого коллектива. И напротив, если главными становятся личностные цели и задачи, перспективы развития инженерно-технического проекта сужаются до определенных пределов. Идеальным в инженерно-технической деятельности можно считать органическое единство общественных и личностных мотивов.

Мотив инженерно-технической деятельности может переместиться как на саму эту деятельность, так и на один из ее результатов. В последнем случае побочный результат действий субъективно становится для человека целью его действий. Так, выполняя то или иное инженер-

но-техническое задание, он может видеть свою цель не в том, чтобы сделать именно данное действие, а чтобы посредством этого проявить себя. С этих позиций наличие деятельности, выходящих за пределы прямых целей человека, неизбежно и правомерно. В другой стороны, любая инженерно-техническая деятельность имеет, помимо непосредственного результата в виде определенного продукта, еще и какой-то общественный эффект: через это он воздействует на людей. Поэтому у человека, как правило, в личностную деятельность вплетается социальный мотив – стремление выполнить свои обязательства и проявить себя, заслужив общественное признание [1]. В процессе управления инженерно-технической деятельностью большую роль играет оценка результатов этой деятельности, посредством которой во многом осуществляется воздействие на личностную инновационную деятельность. Оценка инженерно-технической деятельности, которая может быть как положительной, так и отрицательной, приобретает особое значение во взаимоотношениях в коллективе, выполняющем инженерно-технический проект. Вся инженерно-техническая деятельность коллектива и отдельного его члена неизбежно зависит от оценочных моментов. Оценка выражается в речевых интонациях сотрудников, в том, как начальник ведет себя с подчиненными, как подчиненные взаимодействуют между собой. При этом как положительная, так и отрицательная оценка может оказать благотворное действие, если она обоснована и мотивирована. Субъективное, эмоциональное влияние оценки деятельности, которое она оказывает на последующее развитие этой деятельности, огромно. Характерно, что независимо от того, кто эту оценку делает, она неизбежно влияет на результат деятельности [2]. Поскольку человек – существо сознательное, он дает и предвидит оценку, оценка влияет, воздействует на его деятельность, направляя ее в ту или иную сторону, повышая или снижая ее уровень. Однако оценка все же совершается на основании результата деятельности: ее достижений или провалов, достоинств или недостатков, и поэтому она должна быть результатом, а не целью деятельности. Там, где оценка становится самостоятельной целью, где существует установка только на оценивание, человек идет, как бы минуя цель самого действия. В этом случае, в деятельности наступают те или иные нарушения и отклонения. Специфика инженерно-технической деятельности состоит в том, что характер воздействия оценки на эту деятельность обусловлен, прежде всего, тем, насколько правильно и благополучно она помогает этому делу. Вместе с тем, влияние установки на оценку как мотива инженерно-технической деятельности зависит и от характера отношения между действующим субъектом и оценивающим его деятельностью окружением. Доброжелательное окружение помогает добиваться более ощутимых результатов инженерно-технической деятельности. Недоброжелательное окружение «парализует», особенно очень чувствительных и неустойчивых людей. Попав в доброжелательную атмосферу, они сразу находят себя и проявляют себя с самой положительной стороны. Следует отметить, что оценка, направленная непосредственно на действующего субъекта, воспринимается иначе, чем оценка, направленная на те или иные его действия. Даже резко отрицательная оценка и жестокая критика действия не особенно болезненно заденет человека, если не будет воспринята им в личностном плане. И всякая, даже относительно мягкая критика будет воспринята аффективно, если она в силу тех или иных обстоятельств будет представлена как оценка личности в целом [3]. Положительная или отрицательная оценка того или иного частного действия будет воспринята по-разному, в зависимости от того, будет ли она проведена на фоне общего благожелательного или неблагоприятного отношения, будет исходить от человека, с которым установились те или иные отношения. Отрицательная оценка какого-нибудь поступка человеком, чье отношение в целом благожелательно, в известном смысле более действенна, поскольку, не задевая его личностные качества, она позволяет лучше и адекватнее оценить свои деловые и профессиональные качества. При общем отрицательном отношении такая оценка, как правило, имеет меньший эффект, так как может быть объяснена пристрастным отношением к этому человеку. Таким образом, оценка инженерно-технической деятельности, направленная на то или иное действие, может иметь различный психологический эффект.

Такими образом, психолого-педагогическое обеспечение учебного процесса инженерно-

технических вузов должно включать в себя не только современные психологические и воспитательные технологии, но и самый широкий контекст исследований современной инженерной психологии, эргономики и психологии управления производственными процессами.

Библиографический список

1. **Берулава, Г.А.** Методологические основы деятельности практического психолога / Г.А. Берулава. – М.: Высш. шк., 2003. – 205 с.
2. **Зеленов, Л.А.** Курс лекций по основам эстетики / Л.А. Зеленов; НГАСУ. – Нижний Новгород, 2005. – 178 с.
3. **Лазарев, В.С.** Планирование как главное направление и исходный принцип исследования в психологии управления // Вопросы психологии. 1980. № 6.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

L.A. Shestakova

PSYCHOLOGICAL ASPECTS OF MANAGEMENT SOCIAL TECHNICAL EDUCATIONAL SYSTEMS

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

Purpose. Problems and psychological aspects of management social technical educational systems are considered in the article.

Desing/methodology/approach. A theoretical framework is proposed to be based on modern psychological and pedagogical theories and the philosophical theory dialectic progress

Findings. Problems psychological aspects of management social technical educational systems are considered. In article are drawn theoretical and practical conclusions.

Originality/value. The article discusses psychological and pedagogical provision for education in technical institutes. Engineering and technical institutes in today's Russia demand psychological and pedagogical provision for education. It is connected with present situation with production and related production tasks. In article problems psychological aspects of management of social technical educational systems are considered.

Key words: psychological problems, psychological aspects, management, social technical educational systems.

УДК 37.013.78

В.И. Казакова, М.В. Худяков

**СОВРЕМЕННАЯ РОССИЙСКАЯ МОЛОДЁЖЬ
КАК ОБЪЕКТ СТРАТИФИКАЦИОННОГО АНАЛИЗА**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ООО «НПО Технология»

Предметом исследования в настоящей статье является молодое поколение современного российского общества, рассматриваемое в контексте социально-стратификационной проблематики. Топологические характеристики молодёжи в пространстве трансформирующегося социума обозначаются как одна из главных обществуведческих проблем, на решение которой замыкается вопрос устойчивой организации социальной жизни в целом. Молодое поколение склонно воспринимать неравенство как нечто естественное, не связывать его с нравственными аспектами. При этом социальная дифференциация здесь явно преодолевает феномен «русского раскола», избегая антиномичных и деструктивных тенденций.

Таким образом, молодое поколение является наиболее перспективным объектом стратификационных исследований, позволяющим выработать их новые концептуальные стратегии. Молодёжное «общество в обществе» ориентировано на социально-психологические критерии идентичности, что изначально социокультурные доминанты стратификационных процессов.

Ключевые слова: социология молодёжи, социальная стратификация, социальная топология, социальное неравенство, социокультурная дифференциация.

*«Подлинная молодость ищет дистанции,
а не беспорядка».*
К. Ясперс

Молодое поколение трансформирующегося общества – один из наиболее интересных и малоизученных объектов социально-стратификационных исследований. Неравенство как фундаментальный вопрос проблематики социальной стратификации применительно к исследованию молодёжи даёт наиболее широкий спектр возможных приложений [1]. Здесь оказываются до предела обострены граничные состояния материальных и духовных факторов социального расслоения; собственность, власть, образование, жизненный стиль всё то, что разделяет различные социальные группы и вместе с тем может служить основанием самоидентификации. Характер и степень интегрированности молодого поколения в структуры и отношения социума отражает связи и процессы, которые характерны для общества в целом, являются индикатором социально-экономического и культурного уровня, специфики социализации и индивидуализации [2]. Являясь наиболее динамичной и активной составляющей социального пространства, молодёжь в любой исторический период воплощает собой динамику общественного развития как таковую, в ней как в зеркале отражаются все проблемы того или иного «переходного» состояния. Применительно к социальной «транзиции» современной России о молодёжи можно говорить как об одном из важнейших индикаторов социоэкономической динамики нашего общества. Её часто обозначают как «рыночное поколение», характеризующееся предвосхищённой перестроечной идеологией способностью адекватно воспринимать радикальные изменения в общественной жизни, готовностью к адаптации в условиях социальной непредсказуемости, формированием новых моделей самореализации [3]. В переходный постсоветский период, который зачастую считается уже завершённым и преодолённым, молодое поколение россиян являло собой совершенно уникальную композицию устойчивых общественных отношений, в рамках которой реализуется своя самобытная форма внутригруппового единства. На социально-онтологическом уровне осмысления её можно обозначить как специфику восприятия социального времени, не отягощённую культом про-

шлого и почти индифферентную по отношению к «футурошоку» [4]. Можно предположить, что сложный многоуровневый комплекс статусов, ролей, жизненных стилей, складывающийся в возрастном диапазоне от 16 до 30 лет, который принято отождествлять с молодежью, во многих отношениях опережает тенденции будущего социального расслоения общества в целом. С данной точки зрения стратификационное исследование российской молодежи способствует совершенствованию методологического инструментария как социологии, так и всего обществознания в целом.

В отношении социального неравенства и социальной стратификации как фундаментальных обществоведческих проблем разработка концептуальных оснований исследования обрела за последние десятилетия особое значение [5-10]. Фрустрированная потребность в устойчивой организации социальной жизни – главный лейтмотив постсоветской социологии, стратификационные исследования при этом сместились в сферу рефлексии общественного сознания, когда социологическая мысль с гораздо большим рвением исследовала свои идеалы и ценностно-целевые ориентиры, нежели онтологию эмпирически реальных «базового» или «верхнего среднего» слоя [11-14]. Динамика социальной мысли, возможно, не уступала динамике социальной жизни, но функционировала в принципиально ином онтологическом измерении; культурно-антропологические и этико-аксиологические ориентиры исследований доминировали над практически-проектными тенденциями изучения социальной структуры, которая почти произвольно называлась классовая – в силу унаследованной от советской идеологии традиции. Начиная с 90-х годов прошлого столетия, эта структура измерялась терминологией Маркса и Вебера, Сорокина и Парето, Лумана и Бурдьё – без особой надежды на обоснованность выбора и концептуально-методологического решения. Явное предпочтение, отдаваемое ресурсному подходу, можно объяснить эстетической ориентацией на красоту и логику теоретической конструкции, являющейся, в конечном итоге, разновидностью того же самого марксизма. Социологической мысли переходного периода свойственно стремление подменять исследование реальных процессов расслоения общества определением макросоциальных тенденций [10]. Поляризация общества, расколотого на «две России» [15], происходит параллельно формированию в общественном самосознании всё новых классов, определение которых менее всего отражает реальную конфигурацию неравенства [8]. Так называемые «субъективные составляющие» стратификации, «индексы» социального самочувствия становятся решающими факторами в анализе социальных структур. На фоне этого «экзистенциально-психологического поворота» стратификационных исследований молодое поколение представляет особый интерес – прежде всего, с точки зрения достоверности и открытости, весьма непривычных для отечественных традиций обществознания [1, 2, 16]. Специфика субъектности молодежи такова, что взгляд её на происходящие в обществе преобразования является, возможно, наиболее непредвзятым и осмысленным. Помимо упомянутого ранее отсутствия «культы прошлого», идеологической свободы суждений, молодое поколение не сковано необходимостью установления нравственного порядка в ущерб хозяйственному, принесения повседневности в жертву идеям вселенского предназначения – всем тем, что можно обозначить как «комплекс Третьего Рима» [17]. Прагматические ориентиры и отсутствие идеологической ригидности способствуют большей степени искренности, нежели в случае респондентов социологических опросов других возрастных категорий; в частности, отмечается игнорирование мифов среднего класса и элиты [2]. Для традиционно стратифицированного властью российского социального пространства необычным представляется открыто прокламируемый приоритет материального благополучия, отнюдь не связываемого с безнравственностью его приобретения [2, 18]. Стратификация молодежи – картина социального расслоения той части общества, которая наиболее позитивно смотрит на происходящее, в том числе и на сами процессы этого расслоения [18]. Именно здесь заложена, на наш взгляд, главная предпосылка реализации новых концептуально-методологических оснований стратификационного анализа современной России. Молодое поколение, воспринимающее ритмы беспрестанно меняющегося общества как данность, смотрящее на жизнь с доброжела-

тельным любопытством, в целом чуждое иждивенческим установкам, воспринимает стратификацию вне этических установок должностования. Ограниченность в доступе к социальным и экономическим ресурсам стимулирует творческие возможности реализации собственного потенциала, предопределяет высокую значимость благополучия, не отягощённую необходимостью нравственного долга и стремлением к недостижимым идеалам. Стратификация молодёжи — стратификация «общества в обществе», толерантного к социальному неравенству как основанию социального расслоения.

Призрак марксового бесклассового общества, довлеющий над постиндустриальным обществом в целом, в российском социальном пространстве актуализируется превалированием мысли о среднем классе, который вполне обоснованно считается отчасти мифом, но вместе с тем воплощает собой тот путь вторичного смесительного упрощения, о котором некогда писал известный русский мыслитель К.Н. Леонтьев [19]. В пространстве постсоветской идеологии мы все в известной мере становимся обезличенно одинаковыми, проблема демаркационных линий стратификации — не в последнюю очередь проблема поиска чего-либо, что бы отличало нас друг от друга, той разности потенциалов, от которой можно ждать дальнейшего развития. Исследователями отмечается, что доля молодёжи, идентифицирующей себя со средним классом, который можно считать одной из наиболее действенных мифологем и одним из наиболее широкомасштабных социальных проектов, снижена по сравнению с другими возрастными категориями практически на треть, причём данная тенденция с течением времени усиливается. Молодые люди всё более склонны избегать того усреднённого образа скромной «рабочей лошадки», не рвущейся в заоблачные выси, на котором сошлись недалёкие амбиции других возрастных категорий, их стремление к интеграции в современные социальные структуры основано на реализации творческого потенциала, инициативе и предприимчивости, поиске нового.

Молодёжное «общество в обществе» — особый духовный мир, характеризующийся своими механизмами освоения национальных традиций и поликультурного восприятия мира в целом. В начале 90-х годов XX века сам потенциал общественных изменений, модернизации связывался с вступлением в новую жизнь молодых поколений [4]. Нельзя сказать, что это ожидание совершенно не оправдало себя, поскольку вплоть до настоящего времени молодёжь остаётся наиболее лояльной по отношению к постсоветским реформам и, в отличие от старшего поколения, склонна видеть в них больше преимуществ, чем потерь. Вместе с тем влияние традиций, переживание прошлого, в том числе и ностальгия по советской эпохе, не обходят стороной молодёжь, чьё духовное становление, помимо прочего, формировалось на фоне перехода к свободе вероисповедания, ликвидации административных и нравственных притеснений религии. В результате обозначился весьма самобытный мир культурно-мировоззренческих ориентаций, отличающийся размытостью, неоднозначностью, неопределённостью содержания [20]. Этот мир, как и в прежние времена, остаётся во многом непонятым и непризнанным, что не может не переживаться в самой молодёжной среде и не отражаться на её настроениях. В российском общественном самосознании сохраняется мощная традиция негативного восприятия молодого поколения, наглядный пример которого мы находим, например, в знаменитых «Вехах» [21]. Обрисованная столетием ранее картина пороков интеллигентной молодёжи оказывается во многом созвучной современным реалиям: удивительно, как приведённые А.С. Изгоевым данные опроса московского студенчества тех лет аналогичны социологическим исследованиям наших дней [20, 21]. В частности, практически не различаются скептически-пренебрежительные тенденции в отношении к образованию, рассматриваемому в обоих случаях как социальный барьер, за который надо платить определённую цену. И в начале XX, и в начале XXI века молодые не склонны воспринимать всерьёз духовные аспекты пребывания в школе или университете, качество и уровень получаемых знаний не является объектом интереса, время, проведённое в стенах учебного заведения, не рассматривается как возможность культурного и нравственного совершенствования. Столетием ранее Н.А. Бердяеву сам облик революционного 1917 года виделся молодым бесцеремонным.

монным человеком во френче, «энергичным, дельным, одержимым волей к власти и проталкивающимся в первые ряды жизни, в большинстве случаев наглым и беззастенчивым» [22]. Столь явное несоответствие размышлений о движущей силе октябрьских событий реальной возрастной категории революционных деятелей говорит о многом: аристократ по происхождению и консерватор по политическим взглядам, Н.А. Бердяев, описывая молодость как «новый антропологический тип», доходит до сочувствия старым революционерам. В рождении нового антропологического типа, в преобразующейся молодости «может быть загублена душа России, призвание русского народа» [22]. Юность – «материализация русской жизни, парадоксально связанная с разложением исторических тел» [22]. Всё это в целом – не столько отражение действительности, сколько предощущение усиления этой тенденции отторжения молодости в будущем России – и советской, и постсоветской. Напряжённость «легко ли быть молодым», вне всякого сомнения, ощутимо спала с начала девяностых, тем не менее, ксенофобные ориентиры жизненных позиций отнюдь не изжили себя [23]. Готовность к открытой и непримиримой борьбе с инаковым, твёрдая убеждённость в необходимости и целесообразности подобного противостояния накладывается у молодого поколения на укоренённую в повседневности бытовую ксенофобию; «временные и хаотичные молодёжные солидарности» приобретают качественно новые формы, «с трудом поддающиеся описанию в традиционных терминах класса, расы, гендера, территории» [23]. Исследователями отмечается несомненная конвергенция этого явления с «политическим пробуждением» молодого поколения в западных странах, «стихийным переформатированием молодёжных культурных сцен», глобализационными тенденциями формирования новых общемировых систем норм и ценностей, убеждений и интересов [23, 24].

Стратификация российской молодёжи претерпела за период реформ ряд существенных изменений, свойственных, в том числе, и другим поколенческим уровням, т. е. характерным для российского общества в целом. Обобщённо их можно охарактеризовать как идеологический «поворот» к социальной жизни, включающий в себя рост притязаний, индивидуалистически ориентированных потребностей, смещение от публичного к частному [4]. Именно эта тенденция стала исходной точкой в развитии так называемой «социологии повседневности», в рамках которой в качестве стратификационных критериев стали обозначаться самые разнообразные аспекты – от потребительской корзины до мобильного телефона. Интересно отметить, что большинство исследований в выборе респондентов было ориентировано на молодёжную аудиторию, хотя задача изучения её социального расслоения не ставилась непосредственно как таковая. Для молодого поколения «поворот» к социальной жизни более радикален и менее переживаем: рост амбиций здесь более ощутим, к тому же социокультурные аспекты ещё не успели стать определяющими, да и вообще сколько-нибудь определёнными. Последнее обстоятельство определяет, в числе прочего, и специфические черты социальной стратификации молодого поколения. «Жить стало ярче и интереснее» — главное положительное следствие реформ, отмечаемое молодыми респондентами, продолжающими вопреки экономическим кризисам видеть в 90-х годах XX века более приобретений, нежели потерь. Доминанта риска становится определяющей характеристикой модели их поведения, преодоление «футурошока» уже не кажется непреодолимой проблемой [25].

Таким образом, исследование молодого поколения современной России с точки зрения социальной дифференциации и расслоения позволяет преодолеть главные проблемы стратификационного анализа: этико-аксиологическую перегруженность, идеологическую ангажированность и деструктивную тенденцию к исследованию различных проявлений «русского раскола». С точки зрения социальной онтологии можно говорить об «обществе в обществе», наделённом своим центром и периферией, подверженном собственной внешней и внутренней дифференциации [2, 3, 18, 20]. Молодость в трансформирующемся обществе задаёт особое социальное пространство, где путь самоидентификации определяется не столько ответственностью, властью или статусом, сколько духовными практиками и культурными составляющими [2, 3, 23-30]. Специфическое «мы» российской молодёжи включает в себе ярко

выраженные психологические доминанты, являющиеся, согласно системной социологии, частью уже не самого общества, а его окружающей среды. Этот ориентир «вовне» в свою очередь определяется, в конечном итоге, отношением молодого поколения к социальному времени, рассматриваемому как исключительно своё [2]. Культурно-антропологический «поворот» к повседневности, наблюдаемый как стойкая тенденция стратификационных исследований молодёжи, можно рассматривать и как предвосхищение перспектив развития постсоветского общества, и как фактор формирования постиндустриальности. Соответственно осваивается и укрепляется новый комплекс ценностных ориентиров и жизненных стилей.

Библиографический список

1. **Егоренкова, И.А.** Жизненные ориентации современной молодёжи / И.А. Егоренкова, А.А. Сержантова [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://ms-solutions.ru/index.php?option> (Дата обращения: 25.04.2012).
2. **Сандрюков, Н.А.** Особенности социальной стратификации и самоидентификации молодёжи Московского региона [Электронный ресурс] // Режим доступа: (Дата обращения: 25.04.2012).
3. Алексеева, О.С. Стратификация молодёжи в сферах образования, занятости и потребления [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://ms-solutions.ru/index.php?option=com_content& (Дата обращения: 25.04.2012).
4. **Тоффлер, Э.** Шок будущего / Э. Тоффлер. – М.: АСТ, 2001. – 560 с.
5. **Большева, О.В.** Роль экономической стратификации в формировании социального порядка современной России (концептуальный анализ) [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.teoria-practica.ru/-2-2005/economics/bolsheva.pdf> (Дата обращения 25.04.2012).
6. **Гончарова, С.В.** Социальная стратификация российского общества в условиях социальной трансформации: дисс. ... на соискание учёной степени канд. соц. наук по специальности 22.00.04 / С.В. Гончарова. – Владивосток, 2005. – 233 с.
7. **Заславская, Т.И.** Социальная структура российского общества // Общественные науки и современность. 1997.
8. **Силласте, Г.** Стратификация российского общества [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.smolsoc.ru/index.php/home/2009-12-28-13-47-51/43-2010-08-30-12-19-02/1245-2011-02-28-02-39-53> (Дата обращения 25.04.2012).
9. **Тангалычева, Р.К.** Социальная стратификация современного российского общества: теоретико-методологический аспект: дисс. ... на соискание учёной степени канд. соц. наук по специальности 22.00.01 / Р.К. Тангалычева. – СПб., 2000. – 180 с.
10. **Чуланов, В.А.** Концептуальные основания анализа социальной стратификации / В.А. Чуланов, В.Н. Кипшидзе // Вестник ЮрГТУ (НПИ). 2009. №3. С. 87-92.
11. **Казакова, В.И.** Интеллектуал в пространстве стратификации: границы и социальная судьба // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер. Социальные науки. 2009. № 4. С.175–183.
12. **Казакова, В.И.** Феноменология современных элит: рубеж, дистанция, граница // Вестник ВятГГУ. 2010. №2 (4). С. 47-51.
13. **Казакова, В.И.** Социальный портрет как объект феноменологического анализа // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. Сер. Социальные науки. 2011. №1. С. 32-38.
14. **Казакова, В.И.** Средний класс: феноменологический взгляд // Управление в социальных системах. Коммуникативные технологии: тр. НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2011. №1 (88). С. 21-31.
15. **Римашевская, Н.М.** Две России [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://lib.rin.ru/doc/i/151030p.html> (Дата обращения 25.04.2011).
16. **Магун, В.** Динамика притязаний и изменение ресурсных стратегий молодёжи: 1995-2005-е годы / В. Магун. М. Эгноватов // Отечественные записки. 2006. №3. С. 76-96.
17. **Казакова, В.И.** К вопросу об экономическом сознании среднего класса // Будущее технической науки: материалы XI Международной научно-практической конференции / НГТУ. – Н. Новгород, 2012. С. 356-357.
18. **Пасовец, Ю.М.** К социальному портрету российской молодёжи: общие черты и региональная специфика имущественного положения // СОЦИС. 2010. №3. С. 101-106.
19. **Леонтьев, К.Н.** Византизм и славянство [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://lib.ru/FILOSOF/LEONTIEV_K/wisantizm_slawyanstwo.txt (Дата обращения 25.04.2011).
20. Российская молодёжь: проблемы и решения [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://>

- www.cafedra-orm.ru/files/book_russian_youth.pdf (Дата обращения 25.04.2011).
21. **Изгоев, А.С.** Об интеллигентной молодёжи (заметки о её быте и настроении) / А.С. Изгоев. – М.: Астрель, 2009. – 1072 с.
 22. **Бердяев, Н.А.** Размышления о русской революции [Электронный ресурс] // Режим доступа: http://www.modernlib.ru/books/berdyayev_nikolay_aleksandrovich/razmishleniya_o_russkoy_revolyucii/read/ (Дата обращения 25.04.2012).
 23. **Омельченко, Е.Л.** Постсоветская молодёжь в лабиринте «нового» патриотизма и ксенофобных настроений [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://ecsocman.hse.ru/search/index.html?words> (Дата обращения 25.04.2012).
 24. **Латышева, Т.В.** Феномен молодёжной субкультуры: сущность, типы // СОЦИС, 2010. №6. С. 93-101.
 25. **Чупров, В.И.** Молодёжь: духовное воспроизводство в условиях риска // Вестник РУДН. 2005. №6-7. С. 7-17.
 26. **Даффлон, Д.** Молодёжь в России: портрет поколения на переломе // Вестник общественного мнения: Данные. Анализ. Дискуссии. 2008. Т. 97. №5. С. 19-35.
 27. **Любжин, А.И.** Современная молодёжь: усиленная попытка портрета // Вопросы образования. 2008. №4. С. 308-314.
 28. Чупров, В.И. Молодёжь как субъект социально-экономической трансформации [Электронный ресурс] // Режим доступа: <http://www.budgetrf.ru/Publications/Magazines/VestnikSF/1999/vestniksf103-15/vestniksf103-15030.htm> (Дата обращения 25.04.2012).
 29. **Скорухов, В.В.** Боевые искусства востока как досуговый интерес молодёжи // СОЦИС. 2000. №3. С. 129-131.
 30. **Зоркая, Н.** Современная молодёжь: к проблеме дефектной социализации // Вестник общественного мнения. 2008. №4 (95). С. 8-22.

*Дата поступления
в редакцию 11.07.2012*

V.I. Kazakhova, M.V. Khydyakov

MODERN RUSSIAN YOUTH AS STRATIFICATION RESEARCH OBJECT

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev,
Joint Stock Company "Scientific and Production Association of Technology"

Purpose: Young generation of modern Russia is analyzed from social stratification point of view.

Design/methodology/approach: Social phenomenology is the most suitable approach concerning generation and social-cultural stratification research. The author discusses not only results of sociological works but the character of modern thoughts about youth. The thought about society sometimes lives its own life, and this process is more interesting than social reality itself.

Findings: Conceptual frames of social stratification research get new potential of sociological theory development.

Research limitations/implications: The phenomenological analysis provides a starting-point for further research in the social differentiation sphere.

Originality/value: Sustainable organization of social life depends on the opportunities of overcoming of anonymous destructive tendencies. These opportunities can be revealed by means of youth stratification research.

Key words: youth sociology, social stratification, social topology, social inequality, social-cultural differentiation.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 521.1

В.В. Аниковский¹, С.Г. Журавлёв²

ЗАДАЧА ЭЙЛЕРА И ЕЕ ПРИЛОЖЕНИЯ В НЕБЕСНОЙ МЕХАНИКЕ И КОСМОДИНАМИКЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Московский государственный автомобильно-дорожный институт²

Приведен последовательный анализ многочисленных обобщений классической задачи двух неподвижных центров, начиная с момента ее формулировки и решения Эйлером в 1760 г. и до наших дней. Отмечается роль многочисленных исследователей этой задачи. Приведенные публикации со всей очевидностью показывают, что основные результаты по обобщениям задачи и их аналитическим и качественным исследованиям получены в XIX в. и в самом начале XX в. Современным исследователям принадлежат лишь достаточно многочисленные, иногда эффектные и одновременно эффективные приложения отдельных обобщений (задача Гредакса одна из них).

Ключевые слова: проблема Эйлера, действительные неподвижные центры, комплексно-сопряженные неподвижные центры, разделение переменных, функция Гамильтона, эллиптические координаты, центральные конфигурации.

В конце 50-х – начале 60-х гг. прошлого столетия были опубликованы циклы работ [1, 2], в которых показано, что так называемая обобщенная задача двух неподвижных центров имеет важные приложения, прежде всего, в теории движения искусственных спутников Земли. После этого появились многочисленные публикации, авторы которых пытались найти столь же эффективные другие обобщения задачи n ($n \geq 2$) неподвижных центров. В результате во многих появившихся позже работах декларировалось отыскание «новых» интегрируемых в квадратурах модельных задач небесной механики (трех, четырех и т.д. неподвижных центров) и решаемых на их основе задач космодинамики, которые, как будет показано далее, в своей основе являются лишь частными случаями давно известных (более 100 лет) обобщений задачи Эйлера [3, 4].

В этой связи далее последовательно рассмотрены обобщения задачи Эйлера, включающие в себя практически все известные обобщения Лагранжа, Лежандра, Якоби, Лиувилля, Вельде и Дарбу, сформулированные и проанализированные в самом общем виде Хильтебейтелем [5, 6] и Тальквистом [7, 8], и выяснена роль современных исследователей в решении этой проблемы.

В относительно недавно опубликованном обзоре по обобщенной задаче двух неподвижных центров [9] содержится анализ работ, касающихся в основном комплекснозначного обобщения классической задачи двух неподвижных центров и ее применения в небесной механике и космодинамике. Были упомянуты некоторые работы, содержащие обобщения и на случай $n > 2$ неподвижных центров. Однако 1) список последних работ далеко не полон, 2) не только не подвергалось, но даже сомнений не было высказано в отношении авторства «новых» модельных задач, которые на самом деле являются известными со времен Ла-

гранжа, Лиувилля, Дарбу и др. обобщениями задачи двух неподвижных центров, 3) подробно рассмотренные в обзоре задачи Дарбу и Гредеакса сами являются частным случаем давно известной задачи Эйлера-Якоби, 4) остались без внимания опять-таки известные обобщения задачи на случай двух подвижных центров, а также случая с вращающейся плоскостью [10]. Появившиеся в последние десятилетия результаты по интегрируемости и неинтегрируемости задач классической механики [12] позволяют по новому посмотреть на проблему.

Изложение начнем с постановки задачи двух неподвижных центров Эйлера, рассмотрим последовательно во временном пространстве ее обобщения и завершим обзор самым широким обобщением, которое назовем *задачей Эйлера-Лагранжа-Лиувилля-Вельде-Дарбу-Хильтебейтеля (ЭЛЛВДХ)* и которое, как будет показано далее, включает в себя многие известные обобщения и приложения. Вторую цепочку обобщений составляет *задача Эйлера-Лагранжа-Якоби-Мультонна (ЭЛЯМ)* для n неподвижных центров на прямой линии.

1. Задача Эйлера. Она состоит в исследовании движения материальной точки M , под воздействием двух неподвижных центров K_1 и K_2 (обозначения взяты из работы Хильтебейтеля [6]), которые создают силы, пропорциональные массам m_1 и m_2 соответственно и обратно пропорциональные квадратам расстояний (1760-1767). При этом *движение материальной точки происходит лишь в плоскости, содержащей неподвижные центры*. Последнее достигается выбором начальной скорости движения материальной точки, а именно, вектор упомянутой скорости должен пересекать прямую линию, проходящую через неподвижные центры. Тогда действующие на материальную точку M силы запишутся в виде

$$R_1 = -m_1 / r_1^2, \quad R_2 = -m_2 / r_2^2. \quad (1)$$

2. Задача Эйлера-Лагранжа. Лагранж (1766–1769) [10] обобщил постановку задачи Эйлера на пространственный случай, введя в рассмотрение вращающуюся плоскость (относительно соединяющей неподвижные центры прямой), в которой по-прежнему происходит движение материальной точки. Кроме того, он доказал, что интегрируемость задачи сохраняется при добавлении еще одной силы, действующей на материальную точку прямо пропорционально расстоянию и направленную в середину отрезка, соединяющего неподвижные центры. К действующим силам (1) добавляется сила

$$R_3 = -m_3 r_3. \quad (2)$$

В результате в силовую функцию задачи двух неподвижных центров добавляется слагаемое, обусловленное вращением плоскости (эффект Кориолиса), структура которого такова, что разделение переменных (интегрирование) по-прежнему имеет место. Угол поворота плоскости от некоторого начального положения является циклической переменной, и уравнения для него отщепляются от соответствующих уравнений движения материальной точки в плоскости.

Добавление в силовую функцию третьего слагаемого, пропорционального первой степени расстояния, не нарушает свойства интегрируемости уравнений движения, и, таким образом, получается задача *трех неподвижных центров на прямой*.

Лагранж также отметил, что такой подход (с вращающейся плоскостью) возможен и в предельном случае (см. ниже).

Здесь уместно отметить роль Лежандра, посвятившего большое число работ технике интегрирования соответствующих уравнений движения и вопросам сведения квадратур задачи к эллиптическим и другим функциям (1811–1844) [2, 10, 12].

3. Задача Эйлера-Лагранжа-Лиувилля-Вельде. Лиувилль (1846), которому принадлежат фундаментальные результаты по интегрируемости общих уравнений динамики и, в частности, уравнений задачи n тел небесной механики, отметил, что интегрирование уравнений задачи двух неподвижных центров возможно в общем случае, когда силовая функция задачи имеет вид

$$V = \frac{f(\alpha) - \Phi(\beta)}{\alpha^2 - \beta^2}, \quad (3)$$

где α, β - параметры софокусных эллипсов или гипербол; $f(\alpha), \Phi(\beta)$ - некоторые непрерывные функции своих аргументов.

Приведенный вид функции - частный случай функции следующего вида

$$V = \frac{A}{x^2} + \frac{A'}{y^2} + \frac{B}{r} + \frac{B'}{r'} + C\rho^2, \quad (4)$$

где A, A', B, B', C - постоянные; r, r' и ρ - расстояния до двух фокусов и до общего центра софокусных эллипсов (в предыдущих формулах r_1, r_2 и r_3 соответственно).

Это соответствует случаю, когда материальная точка подвержена действию:

1) двух сил, нормальных к осям и обратно пропорциональным кубам расстояний до осей (производная второго слагаемого, равная $-2A'/y^3$, отражает как раз эффект от вращения плоскости);

2) двух неподвижных центров, расположенных в двух фокусах и притягивающих по закону Ньютона;

3) одного неподвижного центра, расположенного в общем центре софокусных конических сечений и притягивающего пропорционально расстоянию.

Во втором мемуаре Лиувилль (1847) изложил другой подход к интегрированию уравнений движения в рамках упомянутого обобщения задачи Эйлера-Лагранжа и отметил еще один интегрируемый «курьезный» случай задачи трех центров – одного неподвижного в центре, действующего на материальную точку с силой, пропорциональной расстоянию, и двух подвижных центров, движущихся по окружности относительно первого неподвижного центра таким образом, что долгота при обращении двух подвижных центров и долгота материальной точки совпадают (в этой связи уместно отметить работы Бессера [13]), который выдал используемый им этот вариант за новую модельную задачу небесной механики).

Таким образом, Лиувилль подтвердил, что имеется частный вариант задачи - *три неподвижных центра на прямой* (задачей трех тел этот вариант не назывался).

Немного позже Вельде (1889) указал (без ссылок на работы Лиувилля), что вариант задачи, предложенный Лагранжем, допускает следующую интерпретацию: еще две силы, прямо пропорциональные расстоянию и направленные в неподвижные центры K_1 и K_2 , могут быть добавлены без нарушения свойства интегрируемости задачи. Тогда действующие силы будут такими:

$$R_1 = -mr_1 - \frac{m_1}{r_1^2}, \quad R_2 = -mr_2 - \frac{m_2}{r_2^2}, \quad R_3 = -m_3r_3. \quad (5)$$

Это кажется очевидным, поскольку по правилу параллелограмма сложения векторов имеем

$$-mr_1 - mr_2 = -m(r_1 + r_2) = -2mr_3,$$

так что использование трех компонент, направленных к трем центрам, или их равнодействующей, направленной в середину отрезка $[K_1, K_2]$, ничего не изменяет в смысле интегрируемости.

Действительно, заменив в равенстве (5) $-m_3r_3$ на $-(m_3 + 2m)r^3 = -\bar{m}_3r^3$, имеем вариант Лагранжа (1), (2).

4. Задача Эйлера-Лагранжа-Лиувилля-Вельде-Дарбу

Дарбу (1901) [14], рассматривая вариант силовой функции Лиувилля (4), заявил «... я не знаю, отмечалось ли, что ко всем этим действиям можно добавить два других, которые происходят от двух мнимых фокусов эллипсов и притягивают также по закону Ньютона».

Координаты упомянутых мнимых фокусов имеют вид:

$$x = 0, \quad y = \pm ci.$$

Таким образом, выражение (4) силовой функции дополняется слагаемыми

$$\frac{B_1}{r_1} + \frac{B'_1}{r'_1} \tag{6}$$

дополнительные величины B_1, B'_1 - постоянные, r_1, r'_1 - расстояния до двух мнимых фокусов.

Дополненное выражение силовой функции будет действительной величиной, если постоянные B_1, B'_1 - комплексно-сопряженные мнимые величины.

Если в выражении (4), дополненным слагаемыми (6), положить $B = B' = 0$, т.е. исключить два действительных центра K_4, K_5 , то получится известное комплекснозначное обобщение задачи двух неподвижных центров $K_1(m_1 - im_2), K_2(m_1 + i m_2)$ плюс третий центр $K_3(m_3)$ в начале координат.

5. Задача Эйлера-Лагранжа-Лиувилля-Вельде-Дарбу-Хильтебейтеля и ее частные случаи. Наконец, Хильтебейтель (1905) [5], (1911) [6] сформулировал, на наш взгляд, наиболее общую постановку задачи.

Формулировка задачи. Исследовать движение материальной точки M под воздействием пяти силовых центров K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 , из которых два (K_1, K_2)- действительные фокусы, K_3 - центр (середина отрезка $[K_1, K_2]$), два (K_4, K_5)- мнимые фокусы системы софокусных конических сечений, с силами

$$R_1 = -mr_1 - \frac{m_1}{r_1^2}, R_2 = -mr_2 - \frac{m_2}{r_2^2}, R_3 = -m_3r_3, R_4 = -m'r_4 - \frac{m_4 + im_5}{r_4^2}, R_5 = -m'r_5 - \frac{m_4 - im_5}{r_5^2} . \tag{7}$$

Следует заметить, что в этой интегрируемой задаче допускается еще действие сил, параллельных оси K_3X (см. далее предельный случай).

Положив в приведенных ранее формулах $m = m' = m_3 = m_4 = 0$, получаем задачу четырех неподвижных центров K_1, K_2, K_4, K_5 , из которых два (K_1, K_2) - действительные фокусы а другие два (K_4, K_5) -мнимые фокусы системы софокусных конических сечений, с силами

$$R_1 = -\frac{m_1}{r_1^2}, R_2 = -\frac{m_2}{r_2^2}, R_4 = -\frac{im_5}{r_4^2}, R_5 = \frac{im_5}{r_5^2} .$$

Необходимо отметить, что Лиувилль (1846) и позже Дарбу (1901) [14], доказавшие интегрируемость задачи с потенциалом (4), дополненным слагаемыми (6), где теперь $r = \sqrt{(x-c)^2 + y^2}$, $r' = \sqrt{(x+c)^2 + y^2}$ - действительные расстояния от исследуемой точки до действительных центров, а $r_1 = \sqrt{x^2 + (y-id)^2}$, $r'_1 = \sqrt{x^2 + (y+id)^2}$ - «комплексные расстояния» от исследуемой точки до «комплексных центров», не называли эту задачу «задачей четырех или пяти неподвижных центров».

б. Неинтегрируемость ньютоновской задачи $n (n > 2)$ произвольно расположенных неподвижных центров. Неинтегрируемость этой задачи относительно недавно было подтверждено результатами С.В.Болотина [11]: никакая (!) ньютоновская задача $n (n > 2)$ центров не интегрируется в квадратурах.

Приведем соответствующую теорему. Пусть z_1, z_2, \dots, z_n - различные точки комплексной плоскости C . Функция Гамильтона задачи n центров имеет вид

$$H = \frac{1}{2}|p_z|^2 + V(z), \quad (z, p_z) \in U \times C ; V(z) = -\sum_{i=1}^n \mu_i |z - z_i|^{-1}, \quad \mu_i > 0 ,$$

где $U = C \setminus \{z_1, z_2, \dots, z_n\}$ - конфигурационное пространство, а $V(z)$ - потенциал гравитационного притяжения точки z , $z \in U$ точками z_1, z_2, \dots, z_n .

Так как $V < 0$, при $h \geq 0$ уровень $\{H = h\}$ интеграла энергии H - аналитическая гиперповерхность в фазовом пространстве $U \times C$.

Теорема. Пусть $n > 2$. Тогда при $h \geq 0$ задача n центров не имеет аналитических первых интегралов на уровне интеграла энергии $\{H = h\}$.

Доказательство проводится методом топологических препятствий.

Итак, задача n центров интегрируема в области $\{H \geq 0\}$ только в случаях Кеплера и Эйлера.

Рассматривая дальше обратные обобщения действия, т.е. упрощения задачи ЭЛ-ЛВДХ, придем сначала к варианту с двумя действительными притягивающими центрами K_1, K_2 и третьим отталкивающим (или притягивающим) центром K_3 в начале координат (обобщение Лагранжа). Действующие силы: (1) и (2)

$$R_1 = -\frac{m_1}{r_1^2}, \quad R_2 = -\frac{m_2}{r_2^2}, \quad R_3 = \pm mr_3$$

Также получаем вариант с двумя комплексными притягивающими центрами K_4, K_5 и третьим отталкивающим (или притягивающим) центром K_3 в начале координат (обобщение Лагранжа-Хильтебейтеля). Действующие силы:

$$R_3 = \pm mr_3, \quad R_4 = -\frac{im_4}{r_4^2}, \quad R_5 = \frac{im_4}{r_5^2}.$$

Отметим, что все эти последние варианты с тремя вещественными неподвижными центрами, с двумя комплексными и одним вещественным центрами (и многие другие), как на плоскости, так и в пространстве (с подвижной плоскостью), равно, как и так называемый предельный случай задачи, когда один из центров удаляется в бесконечность *подробнейшим образом* рассмотрены в работах Тальквиста (1927-1929) (7 выпусков Финской академии наук, содержат около 700 с.).

7. Интегрируемость задачи двух и четырех неподвижных центров, расположенных на сфере. Итак, интегрируется в квадратурах только задача двух неподвижных центров. А как же другие случаи?

В работе [15] утверждается, что классическая задача двух (вещественных) неподвижных центров, обобщенная задача двух (комплексно-сопряженных) неподвижных центров и задача четырех (двух вещественных и двух комплексно-сопряженных) неподвижных центров являются, фактически, *одной задачей* с потенциалом, задаваемым четырьмя фиксированными центрами на сфере (определенным образом расположенными!).

Отмечается, что интегрирование соответствующей системы уравнений возможно при симметричном расположении вещественных центров на оси, например, абсцисс, на расстояниях $\pm c$ от начала координат, и при симметричном же расположении на оси ординат двух комплексно-сопряженных центров на комплексных расстояниях $\pm di$ от начала координат, причем должно выполняться равенство $c = d$. Интегрирование имеет место в эллиптических координатах u, v , связанных с прямоугольными координатами x, y соотношениями:

$$x = c \operatorname{ch} v \cos u, \quad y = c \operatorname{sh} v \sin u.$$

Вид соответствующих слагаемых потенциала упомянутой задачи записывается в форме

$$V_{\operatorname{Re}} = (W_{\operatorname{Re}1}^+ + W_{\operatorname{Re}2}^-) \Delta; \quad W_{\operatorname{Re}j}^\pm = (\mu_1 \pm \mu_2) \sqrt{(\alpha^2 \mp u_j)(\beta^2 \pm u_j)},$$

$$V_{\operatorname{Im}} = (W_{\operatorname{Im}2}^+ + iW_{\operatorname{Im}1}^-) \Delta; \quad W_{\operatorname{Im}j}^\pm = (\xi_1 \pm \xi_2) \sqrt{u_j(\beta^2 \mp u_j)}; \quad j = 1, 2, \quad \Delta = (u_1 + u_2)^{-1}.$$

К этим двум слагаемым еще могут быть добавлены (без нарушения условия интегрируемости системы) слагаемые, соответствующие потенциалам Гука (V_G) и Неймана (V_N):

$$V_G = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^3 c_i V_{gi},$$

$$V_{g1} = \beta^2 [(\beta^2 - u_2)^{-1} - (\beta^2 + u_1)^{-1}] \Delta, \quad V_{g2} = \alpha^2 [(\alpha^2 - u_1)^{-1} - (\alpha^2 + u_2)^{-1}] \Delta, \\ V_{g3} = \alpha\beta(u_1^{-1} + u_2^{-1}) \Delta,$$

Здесь μ_1, μ_2 - массы действительных центров, α, β определяют координаты этих центров, причем расстояние между действительными центрами 2α фиксировано, а расстояние между двумя комплексными центрами связано с первым соотношениями $\mu = \beta(1 - \alpha^2)$, $\nu = \alpha\beta(1 - \alpha^2)$, ξ_1, ξ_2, c_i, C - постоянные, u_1, u_2 - сфероконические координаты, в которых и осуществляется интегрирование (см. детали [15]).

Дело в том, что, как было показано в [15], при стремлении радиуса сферы, на которой расположены четыре центра, в бесконечность сфера трансформируется в плоскость (эвклидова плоскость), потенциал

$$V = V_{Re} + V_{Im} + V_G + V_N$$

становится потенциалом Лиувилля-Дарбу и задача интегрируется в квадратурах на окружности и не интегрируется на сфере, даже если сохранить в потенциале V только слагаемые V_{Re}, V_{Im} , поскольку не существует необходимого для этого циклического интеграла.

В то же время задача с потенциалами V_{Re}, V_{Im} , взятыми по отдельности, интегрируется на сфере.

8. Предельный вариант задачи двух неподвижных центров. Рассмотрим так называемый предельный случай задачи двух неподвижных центров, который интенсивно исследовался в 60-х-70-х гг. прошлого века в циклах работ В.В.Белецкого, В.Г.Дёмина и А.Л.Куницына и применялся ими в небесной механике и космодинамике. О том, что этот вариант задачи двух неподвижных центров интегрируется в квадратурах, известно очень давно и достаточно давно известно о проведенных качественных исследованиях.

Так, уже в работах Лагранжа (1760) [10] упоминается об этом интегрируемом случае (“...найден случай, в котором один из центров перемещается в бесконечность и сила, направленная к этому центру, становится однородной и действует вдоль параллельных линий. Удивительно, но в этом случае решение задачи не сильно упрощается. Лишь радикалы, встречающиеся в знаменателях отдельных уравнений, содержат переменные только в третьей степени, а не в четвертой ...”).

И лишь через 150 лет этот вариант задачи стали использовать физики для исследования эффектов Зеемана и Штарка в рамках общей модели атома, представляющей покоящееся ядро с движущимися вокруг него электронами. В монографии Борна (1923-1924) обсуждаемый предельный вариант задачи описан следующим образом: “Известно, что параболические координаты, в которых легко описывается движение электрона в водородном атоме, происходящее под влиянием электрического поля методом разделения переменных, представляют частный случай эллиптических координат. А последние допускают разделение переменных, вообще говоря, для движения одной точки, находящейся под влиянием двух неподвижных силовых центров, притягивающих ее по закону Кулона. Удаляя один из силовых центров в бесконечность, увеличивая при этом соответствующим образом его силу, мы получаем случай эффекта Штарка; эллиптические координаты при этом переходят в параболические”.

В результате физиками впервые были выписаны квадратуры в этой задаче и частично проведен качественный анализ возможных типов траекторий для случая отрицательной энергии, как в плоском, так и в пространственном случаях. Качественный анализ движений в предельном случае задачи не рассматривался.

Далее в работе Тальквиста (1927) [8] уже фактически появляется и термин “*ein Grenzfall des Zweizentrenproblems*” (граничный, предельный случай задачи двух центров).

Наконец, это изложено в современных изданиях классических трудов [10].

Таким образом, интегрирование в предельном случае задачи двух неподвижных центров впервые и в полной мере осуществлено Тальквистом (1927) [8]. Им получены квадра-

туры (которые, как уже отмечалось Лагранжем [10], от соответствующих квадратур задачи двух неподвижных центров отличаются лишь порядком многочленов, находящихся под знаком радикалов, а именно - они третьего порядка), а также проведен достаточно подробный качественный анализ областей возможности движений в случаях простых и кратных корней (без геометрического представления областей).

9. Задача n неподвижных центров на прямой

Наконец, рассмотрим еще одно обобщение классической задачи двух неподвижных центров в несколько другом направлении.

Задача Лапласа-Лиувилля трех центров на подвижной прямой. Со ссылкой на работы Лапласа Лиувилль (1842) описал возможность существования частного решения задачи трех неподвижных тел на прямой, которая в свою очередь движется в пространстве.

Если выбрать определенное соотношение между массами взаимно притягиваемых тел и их взаимными расстояниями, то все три тела будут находиться на прямой и два тела будут вращаться относительно третьего со скоростями, направленными параллельно одна другой и пропорциональными расстояниям до центра. При этом и скорости, и расстояния между телами могут изменяться во времени, однако отношение скоростей всех трех тел в пространстве и их взаимных расстояний инвариантно.

Эти частные решения применялись для описания взаимного движения Солнца, Земли и Луны на некотором интервале времени.

Задача Якоби n неподвижных центров на прямой линии

Практически в то же время Якоби (1842) рассмотрел общий случай пространственного движения исследуемой точки в поле притяжения любого конечного числа n неподвижных центров, расположенных на прямой линии, причем один из центров может быть удален в бесконечность (сила, действующая параллельно прямой). Последнее представляет собой предельный вариант задачи $n+1$ тел.

Формулировка проблемы. Чтобы рассмотреть задачу в ее наибольшей общности, предположим, что точка M притягивается не двумя, а произвольным числом n неподвижных центров, лежащих на одной прямой.

В этом случае, и даже в более общем, когда присоединяется еще постоянная сила, параллельная той же прямой (*предельный вариант задачи*, когда один из центров удаляется в бесконечность вдоль упомянутой прямой!), имеет место принцип площадей по отношению к плоскости, перпендикулярной данной прямой. Если теперь считать, что начальная скорость движущейся точки лежит в одной плоскости с этой прямой, то всё движение происходит в этой плоскости, и нет необходимости применять теорему площадей.

Напротив, если начальная скорость не лежит в одной плоскости с той прямой, то точка описывает кривую двоякой кривизны. При этом очень выгодно разложить движение на два. В самом деле, предположим, что через точку и через прямую, содержащую центры, проведена плоскость; представим себе, что эта плоскость вращается вокруг прямой и, кроме того, точка движется по вращающейся плоскости.

Это разложение, которое возможно при всех обстоятельствах, в общем случае не дает никакого упрощения, но в рассматриваемом случае можно, благодаря принципу площадей, совершенно отделить движение точки в плоскости от вращательного движения, так что мы разыскиваем сначала движение точки по плоскости, а после того, когда оно найдено, получаем простой квадратурой угол вращения φ этой плоскости (отсчитанный от некоторого определенного, например, начального, ее положения)

Задача Мультона n неподвижных центров на прямой линии

Формулировка проблемы. Мультион (1910) (результат был анонсирован в 1900 г.) также привел обобщение задачи Эйлера на случай $n > 3$. Он доказал, что для n тел разных по массам существует $N = n!/2$ вариантов их расположения на прямой линии ($N=3$ при $n=3$ – случай Лапласа-Лиувилля; $N=12$ при $n=4$ и т. д.).

Кстати, в бурно развивающемся в настоящее время разделе математики и механики,

имеющем название «Центральные конфигурации», упомянутое решение Мультона называют «конфигурациями Мультона».

Рассмотрим некоторые современные применения этой задачи.

Так, в серии работ и в докторской диссертации Г.Т. Аразова [16] неаккуратно и часто утверждается, *во-первых*, об интегрируемости задач трех и более неподвижных центров в квадратурах и даже о том, что "...решение задачи n неподвижных центров $n \geq 2$... обнаружено впервые". А на самом деле речь идет лишь о некотором *специальном частном* случае задачи Якоби n неподвижных центров на прямой линии, когда движение исследуемой точки ограничивается плоскостью, строго перпендикулярной упомянутой прямой. Задача, естественно, интегрируется в квадратурах, как и доказано Якоби в более общем случае. Г.Т. Аразов (1975) [16] рассмотрел частные случаи задачи Якоби n неподвижных центров на прямой линии. Так, при $n = 3$ три неподвижных центра на прямой линии (все три вещественные или один вещественный и два комплексно-сопряженных) расположены на оси аппликат OZ и движение материальной точки рассматривается в плоскости OXY . Такой выбор расположения трех масс позволил аппроксимировать до четырех зональных гармоник геопотенциала в спутниковых задачах.

Позже Е.Л. Лукашевич (1979) [17] рассмотрел также частный случай задачи Якоби n неподвижных центров на прямой линии при $n = 6$. Шесть неподвижных центров (три попарно комплексно-сопряженных масс) расположены также на оси аппликат OZ на комплексно-сопряженных расстояниях симметрично относительно начала координат. Такой выбор расположения шести масс позволил аппроксимировать до восьми зональных гармоник геопотенциала в спутниковых задачах.

Таким образом, практически каждой «новой» модельной задаче найден соответствующий частный случай задачи *Эйлера-Лагранжа-Лежандра-Лиувилля-Дарбу-Хильтеbeitеля* или *Эйлера-Лагранжа-Якоби-Мультона*. Следовательно, собственно современным авторам принадлежат лишь повторный и более детальный качественный анализ областей возможного движения и более или менее удачные приложения этой (давно известной интегрируемой) задачи классической механики и ее опять же известных более 100 лет обобщений в некоторых прикладных задачах небесной механики, космодинамики и звездной динамики, но никак не открытие новых интегрируемых задач классической и небесной механики.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований 10-01-00283.

Библиографический список

1. **Vinti, J.P.** A new method of solution for unretarded satellite orbits // Nat. Bur. Standards. J. Res. Math. and Math. Physics. 1959. V. 63B. №3. P. 105–116.
2. **Vinti, J.P.** Theory of accurate intermediate orbit for satellite astronomy // Nat. Bur. Standards. J. Res. Math. and Math. Physics. 1961. V. 65B. №2. P. 169–201.
3. **Euler, L.** Un corps étant attiré en raison réciproque quarrée des distances vers deux points fixes donnés, trouver les cas ou la curbe decrite par ce corps sera algebraique // Mémoires de l'Académie de Berlin for 1760. Publ. 1767. P. 228–247.
4. **Euler, L.** De motu corporis ad duo centra virium fixa attracti // St.- Petersburg Memoirs 1764/1765. Publ. 1766. V. 10. P. 207–242.
5. **Hiltebeitel, A.M.** Note on a problem in mechanics // Amer. J. Math. (read before Amer. Math. Soc. Feb. 25, 1905). 1911. V. 3. P. 433–436.
6. **Hiltebeitel, A.M.** On the problem of two fixed centers and certain of its generalization // Amer. J. Math. 1911. V. 33. P. 337–362.
7. **Tallqvist, Hj.** Über die Bewegung eines Punktes, welcher von zwei festen Zentren nach dem Newtonschen Gesetze angezogen wird // Acta Soc. Sci. Fennicae. Nova Ser.A. Helsingfors: 1927. T. 1. № 1. S. 135.
8. **Tallqvist, Hj.** Die Bewegung eines Massepunktes unter dem Einfluss den Schwere und einer Newtonschen Zentralkraft // Acta Soc. Sci. Fennicae. Nova Ser. A. Helsingfors: 1927. T. 1. № 2. S. 77.

9. Лукьянов, Л.Г. Обобщенная задача двух неподвижных центров или задача Дарбу-Гредеакса / Л.Г. Лукьянов, Н.В. Емельянов, Г.И. Ширмин // Космические исследования. 2005. Т. 43. № 3. С. 194–200.
10. Лагранж, Ж. Аналитическая механика / Ж. Лагранж. Т. 2. – М.–Л.: Гостехиздат, 1950. – 440 с.
11. Болотин, С.В. Неинтегрируемость задачи n центров при $n > 2$ // Вестн. МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 1984. № 3. С. 65–68.
12. Козлов, В.В. Интегрируемость и неинтегрируемость в гамильтоновой механике // Успехи математических наук, 1983. Т. 38. Вып. 1. С. 3–67.
13. Васкез Бессера, Х.А. Потенциал поля сил в модельной задаче небесной механики и космической геодезии // Известия высших учебных заведений. Геодез. и аэрофотосъемка. 2006. № 5. С. 107–112.
14. Darboux, G. Sur un problème de mécanique // Arch. Néerlandaises des Sci. Exactes et Naturelles. La Haye: 1901. Ser. 2. № 6. P. 371–376.
15. Борисов, А.В. Обобщенная задача двух и четырех ньютоновских центров / А.В. Борисов, И.С. Мамаев // Celest. Mech. and Dyn. Astron. 2005. V. 92. № 4. P. 371–380.
16. Аразов, Г.Т. О задаче трех неподвижных центров // Письма в астрон. ж. 1975. Т. 1. № 6. С. 42–45.
17. Лукашевич, Е.Л. Об одном интегрируемом случае движения спутника в нецентральной поле тяготения Земли // Космич. исследования. 1979. Т. 17. № 3. С. 457–459.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

V.V. Anikovskiy¹, S.G. Zuravlev²

EULER'S PROBLEM AND ITS APPLICATIONS IN CELESTIAL MECHANICS AND COSMODYNAMICS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,

The consecutive analysis of numerous generalizations of the classical problem of two fixed centres is presented beginning from the moment of its formulation and solution by Euler in 1760 and up to the present days. The role of numerous researchers of the problem is noted. The cited publications demonstrate clearly that the principal results on generalizations of the problem and their analytical and qualitative studies were obtained in the 19th century and in the beginning of the 20th century. Only multiple applications of some generalizations, sometime rather striking but effective belong to modern scientists (e.g. the problem of Gredeaks).

Key words: Euler's problem, real fixed centres, conjugate-complex fixed centres, separation of variables, integrable problem, Hamiltonian function, elliptical coordinates, central configurations.

УДК 519.3

В.А. Игошин

ПОСТРОЕНИЕ КЛЕТКИ И КЛЕТОЧНОГО ПСЕВДОРИМАНОВА ПРОСТРАНСТВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа является продолжением предыдущей статьи автора. Осуществлено построение клетки и клеточного пространства. Глобальное строение изучаемых пространств напоминает, в частности, двойную спираль ДНК; при других условиях возможно глобальное устройство пространства в виде «параллельных» Вселенных.

Ключевые слова: псевдориманово пространство, особые точки, клетка, шифр клетки, тороидные и цилиндрические пространства, формулы стыковки, геликоиды.

1. S-геликоиды. S-клетка

Далее сохранены обозначения, принятые в [1].

Пусть p_0 - особая точка Γ -поля A на S -многообразии M . Фиксируем в p_0 ортонормированный репер e_i^0 . Реперу e_i^0 соответствуют нормальные координаты a^i в зоне $Z(p_0)$.

Имеем четыре «элементарных звена»:

$$Z^1(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z(p_0) : a^1 \geq 0, a^2 \geq 0\} \text{ («правое верхнее»),}$$

$$Z^2(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z(p_0) : a^1 \leq 0, a^2 \geq 0\} \text{ («левое верхнее»),}$$

$$Z^3(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z(p_0) : a^1 \leq 0, a^2 \leq 0\} \text{ («левое нижнее»),}$$

$$Z^4(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z(p_0) : a^1 \geq 0, a^2 \leq 0\} \text{ («правое нижнее»).}$$

Каждое звено $Z^\alpha(p_0)$ ($\alpha = 1, 2, 3, 4$) имеет две грани: грань $Z_1^\alpha(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z^\alpha(p_0) : a^1 = 0\}$, ортогональную e_1 , и $Z_2^\alpha(p_0) \stackrel{def}{=} \{a \in Z^\alpha(p_0) : a^2 = 0\}$, ортогональную e_2 .

Назовем S -многообразие M цилиндрическим, если все особенности относятся только к типу II (или только к типу II'), и тороидным, если все особые точки принадлежат типу III.

В тороидном случае паре векторов e_1^0 и e_2^0 репера e_i^0 в особой точке p_0 сопоставим ломаную геодезическую (контур) $\Gamma_+(p_0, e_1, e_2) \equiv (p_{4k}, p_{4k+1}, p_{4k+2}, p_{4k+3}, \dots)_{(e_1, e_2)}$ ($k = 0, 1, 2, \dots$) следующим образом. Соседние вершины p_r и p_{r+1} ломаной являются соседними особыми точками Γ -поля. Пусть первые r звеньев уже построены. Будем обозначать далее через $(p_0, \dots, p_r)_{(e_1, e_2)}$ геодезическую ломаную из этих r звеньев и через e_i^r векторы ортонормированного репера в точке p_r , полученного параллельным переносом векторов e_i^0 вдоль ломаной $(p_0, \dots, p_r)_{(e_1, e_2)}$. Положим $r = 4k$. Отрезок плюс-геодезической $\gamma_{e_2^{4k}} : [0, c_+^{4k}] \rightarrow M$ с начальным значением (p_{4k}, e_1^{4k}) , соединяющий точку p_{4k} с ее «правым плюс-

соседом» p_{4k+1} , будет $(4k+1)$ -ым звеном контура $\Gamma_+(p_0, e_1, e_2)$. Минус-геодезическая $\gamma_{e_2^{4k+1}} : [0, c_-^{4k+1}] \rightarrow M - (4k+2)$ -ое звено с вершинами в особых точках p_{4k+1} и p_{4k+2} . Плюс-геодезическая $\gamma_{e_1^{4k+2}} : [0, c_+^{4k+2}] \rightarrow M$ $(4k+3)$ -ое звено с началом p_{4k+2} и концом p_{4k+3} . Минус-геодезическая $\gamma_{e_2^{4k+3}} : [0, c_-^{4k+3}] \rightarrow M$ $(4k+4)$ -ое звено с вершинами p_{4k+3} и p_{4k+4} . Определение контура $\Gamma_+(p_0, e_1, e_2)$ этим завершено.

Рассмотрим объединение элементарных звеньев $W_{+1} \stackrel{def}{=} Z^1(p_0) \cup Z^2(p_{+1}) \cup Z^3(p_{+2}) \cup Z^4(p_{+3})$. Так, мы получаем первый «виток» W_{+1} , затем $W_{+2} \stackrel{def}{=} Z^1(p_4) \cup Z^2(p_5) \cup Z^3(p_6) \cup Z^4(p_7)$ – второй, W_{+3} – третий и т.д. Объединение $H_+^1(p_0) \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z_+} W_r$

назовем плюс-правым верхним S -геликоидом. Аналогично контуру $\Gamma_+(p_0, e_1, e_2)$ определен контур $\Gamma_-(p_0, e_2, e_1) \equiv (p_{-4k}, p_{-4k-1}, p_{-4k-2}, p_{-4k-3}, \dots)$ ($k = 0, +1, +2, \dots$). Особенность p_{-4k-1} – «верхний минус-сосед» особой точки p_{-4k} , особенность p_{-4k-2} – «правый плюс-сосед» p_{-4k-1} , особенность p_{-4k-3} – «нижний минус-сосед» p_{-4k-2} , особенность p_{-4k-4} – «левый плюс-сосед» p_{-4k-3} . Строим витки $W_k \stackrel{def}{=} Z^1(p_{-4k}) \cup Z^4(p_{-4k-1}) \cup Z^3(p_{-4k-2}) \cup Z^2(p_{-4k-3})$ ($k = 1, 2, \dots$) и составляем из них минус-правый верхний S -геликоид:

$H_-^1(p_0) \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z_+} W_r$. Объединение $H^1(p_0) \stackrel{def}{=} H_+^1(p_0) \cap H_-^1(p_0)$ назовем правым верхним S -геликоидом, а особенности $p_{\pm r}$ – его вершинами (или узлами); p_0 – «центр»

$H^1(p_0)$. Далее определяем: $H^2(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1^0) H^1(p_0)$ – левый верхний S -геликоид, $H^3(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_2^0) H^2(p_0)$ – левый нижний S -геликоид, $H^4(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1^0) H^3(p_0) \equiv \text{sym}(p_0, e_2^0) H^1(p_0)$ – правый нижний S -геликоид. Объединение $C(p_0) \stackrel{def}{=} \bigcup_{\alpha=1}^4 H^\alpha(p_0)$ назовем S -клеткой.

Замечание. S -геликоиды $H_\pm^\alpha(p_0)$ - (плюс- и минус-) части S -геликоидов $H^\alpha(p_0)$ (при $\alpha = 2, 3, 4$) определяются очевидным образом.

Итак, мы определили S -клетку в тороидном случае.

Займемся теперь цилиндроидным. Для определенности будем считать, что все особенности относятся к типу (II). Контур $\Gamma_+(p_0, e_1, e_2)$ состоит из двух звеньев: плюс-геодезической $\gamma_{e_1^0} : [0, c_{(0,+1)}] \rightarrow M$, соединяющей точку p_0 с ее правым плюс-соседом особенностью p_{+1} , и минус-геодезической – луча $\gamma_{e_2^1} : [0, \infty] \rightarrow M$ с началом в точке p_{+1} . Контур $\Gamma_-(p_0, e_1, e_2)$ вырождается в минус-геодезическую – луч $\gamma_{e_2^0} : [0, +\infty] \rightarrow M$ с началом в p_0 .

Имеем S -геликоиды: $H_+^1(p_0) \stackrel{def}{=} Z^1(p_0) \cup Z^2(p_{+1}), H_-^1(p_0) \stackrel{def}{=} Z^1(p_0), H^1(p_0) \stackrel{def}{=} H_+^1(p_0) \cup H_-^1(p_0) = Z^1(p_0) \cup Z^2(p_{+1}); H^2(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1) H^1(p_0), H^3(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1)$

$H^2(p_0), H^4(p_0) \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1) H^3(p_0) \cong \text{sym}(p_0, e_2), H^1(p_0)$. Полагая $p_{+1}^2 \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1) p_{+1}$,

определяем, наконец, S -клетку $C(p_0) \stackrel{def}{=} \bigcup_{\alpha=1}^4 H^\alpha(p_0) = Z(p_0) \cup Z^2(p_{+1}) \cup Z^1(p_{+1}^2) \cup Z^4(p_{+1}^2)$.

Далее наряду с термином S -многообразия используется термин S -клеточное многообразие.

2. Типы тороидных клеток. Классификационная теорема

Объединение $\bigcup_{r=1}^k W_r (k > 0)$, состоящее из k витков W_r S -геликоида $H^1(p_0)$, назовем:

циклом, если $p_{4k} = p_0$; полным циклом, если, кроме того, $e_i^{4k} = e_i^0 (i = 1, \dots, n = \dim M)$.

Символами $\Sigma^{1(4k)}$ и $\bar{\Sigma}^{1(4k)}$ будем обозначать цикл и полный цикл, соответственно.

Замечание. Мыслимый случай $p_{4k+s} = p_0$ легко устраняется для $s = 1, 3$. Случай же $s = 2$ требует дополнительного анализа и в этой работе исключен из рассмотрения.

Предложение. Если S -геликоид $H^1(p_0)$ допускает цикл $\Sigma^{1(4k)}$, то либо $e_i^{4k} = e_i^0$, либо $e_i^{4k} = -e_i^0 (i = 1, \dots, n)$.

Докажем сначала, что $\text{Sym}(p_0, e_j^0) (j = 1, \dots, n)$ задается одной и той же матрицей как в базисе e_i^0 , так и в базисе e_i^{4k} . При $j = 3, \dots, n$ это видно из формул стыковки $A_{1(2)}^{+(-)}$ при $j = 1, 2$ – следует из S_3 . Действительно, возьмем, к примеру, $\text{Sym}(p_0, e_1^0)$. Согласно S_3 , имеем: $S_{p_{4r} p_{4r+1}}^+ = S_{p_{4r+3} p_{4r+2}}^+$ любого целого $r \geq 0$, т.е. $\text{Sym}(p_{4r+1}, e_1^{4r+1}) = \text{Sym}(p_{4r}, e_1^{4r}) = \text{Sym}(p_{4r+2}, e_1^{4r+2}) = \text{Sym}(p_{4r+3}, e_1^{4r+3})$. Опять-таки из формул стыковки вытекает, что $\text{Sym}(p_{4r+1}, e_1^{4r+1}) = \text{Sym}(p_{4r+2}, e_1^{4r+2})$ и $\text{Sym}(p_{4r+3}, e_1^{4r+3}) = \text{Sym}(p_{4r+4}, e_1^{4r+4})$. Следовательно, $\text{Sym}(p_{4r}, e_1^{4r}) = \text{Sym}(p_{4r+4}, e_1^{4r+4})$. Отсюда получаем: $\text{Sym}(p_0, e_1^0) = \text{Sym}(p_{4k}, e_1^{4k})$. Аналогично $\text{Sym}(p_0, e_1^0) = \text{Sym}(p_{4k}, e_2^{4k})$.

Итак, упомянутые в начале доказательства матрицы совпадают, что равносильно соотношениям: $e_i^{4k} = \varepsilon_i e_i^0 (\varepsilon_i = \pm 1, i = 1, \dots, n)$.

Можно проверить, что $A_0 = A_{4k}$, причем как A_0 , так и A_{4k} – матрицы одного и того же собственного вращения φ_0 пространства M_{p_0} . Поэтому $A_0 T = T A_{4k}$, где T – матрица перехода

от базиса e_i^0 к базису e_i^{4k} . Отсюда следу-

ет:
$$\begin{pmatrix} ch\alpha_0 & sh\alpha_0 \\ sh\alpha_0 & ch\alpha_0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ch\alpha_0 & sh\alpha_0 \\ sh\alpha_0 & ch\alpha_0 \end{pmatrix},$$

и $\varepsilon_1 = \varepsilon_2$. Совершенно аналогично показывается, что $\varepsilon_i = \varepsilon_1$ и при $i = 3, \dots, n$.

Резюмируя изложенное, приходим (в тороидном случае) к следующей классификационной теореме, в которой случай цикла, состоящего из полуцелого числа витков, исключен из рассмотрения.

Теорема 1. Для каждой особенности p_0 Γ -поля A в A -полном псевдоримановом клеточном многообразии (M, dS^2) клетка $C(p_0)$ либо ациклична (бесконечна), либо S -геликоид $H^1(p_0)$ допускает цикл $\Sigma^{1(4k)} \subset H^1(p_0)$ с наименьшим числом $k (> 0)$ витков, причем возникают две возможности:

1) клетка состоит из четырех S -геликоидов $H^\alpha(p_0) = \bar{\Sigma}^{\alpha(4k)}$, $\alpha = 1, 2, 3, 4$ (при этом $e_i^{4k} = e_i^0$ для всех $i=1, \dots, n$);

2) клетка представляет собой пару S -геликоидов:

$$H^1(p_0) = H^3(p_0) = \bar{\Sigma}^{1(8k)} = \bar{\Sigma}^{3(8k)} = \Sigma^{1(4k)} \cup \Sigma^{3(4k)};$$

$$H^2(p_0) = H^4(p_0) = \bar{\Sigma}^{2(8k)} = \bar{\Sigma}^{4(8k)} = \Sigma^{2(4k)} \cup \Sigma^{4(4k)},$$

(при этом $e_i^{4k} = -e_i^0$ для всех $i = 1, \dots, n$).

3. Шифры S -геликоидов и S -клетки (тороидный случай)

Договоримся далее всюду называть зоной (особой точки Γ -поля A (M, dS^2)), подзоной, элементарным звеном, S -геликоидом и S -клеткой соответствующие объекты, наделенные индуцированной метрикой (– сужением метрики dS^2) и Γ -полем (– сужением A).

Под шифром какого-либо объекта (S -геликоида или S -клетки) будем понимать его краткое (символическое) описание, эквивалентное (изоморфное) самому объекту. При этом эквивалентность означает возможность синтеза (см. далее п. 3) объекта по его шифру. Так, например: шифр S -геликоида состоит из перечня элементарных звеньев с указанием порядка их соединения и описания связей между звеньями; шифр S -клетки – из шифров S -геликоидов, ее составляющих, и связей между ними.

Переходя непосредственно к шифрам, начнем с перечней звеньев, составляющих S -геликоиды $H^\alpha(p_0)$ ($\alpha = 1, 2, 3, 4$). При этом ограничимся наиболее сложным случаем клетки, состоящей из двух циклических геликоидов $H^1(p_0) \equiv H^3(p_0)$ и $H^2(p_0) = H^4(p_0)$ (см.

теорему 1). Введем обозначения: $p_r^1 \stackrel{def}{=} p_r$, $p_r^2 \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1)p_r^1$, $p_r^3 \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_2)p_r^2$ и $p_r^4 \stackrel{def}{=} \text{sym}(p_0, e_1)p_r^3$ ($r \in \mathbb{Z}$).

Звенья $H_+^1(p_0) : (Z^1(p_0), \dots, Z^1(p_{4r}), Z^2(p_{4r+1}), Z^3(p_{4r+2}), Z^4(p_{4r+3}), \dots, Z^1(p_{8k}))$; звенья $H_+^2(p_0) : (Z^2(p_0^2), \dots, Z^2(p_{4r}^2), Z^1(p_{4r+1}^2), Z^4(p_{4r+2}^2), Z^3(p_{4r+3}^2), \dots, Z^2(p_{8k}^2))$; звенья $H_+^3(p_0) : (Z^3(p_0^3), \dots, Z^3(p_{4r}^3), Z^4(p_{4r+1}^3), Z^1(p_{4r+2}^3), Z^2(p_{4r+3}^3), \dots, Z^3(p_{8k}^3))$; звенья $H_+^4(p_0) : (Z^4(p_0^4), \dots, Z^4(p_{4r}^4), Z^3(p_{4r+1}^4), Z^2(p_{4r+2}^4), Z^1(p_{4r+3}^4), \dots, Z^4(p_{8k}^4))$ ($r = 0, 1, 2, 2k-1$).

Перечни звеньев S -геликоидов $H_-^\alpha(p_0)$ получаются из перечней $H_+^\alpha(p_0)$ обращением порядка записи в них элементарных звеньев.

Прежде чем заняться выявлением «связей», напомним, что в каждой из точек p_r^α ($\alpha = 1, 2, 3, 4; r \in \mathbb{Z}$) фиксирован ортонормированный репер $e_i^{(\alpha, r)}$, а в соответствующих зонах

$Z(p_r^\alpha)$ – нормальные координаты $\alpha_{(\alpha,r)}^i$; на подзонах $Z_\varepsilon(p_r^\alpha)$ – полярные координаты $t_\varepsilon^{(\alpha,r)}$ и $\alpha_{(\alpha,r)}^{*i}$, определены пары нечетных периодических с полупериодом $c_\varepsilon^{(\alpha,r)}$ функций $f_\varepsilon^{(\alpha,r)}(t_\varepsilon^{(\alpha,r)}) = dp_\varepsilon^{(\alpha,r)}/dt_\varepsilon^{(\alpha,r)}$, где $p_\varepsilon^{(\alpha,r)}$ ($\varepsilon = \pm 1$) – функции теоремы 1.

Имеем «связи»:

$$\left. \begin{aligned} f_\pm^{(\alpha,\pm 2r)}(c_\mp^{(\alpha,\pm 2r)}-t_\pm) &= -f_\pm^{(\alpha,\pm(2r+1))}(t_\pm), \\ f_\pm^{(\alpha,\pm(2r+1))}(c_\mp^{(\alpha,\pm(2r+1))}-t_\mp) &= -f_\mp^{(\alpha,\pm(2r+2))}(t_\mp) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

для $t_\pm \in R, t \in R$ и целых $r \geq 0$. При этом $c_\pm^{(\alpha,\pm 2r)} = c_\pm^{(\alpha,\pm(2r+1))}, c_\mp^{(\alpha,\pm(2r+1))} = c_\mp^{(\alpha,\pm(2r+2))}$.

Переходим далее к шифру клетки.

Имеем «связи»: $p_0^1 = p_0^\alpha$ ($\alpha = 2, 3, 4$), $p_1^1 = p_1^4, p_1^2 = p_1^3, p_{-1}^1 = p_{-1}^2, p_{-1}^3 = p_{-1}^4$.

Далее, с одной стороны, $-p_r^2 = \text{sym}(p_0, e_1)p_r^1$, с другой $-p_1^1 = S_{p_1^2 p_0}^+ p_1^2$. Пользуясь

соображениями, аналогичными методу «наложения» элементарной геометрии, получаем:

$p_2^1 = S_{p_1^2 p_0}^+ p_1^2$. Согласно $S_3, S_{p_2^2 p_3^2}^+ = S_{p_1^2 p_0}^+$. Следовательно, $p_3^2 = p_3^1$ и, поскольку векторы

$e_i^{(2,3)}$ и $e_i^{(1,3)}$ – по построению получаются параллельными переносами из точек p_2^2 и p_2^1 соответствующих векторов $e_i^{(2,2)}$ и $e_i^{(1,2)}$, а последние соответствуют друг другу по S^+ , то в

результате параллельного переноса их в точку $p_3^1 = p_3^2$ получим одни и те же значения e_i в этой точке: $e_i^{(2,3)} = e_i^{(1,3)}$. Далее, $p_4^2 = p_4^1, e_i^{(2,4)} = e_i^{(1,4)}$. Итерация (на первом ее шаге роль p_0 играет $p_4^1 = p_4^2$) дает связи:

$$\left. \begin{aligned} p_{4r+3}^2 &= p_{4r+3}^1, e_i^{(2,4r+3)} = e_i^{(1,4r+3)}, \\ p_{4r}^2 &= p_{4r}^1, e_i^{(1,4r)} = e_i^{(1,4r)}. \end{aligned} \right\}$$

Очевидно, что совпадение точек $p_r^\alpha = p_r^\beta$ означает также совпадение зон $Z(p_r^\alpha) = Z(p_r^\beta)$ (вместе с заданными на них метриками и Γ -полями). Отсюда следует совпадение функций $f_\varepsilon^{(\alpha,r)} = f_\varepsilon^{(\beta,r')}$. Договоримся далее связи, записанные двумя равенствами $p_r^\alpha = p_r^\beta$ и $e_i^{(\alpha,r)} = e_i^{(\beta,r')}$, обозначать тождеством: $Z(p_r^\alpha) \equiv Z(p_r^\beta)$. Таким образом, полученные ранее в результате итерации связи принимают вид:

$$Z(p_{4r+3}^2) \equiv Z(p_{4r+3}^1), Z(p_{4r}^2) \equiv Z(p_{4r}^1). \quad (2)$$

Аналогично получаются связи:

$$Z(p_{4r}^3) \equiv Z(p_{4r}^2), Z(p_{4r+1}^3) \equiv Z(p_{4r+1}^2), \quad (3)$$

$$Z(p_{4r}^4) \equiv Z(p_{4r}^3), Z(p_{4r+3}^4) \equiv Z(p_{4r+3}^3), \quad (4)$$

$$Z(p_{4r}^1) \equiv Z(p_{4r}^4), Z(p_{4r+1}^1) \equiv Z(p_{4r+1}^4), \quad (5)$$

причем $0 < r \leq 2k - 1$. Для $r < 0$ получаются совершенно аналогичные формулы (2)–(5), ко-

торые выписывать не будем. Если $(d, n - d)$ – сигнатура нашего клеточного пространства, то $S^+ = id$ при $d > 1$, $S^- = id$ при $n - d > 1$.

В случае произвольных тороидных S -клеток имеют место также связи:

$$\left. \begin{aligned} S^+ \left(Z \left(p_{4r+1}^2 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+1}^1 \right), \\ S^+ \left(Z \left(p_{4r+2}^2 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+2}^1 \right), \\ S^+ \left(Z \left(p_{4r+2}^3 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+2}^4 \right) \quad (r \in Z), \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} S^- \left(Z \left(p_{4r+2}^1 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+2}^4 \right), \\ S^- \left(Z \left(p_{4r+2}^2 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+2}^3 \right), \\ S^- \left(Z \left(p_{4r+3}^1 \right) \right) &\equiv Z \left(p_{4r+3}^4 \right) \quad (r \in Z), \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Выпишем, наконец, связи, обусловленные цикличностью (размерность любая):

$$\left\{ \begin{aligned} Z(p_{8k}^1) &\equiv Z(p_0), \quad Z(p_{-r}^\alpha) \equiv Z(p_{8k-r}^\alpha) \quad (\alpha=1, 2, 3, 4; r=0, \dots, 8k), \\ Z(p_{4k}^1) &\equiv Z(p_0), \quad e_i^{4k} = -e_i^0, \\ Z(p_{4k+r}^1) &\equiv Z(p_r^3), \quad e_i^{(1,4k+r)} = -e_i^{(3,r)}, \\ Z(p_{4k+r}^3) &\equiv Z(p_r^1), \quad e_i^{(3,4k+r)} = -e_i^{(1,r)}, \\ Z(p_{4k+r}^2) &\equiv Z(p_r^4), \quad e_i^{(2,4k+r)} = -e_i^{(4,r)}, \\ Z(p_{4k+r}^4) &\equiv Z(p_r^2), \quad e_i^{(4,4k+r)} = -e_i^{(2,r)}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где $i = 1, \dots, n; r = 0, \dots, 4k$.

Из связей (1)–(7) следует, что в двумерном случае узлы клетки $C(p_0)$ естественно делятся на внутренние p_{4r}^α (при любом целом r) и граничные (остальные); из последних выделяются угловые $p_{\pm(4r+2)}^\alpha$ ($r > 0$). Грани также делятся на внутренние (сходящиеся к p_{4r}^α) и внешние (сходящиеся к $p_{\pm(4r+2)}^\alpha$).

Границу клетки $C(p_0)$ можно представить в виде объединения $FrC(p_0) = FrD \cup FrG \cup FrB \cup FrF$,

где «правая граница» $FrD \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z} \{Z_1^3(p_{4r+2}^1) \cup Z_1^{(2,3)}(p_{4r+1}^1) \cup Z_1^2(p_{4r+2}^4)\}$;

«левая граница» $FrG \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z} \{Z_1^4(p_{4r+2}^2) \cup Z_1^{(1,4)}(p_{4r+1}^2) \cup Z_1^1(p_{4r+2}^3)\}$,

«верхняя граница» $FrF \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z} \{Z_2^4(p_{4r+2}^2) \cup Z_2^{(3,4)}(p_{4r+3}^1) \cup Z_2^3(p_{4r+2}^1)\}$;

и «нижняя граница» $FrB \stackrel{def}{=} \bigcup_{r \in Z} \{Z_2^1(p_{4r+2}^3) \cup Z_2^{(1,2)}(p_{4r+3}^3) \cup Z_2^2(p_{4r+2}^4)\}$.

Замечание. $Z^{(2,3)} \stackrel{def}{=} Z^2 \cup Z^3$ и т.д. Напомним также, что Z_i^α ($\alpha = 1, 2, 3, 4; i = 1, 2$)

грань звена Z^α , ортогональная вектору e_i .

**4. Построение клетки и клеточного псевдориманова многообразия.
Теорема существования**

4.1. Построение клетки

Так же, как при выписывании шифров, и здесь ограничимся случаем тороидной клетки с двумя циклическими геликоидами $H^1(p_0) \cong H^3(p_0)$ и $H^2(p_0) \cong H^4(p_0)$ (случаем наиболее сложным и интересным).

Пусть E – псевдоевклидово пространство сигнатуры $(d, n - d)$ ($0 < d < n = \dim E$), \check{e}_i – ортонормированный репер в E , причем $\check{e}_1^2 = 1, \check{e}_2^2 = -1$ и \check{p} – фиксированная точка из E . Рассмотрим счетный набор троек $(E_r^\alpha, \check{e}_r^{(\alpha,r)} \check{p}_r^\alpha), \alpha = 1, 2, 3, 4; r \in \mathbb{Z}$. Для каждой тройки определены нормальные $\alpha_{(\alpha,r)}^i$ и полярные $t_\varepsilon^{(\alpha,r)}, a_{(\alpha,r)}^{*i}$ координаты. С помощью двух четных периодических (с полупериодом $c_\varepsilon^{(\alpha,r)}$) функций $\rho_\varepsilon^{(\alpha,r)}$ определены абстрактные зоны – многообразия $\check{Z}(\check{p}_r^\alpha) = \check{Z}_{+1}(\check{p}_r^\alpha) \cup \text{Con } \check{p}_r^\alpha \cup \check{Z}_{-1}(\check{p}_r^\alpha) \setminus \text{Con } \check{p}_r^\alpha = \{a \in E_r^\alpha : \langle a, a \rangle = 0\}, \check{Z}_\varepsilon(\check{p}_r^\alpha = \{a \in E_r^\alpha : 0 < (t_\varepsilon^{(\alpha,r)})^2 = \varepsilon \langle a, a \rangle < (c_\varepsilon^{(\alpha,r)})^2\}$ вместе с псевдоримановой метрикой dS^2 и Γ -полем A на $\check{Z}(\check{p}_r^\alpha) : A^i_{,j} = \Phi \delta^i_j$.

Известным нам образом мы представляем зону $\check{Z}(\check{p}_r^\alpha)$ как объединение четырех элементарных звеньев $\check{Z}^\beta(\check{p}_r^\varepsilon)$ ($\beta = 1, 2, 3, 4$).

Начинаем построение абстрактного (пока) S -геликоида $\check{H}^1(\check{p}_0)$ по его шифру, который записывается так же, как и шифр «натуральный». Не выписывая здесь шифра $\check{H}^1(\check{p}_0)$, будем отличать его от шифра «натурального» $\check{H}^1(\check{p}_0)$ лишь употреблением значка « \cup », который подчеркивает специфику принятой сейчас точки зрения.

Обозначим через $\check{Z}_{e_i}(\check{p}_r^\alpha)$ содержащую вектор $\check{e}_i^{(\alpha,r)}$ компоненту связности открытого множества $\check{Z}(\check{p}_r^\alpha) \setminus \text{Con } \check{p}_r^\alpha$. В порядке, предусмотренном шифром, составим $\check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1) \cup \check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1)$. Формулы стыковки $A_{1(2)}^{(\pm)}$, в которых a и a' относятся к $\check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1)$ и $\check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1)$, представляют собою изометрию $\Phi_{4r \rightarrow 4r+1}^{+(1)} : \check{Z}_{e_1}(\check{p}_{4r}^1) \rightarrow \cap \check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1) \check{Z}_{-e_1}(\check{p}_{4r+1}^1) \cap \check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1)$.

Предполагается, что функции $f_\varepsilon^{(\alpha,r)} = d\rho_\varepsilon^{(\alpha,r)} / dt_\varepsilon^{(\alpha,r)}$ соответствуют шифру \check{H}^1 .

Аналогично имеем изометрии:

$$\Phi_{4r+1 \rightarrow 4r+2}^{+(1)} : \check{Z}_{e_2}(\check{p}_{4r+1}^1) \cap \check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1) \rightarrow \check{Z}_{e_2}(\check{p}_{4r+2}^1) \cap \check{Z}^3(\check{p}_{4r+2}^1),$$

$$\Phi_{4r+2 \rightarrow 4r+3}^{+(1)} : \check{Z}_{-e_1}(\check{p}_{4r+2}^1) \cap \check{Z}^3(\check{p}_{4r+2}^1) \rightarrow \check{Z}_{e_1}(\check{p}_{4r+3}^1) \cap \check{Z}^4(\check{p}_{4r+3}^1),$$

$$\Phi_{4r+3 \rightarrow 4r+4}^{+(1)} : \check{Z}_{-e_2}(\check{p}_{4r+3}^1) \cap \check{Z}^4(\check{p}_{4r+3}^1) \rightarrow \check{Z}_{e_2}(\check{p}_{4r+4}^1) \cap \check{Z}^1(\check{p}_{4r+4}^1).$$

Наконец, строим геликоид \check{H}_+^1 как результат трех последовательных факторизаций.

Во-первых, несвязное псевдориманово многообразие (с краем) $\check{H}_+^{1 \text{ def } 2k-1} \cup_{r=0} \{ \check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1) \cup \check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1) \cup \check{Z}^3(\check{p}_{4r+2}^1) \cup \check{Z}^4(\check{p}_{4r+3}^1) \cup \check{Z}^1(\check{p}_{4r+4}^1) \}$ факторизуем по изометриям $\Phi^+(1)$.

Во-вторых, получая неполный цикл $\check{\Sigma}^{1(4k)}$, осуществляем факторизацию (см. связи (C)): $\check{Z}(\check{p}_{4k}^1) \equiv \check{A} \check{p}_0^1, \check{e}_i^{4k} = \check{e}_i^0$.

В-третьих, замыкая полный цикл $\check{\Sigma}^{-1(8k)}$, факторизуем результат (предыдущих двух факторизаций) изометрией (см. связи (C)): $\check{Z}(\check{p}_{8k}^1) \equiv \check{Z}(\check{p}_0^1)$. В итоге получаем связное псевдориманово многообразие с краем $\check{H}_+^1 = \bigcup_{r=0}^{2k-1} \{ \check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1) \cup \check{Z}^2(\check{p}_{4r+1}^1) \cup \check{Z}^3(\check{p}_{4r+2}^1) \cup \check{Z}^4(\check{p}_{4r+3}^1) \cup \check{Z}^1(\check{p}_{4r+4}^1) \}$, где через $\check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1), \dots, \check{Z}^1(\check{p}_{4r+4}^1)$ обозначены полученные в результате указанных факторизаций классы эквивалентности с представителями $\check{Z}^1(\check{p}_{4r}^1), \dots, \check{Z}^1(\check{p}_{4r+4}^1)$, соответственно. Аналогично строим $\check{H}_+^2, \check{H}_+^3, \check{H}_+^4$. После этого переходим к построению абстрактной (пока) клетки $\check{C}(p_0)$, предполагая, что функции $f_\varepsilon^{(\alpha, r)} = d\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)} / dt_\varepsilon^{(\alpha, r)}$ подобраны в соответствии с шифром $\check{C}(p_0)$, который (если пренебречь значком « \cup ») совпадает с шифром «натуральной» клетки $C(p_0)$. Факторизуем объединение $\bigcup_{\alpha=1}^4 H_+^\alpha$ по связям $(B_1) - (B_4)$ (а в надлежащих случаях еще по связям (B_5) , (B_6) и по связям (C) (тем, которые еще не использованы). Обозначим через $H_\pm^\alpha(p_0)$ результат факторизации \check{H}_\pm^α по связям (B) и (C); заметим, что в силу связей $Z(\check{p}_r^\alpha) \equiv Z(\check{p}_{8k-r}^\alpha): H^\alpha(p_0) = H_+^\alpha(p_0) = H^-^\alpha(p_0)$. В результате получаем связное псевдориманово многообразие (вообще говоря, с краем): $\check{C}(p_0) \stackrel{\text{def}}{=} \bigcup_{\alpha=1}^4 H^\alpha(p_0)$, которое имеет тот же шифр, что и клетка $\check{C}(p_0)$ в рассматриваемом нами случае: $H^1(p_0) = H^3(p_0) = \check{\Sigma}^{-1(8k)} \equiv \check{\Sigma}^{-3(8k)}; H^2(p_0) = H^4 = \check{\Sigma}^{-2(8k)} \equiv \check{\Sigma}^{-4(8k)}$.

Следует отметить, что в силу связей (A), (B) и (C) каждая из симметрий: $\text{sym}(\check{p}_{4r}^\alpha, e_1): Z(\check{p}_{4r}^1) \rightarrow Z(\check{p}_{4r}^\alpha)$ ($\alpha = 1, 2, 3, 4$), $\text{sym}(\check{p}_{4r+3}^1, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+3}^2, e_1): Z^{(3,4)}(\check{p}_{4r+3}^1) \rightarrow Z^{(3,4)}(\check{p}_{4r+3}^2)$ и $\text{sym}(\check{p}_{4r+3}^3, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+3}^4, e_1): Z^{(1,2)}(\check{p}_{4r+3}^3) \rightarrow Z^{(1,2)}(\check{p}_{4r+3}^4)$ допускает единственное продолжение на всю клетку $\check{C}(p_0)$, которое будем обозначать так же, как и соответствующую исходную симметрию; при этом:

$$\text{sym}(\check{p}_0, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r}^\alpha, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+3}^\alpha, e_1) \tag{9}$$

для $\alpha = 1, 2, 3, 4$ и $r \in \mathbb{Z}$.

Замечание. $p_{4r}^\alpha = p_{4r}^1, p_{4r+3}^1 = p_{4r+3}^2, p_{4r+3}^3 = p_{4r+3}^4, Z^{(3,4)} \stackrel{\text{def}}{=} Z^3 \cup Z^4$ и т.д.

4.2. Построение клеточного многообразия

Представим себе множество идентичных экземпляров клетки с центрами $p_0^{(l,m)}$ ($l, m \in \mathbb{Z}$). Каждая клетка дважды ориентирована – имеет правую, левую, верхнюю и нижнюю границы. В двумерном случае правую границу клетки $\check{C}^{(l,m)} = \check{C}(p_0^{(l+1,m)})$ склеим с левой границей клетки $C^{(l+1,m)}$, верхнюю границу клетки $\check{C}^{(l,m)}$ – с нижней границей $\check{C}^{(l,m+1)}$ ($l, m \in \mathbb{Z}$); при этом склеиваем точки границ, имеющие одинаковые нормальные координаты (которые определены вместе с базисом $e_i^{(\alpha,r)}$ в вершине каждого звена). В результате получаем псевдориманово многообразие $(M = \bigcup_{l,m \in \mathbb{Z}} \check{C}^{(l,m)}, dS^2)$, состоящее из склеенных клеток, за которыми мы сохраняем их исходные обозначения. (Числа l и m играют роль целочисленных «декартовых» координат клетки $\check{C}^{(l,m)}$ в M).

На M определено (векторное) Γ -поле $A: A|_{Z(p_r^\alpha)} = \text{grad } \rho^{(\alpha,r)}$. Само (M, dS^2) – A -полно.

Естественное (каноническое) отображение произвольной клетки $\check{C}^{(l_1, m_1)}$ на (идентичную!) клетку $\check{C}^{(l_2, m_2)}$ обозначим через $\check{S}^{+(l_1, l_2)} \check{S}^{-(m_1, m_2)}$ (при этом точки переходят в гомологичные им точки). При фиксированных разностях $l = l_2 - l_1$ и $m = m_2 - m_1$ всевозможные $\check{S}^{+(l_1, l_2)} \check{S}^{-(m_1, m_2)}$ определяют некоторое отображение $\check{S}^{+l} \check{S}^{-m}: M \rightarrow M$, являющееся движением, следующим образом: $p \rightarrow \check{S}^{+l} \check{S}^{-m}(p) \stackrel{\text{def}}{=} \check{S}^{+(l_1, l_1+l)} \check{S}^{-(m_1, m_1+m)}(p)$, если $\check{C}^{(l_1, m_1)}$ клетка, содержащая (наперед заданную) точку $p \in M$. Отображение $\check{S}^{+l} \check{S}^{-m}$ будем обозначать через \check{S}^{+l} при $m = 0$ и через \check{S}^{-m} при $l = 0$. Положим также $\check{S}^{+} \stackrel{\text{def}}{=} \check{S}^{+1}$ и $\check{S}^{-} \stackrel{\text{def}}{=} \check{S}^{-1}$. Очевидно: $\check{S}^{+l} \check{S}^{-m} = (\check{S}^{+})^l \times (\check{S}^{-})^m = (\check{S}^{-})^m \times (\check{S}^{+})^l$. Итак, множество $G \stackrel{\text{def}}{=} \{(\check{S}^{+})^l \times (\check{S}^{-})^m : l, m \in \mathbb{Z}\}$ является абелевой группой движений псевдориманова пространства (M, dS^2) .

Пусть далее p_0 – центр произвольной клетки $\check{C}^{(l_0, m_0)}$ (мы опускаем индексы l_0 и m_0 в обозначении центра) и $\phi = \text{sym}(p_0, e_1)$. Нетрудно распространить ϕ на все многообразие M . Для любой клетки $\check{C}^{(l_0+l, m)}$ ($\check{C}^{(l_0+l, m)} = \check{C}(p_0^{(l_0+l, m)})$) полагаем

$$\phi|_{\check{C}^{(l_0+l, m)}} \stackrel{\text{def}}{=} (\text{sym}(p_0^{(l_0+l, m)}, e_1)) \times (\check{S}^{+})^{2l} \Big|_{\check{C}^{(l_0+l, m)}} \tag{10}$$

Необходимо отметить, что одновременно распространяются на все M и соотношения (9).

Пусть, далее, p_r^α – соответствующая вершина (особенность) клетки $\check{C}^{(l_0, m_0)}$. Каждая из симметрий $\text{sym}(\check{p}_{4r+1}^2, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+1}^3, e_1)$, $\text{sym}(p_{4r+2}^2, e_1)$ и $\text{sym}(p_{4r+2}^3, e_1)$ преобразует соседние клетки $\check{C}^{(l_0-1, m_0)}$ и $\check{C}^{(l_0, m_0)}$ друг в друга, причем

$$\text{sym}(p_1^2, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+1}^\alpha, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+2}^\alpha, e_1) \tag{11}$$

для $\alpha = 1, 2$ и $r \in \mathbb{Z}$.

Если положить $\phi \stackrel{\text{def}}{=} \text{sym}(p_1^2, e_1)$, то очевидно (наложение!):

$$\phi' = \phi \cdot (\check{S}^+) \Big|_{\check{C}^-(l_0-1, m_0)}. \quad (12)$$

Равенство (12) распространяет ϕ на все многообразие M .

Аналогично определяется $\phi'' = \text{sym}(\check{p}_1^1, e_1)$, причем

$$\text{sym}(\check{p}_1^1, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+1}^\alpha, e_1) = \text{sym}(\check{p}_{4r+2}^\alpha, e_1) \quad (13)$$

для $\alpha = 1, 4$ и $r \in \mathbb{Z}$.

Остается описать движение в M , определенное известным нам образом парой плюс-соседних особенностей p_1^2, p_0 :

$$S^+ = \text{sym}(p_0, e_1) \text{sym}(p_1^2, e_1). \quad (14)$$

Из (10) и (11) следует

$$S^+ = \check{S}^+. \quad (15)$$

Соотношения (9), (11), (13) и (15) показывают, что движение S^+ , определенное парой плюс-соседних особенностей, не зависит от этой пары в пределах наперед заданной клетки $\check{C}^-(l_0, m_0)$. Отсюда следует, что требование S_3 выполнено для построенного нами псевдориманова пространства применительно к S^+ . Аналогично оно проверяется и для S^- .

Выполнение требования S_1 следует из условий, в соответствии с которыми подбирались функции $\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)}$ [1]. Требование же S_3 выполнено очевидным образом.

Итак, доказана

Теорема 1. *Описанным ранее методом может быть построено клеточное тороидное двумерное псевдориманово многообразие с клетками любого из типов, перечисленных в классификационной теореме п. 2; при этом наименьшее число (k) витков, составляющих (в циклическом случае) цикл, можно задавать произвольным образом.*

Замечание 1. *В случае $n > 2$ (по крайней мере) одна из ε -псевдосфер связна, что приводит к значительным упрощениям в построении из клеток клеточного многообразия. Если, например, связна (-1) -псевдосфера (т.е. та, которая лежит в минус-области), то в клетке $C(p_0)$ верхняя и нижняя границы совпадают:*

$$\text{Fr}_F C_{(p_0)} = \text{Fr}_\beta C_{(p_0)} \quad (16)$$

и остается (в случае сигнатуры вида $(1, n-1)$) один бесконечный ряд клеток $C^x (x \in \mathbb{Z})$, центры которых p_0^x лежат на одной геодезической. При этом группа G S -движений зависит от одной образующей. В наиболее типичном для многомерных пространств случае сигнатуры $(d, n-d)$ при $d > 1$ и $n-d > 1$, кроме (16), имеет место и $\text{Fr}_G C_{(p_0)} = \text{Fr}_D C_{(p_0)}$. В этом случае S -клеточное псевдориманово пространство состоит из одной клетки (одно-клеточно!), а группа G тривиальна.

Теорема 2. *Могут быть построены клеточные тороидные псевдоримановы многообразия произвольной размерности и сигнатуры с клетками любого из типов, перечисленных в классификационной теореме п.2; при этом число (k) витков, составляющих цикл, можно считать произвольным.*

Доказательство при $n (= \dim M) > 2$ нетрудно провести, используя замечание 1.

Замечание 2. *При доказательстве теоремы 1 построено клеточное многообразие со свободной группой G S -движений, зависящих от двух образующих S^+ и S^- .*

Теорема 3 (существования). *Существуют три перечисленных в классификационной теореме п. 2, непустых класса клеточных тороидных псевдоримановых многообразий заданной размерности и сигнатуры; число (k) витков, образующих цикл, может быть произвольным.*

Для доказательства достаточно подобрать функции $\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)}$ ($\varepsilon = \pm 1; \alpha = 1, 2, 3, 4; r \in \mathbb{Z}$), обладающие свойствами, описанными в теореме 3 статьи [1], и удовлетворяющие соответствующим шифрам. Таковыми являются (в тороидном случае), например, функции $\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)}$, для которых $d\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)}/dt \stackrel{\text{def}}{=} \varepsilon s dt_\varepsilon$ при любых $\alpha = 1, 2, 3, 4$ и $r \in \mathbb{Z}$, где sd – эллиптическая функция Якоби (одна из двенадцати), соответствующая параметру $m = \frac{1}{2}(sd t_\varepsilon = sd(t_\varepsilon | \frac{1}{2}))$. Другим примером такого рода являются функции $\rho_\varepsilon^{(\alpha, r)} = \varepsilon s d^2 t_\varepsilon$. Заметим, что первый пример соответствует (в аналитическом случае) комплексной функции полюса $F(z)$, приведенной в [11].

Замечание. Случай цикла, состоящего из полуцелого числа витков, исключен из рассмотрения в теореме 3.

4.3. Клеточные пространства постоянной кривизны

Пусть M – многообразие постоянной кривизны $K \neq 0$ с индефинитной метрикой сигнатуры $(d, n - d)$. В окрестности каждой точки $p \in M$ определено Γ -поле A , траектории которых лежат на геодезических, проходящих через p , и которое может быть представлено уравнением Вейнгартена $\rho_\beta^\alpha = -K\rho\delta_\beta^\alpha$. Предположим, что A определено на M и в целом представлено таким уравнением. Тогда M – клеточное многообразие с особенностями второго типа (цилиндроидное). В самом деле, уравнение Вейнгартена вдоль траекторий A приобретает вид $d^2\rho_\varepsilon/dt^2 = -\varepsilon K\rho_\varepsilon$ ($\varepsilon = \pm 1$). Отсюда при $K > 0$ следует: $\rho_{+1} = \cos\sqrt{K}t$, $\rho_{-1} = \text{ch}\sqrt{K}t$; при $K < 0$: $\rho_{+1} = \text{ch}\sqrt{-K}t$, $\rho_{-1} = \cos\sqrt{K}t$ (равенства с точностью до скалярного множителя). Мы видим, что при $\varepsilon K < 0$ у p нет « ε -соседей», но имеются « $-\varepsilon$ -соседи». В общем случае (при $d > 1$ и $n - d = 1$) M одноклеточно, но в случае $d = 1$ (или $n - d = 1$) многоклеточность возможна, если $K < 0$ (или $K > 0$).

Последнее имеет место, например, для пространства де Ситтера 2-го рода ($K < 0$), которое состоит из бесконечного множества клеток, каждая из которых является пульсацией (или «вспышкой») трехмерного пространства Лобачевского. Пространство же 1-го рода де Ситтера ($K > 0$) одноклеточно; двум особенностям этой клетки соответствуют две трехмерные сферы, монотонно расширяющиеся в «прошлое» и «будущее», разумеется, особенности здесь, в отличие от модели Фридмана, являются лишь особенностями Γ -поля.

Библиографический список

1. **Игошин, В.А.** Клеточная структура псевдориманова пространства с геодезическим полем одномерных направлений // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011.
2. **Шапиро, Я.Л.** О геодезических полях многомерных направлений // Докл. АН СССР. 1941. Т. 32. № 4. С. 237–239.
3. **Шапиро, Я.Л.** Геодезические поля направлений и проективные системы путей // Математический сборник, 1955. Т. 36. Вып. 1. С. 125–148.
4. **Кручкович, Г.И.** О движениях в полуприводимых римановых пространствах // Успехи математических наук. 1957. Т. 12. № 6. С. 149–156.
5. **Каган, В.Ф.** Субпроективные пространства / В.Ф. Каган. – М.: Физматгиз, 1961. – 220 с.
6. **Levi-Civita, T.** Sulle Trasformazioni delle equazioni dinamiche // Ann. Mat. Pura ed appl. – Milano, ser. 2. 1896. V. 24. P. 255–300.
7. **Шапиро, Я.Л.** Геодезическое поле направлений в целом // Известия вузов. Математика. 1970. № 4. С. 103–111.

8. **Картан, Э.** Геометрия римановых пространств / Э. Картан. – М. – Л.: ОНТИ, 1930.
9. **Schur, F.** Uber den Zusammenhang der Raume constanten Krümmungsmasses mit den projectiven Raumen // Math. Ann. 1886. Т. 27. Р. 537–567.
10. **Солодовников, А.С.** Поллюсы псевдоримановых пространств / А.С. Солодовников, Н.Р. Камышанский // Известия АН СССР, Сер. Математика. 1975. Т. 39. № 5. С. 1093–1129.
11. **Камышанский, Н.Р.** Полуприводимые аналитические пространства «в целом» / Н.Р. Камышанский, А.С. Солодовников // Успехи математических наук. 1980. Т. 35. № 5. С. 3–51.
12. **Maebashi, T.** Vector fields and space forms // J. Fac. Sci. Hokkaido Univ. 1960. № 15. Р. 62–92.
13. **Ishihara, S.** On Riemannian manifolds admiting a concircular transformation / S. Ishihara, Y. Tashiro // Math. J. Okayama Univ. 1959. № 9. Р. 19–47.
14. **Tashiro, Y.** Complete Riemannian manifolds and some vector fields // Trans. Amer. Math. Soc. 1965. V. 117. № 5. Р. 251–275.
15. **Yano, K.** Concircular geometry. I, II, III, IV, V – Proc. Imp. Acad. Tokyo. 1940. V. 16. PP. 195–200, 354–360, 442–448, 505–511; *ibid.* 1942. V. 18. Р. 446–451.
16. **Bianchi, L.** Lexioni di Geometrie differenziale. V. II, part II. – Pisa, 1903.
17. **Игошин, В.А.** Особые точки геодезического поля / В.А. Игошин, Я.Л. Шапиро // Известия вузов. Математика. 1984. № 9. С. 79–82.
18. **Игошин, В.А.** Геодезическое поле с особенностями и клеточное многообразие / В.А. Игошин, Я.Л. Шапиро // Известия вузов. Математика. 1984. № 11. С. 74–77.
19. **Бессе, А.** Многообразия с замкнутыми геодезическими / А. Бессе. – М.: Мир, 1981. – 315 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

V.A. Igoshin

CONSTRUCTION OF THE CAGE AND CELLULAR PSEUDORIEMANNIAN SPACE

The Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev

Methodology: Methods as local and global differential geometry are applied.

Purpose: Work is continuation of the research begun in previous article of the author.

Findings and originality/ value: At some assumptions construction both the cage, and cellular pseudoriemannian spaces is carried out. The global structure of studied spaces reminds, in particular, a double spiral of DNA; under other conditions probably global device of space in the form of the "parallel" Universes.

Research implications: It is proved, for example, that spaces of constant curvature K possess cellular structure. The last takes place for de Sitter space the second sorts ($K \leq 0$), which consists of infinite set of cages, each of which is a pulsation (or "flash") Lobachevsky's three-dimensional space. De Sitter space of the first sort ($K > 0$) consists of one cage; to two features of this cage there correspond two three-dimensional spheres monotonously extending in "past" and "future" (certainly, features here, unlike Freedman model, are only features of the geodesic field).

Key words: a geodesic field directions, singular point, a cage, the cage code number, torus-like and cilinder-like spaces.

УДК 53.072

Г.В. Кондратьев

О КАНОНИЧЕСКОМ ОБОГАЩЕНИИ КАТЕГОРИИ В КАТЕГОРИИ
ПРЕДПУЧКОВ МНОЖЕСТВ

Университет Сан-Паулу, Бразилия

Обсуждается конструкция канонического обогащения категории с бинарными произведениями в категории предпучков множеств. Это – естественный шаг, когда категория декартова, но не является декартово-замкнутой, и ее *Hom*-множества не являются объектами в этой категории. Идея является старой – обращаться с множествами отображений между объектами как с самими объектами.

Ключевые слова: категория, предпучок, копределы, почти-объекты.

Во многих разделах математики часто бывает желательно рассматривать множество морфизмов между объектами некоторой категории как объект этой же категории. Это можно сделать простым каноническим образом, если категория имеет бинарные произведения (которым практически всегда снабжены обычные алгебраические, топологические и дифференциальные категории). Идея хорошо известна. Автор следует подходу Б.П. Комракова [1], поскольку именно через него видна каноничность конструкции: *Hom*-множества являются так же, как и объекты копределами всех параметризаций и репараметризаций.

Рассматриваемые как предпучки, *Hom*-множества допускают продолжение функторов на них. Например, касательный функтор *T* в категории гладких многообразий **Diff** продолжается на почти гладкие многообразия отображений. С этой позиции группа автоморфизмов **Aut**(*X*) гладкого многообразия *X* становится почти группой Ли. Гомологии пространств отображений или пространств решений дифференциальных уравнений могут изучаться с этой позиции, как и разные другие вопросы. Технически это выглядит как вычисление копределов, связанных с интересующими нас функторами. Вопрос их вычисления в статье не обсуждается.

1. Каноническое обогащение категории

Напомним сначала определение обогащенной категории по М. Келли [2]. Используемые обозначения стандартны и не требуют особых пояснений (например, *Ob*, *Ar*, μ обозначают объекты, стрелки и умножение в категории).

Определение 1. Категория *C* называется обогащенной в тензорной категории (**V**, **I**, \otimes), [2, 3] если

- $\forall x, y \in \text{Ob}C \ C(x, y) \in \text{Ob}V,$
- $\forall x, y, z \in \text{Ob}C \ \mu_{x, y, z}: C(y, z) \otimes C(x, y) \rightarrow C(x, z) \in \text{Ar}V,$
- $\forall x, y, z, w \in \text{Ob}C,$

$$\begin{array}{ccc}
 (C(z, w) \otimes C(y, z)) \otimes C(x, y) & \xrightarrow{\sim} & C(z, w) \otimes (C(y, z) \otimes C(x, y)) \\
 \downarrow \mu \otimes 1 & & \downarrow 1 \otimes \mu \\
 C(w, y) \otimes C(x, y) & & C(z, w) \otimes C(x, z) \\
 \downarrow \mu & & \downarrow \mu \\
 C(x, w) & \xrightarrow{=} & C(x, w)
 \end{array}$$

- $\forall x \in \text{Ob}C \exists u_x : I \rightarrow C(x,x) \in \text{Ar}V$ такая, что

$$\begin{array}{ccc}
 C(x,y) & \xleftarrow{\sim} & I \otimes C(x,y) \\
 \mu \swarrow & & \downarrow u_x \otimes 1 \\
 & & C(x,x) \otimes C(x,y)
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 C(z,x) & \xleftarrow{\sim} & C(z,x) \otimes I \\
 \mu \swarrow & & \downarrow 1 \otimes u_x \\
 & & C(z,x) \otimes C(x,x)
 \end{array}$$

Хорошо известно, что обобщенные элементы объекта (все стрелки в этот объект) полностью восстанавливают его (через вложение Йонеды). Обобщенные элементы Ном-множества это тоже стрелки в данное Ном-множество, но только из множеств, несущих структуру объектов категории (из проекций объектов в **Set**), которые можно поднять в данную категорию. Обобщенные элементы в Ном-множествах абсолютно аналогичны непрерывно или гладко параметризованным семействам стрелок как в случае категорий **Top** или **Diff**. Они образуют почти объекты или почти структуры на Ном-множествах категории, так как являются определенными копределами объектов.

Определение 2. Допустим, что категория C имеет бинарные произведения и $|-| : C \rightarrow \text{Set}$ забывающий (инъективный) функтор в категорию множеств. Тогда **Set**-отображение $f : |Z| \rightarrow C(X,Y)$, $Z \in \text{Ob}C$ называется обобщенным (или допустимым) элементом Ном-множества $C(X,Y)$ с областью определения $|Z|$, если стрелка $\bar{f} \circ \gamma_Z$ может быть поднята в категорию C :

$$\begin{array}{ccc}
 C(X,Y) \times |X| & \xrightarrow{\text{ev}} & |Y| \\
 f \times 1 \uparrow & \nearrow \bar{f} & \\
 |Z| \times |X| & & \\
 \gamma_Z \uparrow & & \\
 |Z \times X| & &
 \end{array}$$

где γ_Z – опосредующая стрелка в произведение, $\text{ev}(g,x) := |g|(x)$.

Обозначим через $G(|Z|, C(X,Y)) \hookrightarrow \text{Set}(|Z|, C(X,Y))$ подмножество обобщенных элементов Ном-множества $C(X,Y)$ с областью определения $|Z|$.

Утверждение 1. Функция $Z \mapsto G(|Z|, C(X,Y))$ расширяется до функтора

$$G(|-, C(X,Y)) : C^{\text{op}} \rightarrow \text{Set}.$$

Доказательство

Допустим, $\alpha : Z' \rightarrow Z$ -- некоторая стрелка, $f \in G(|Z|, C(X,Y))$ – обобщенный элемент. Нужно показать, что $f \circ \alpha \in G(|Z'|, C(X,Y))$ также обобщенный элемент, то есть, что существует стрелка $h : Z' \times X \rightarrow Y$, такая, что $|h| = \text{ev} \circ (f \times 1) \circ (\alpha \times 1) \circ \gamma_{Z'} = \bar{f} \circ (\alpha \times 1) \circ \gamma_Z$.

Поскольку $\gamma_Z : |Z \times X| \rightarrow |Z| \times |X|$ – естественное преобразование по аргументу Z , имеем

$$\begin{array}{ccccc}
 |Z' \times X| & \xrightarrow{\gamma_{Z'}} & |Z'| \times |X| & & \\
 \alpha \times 1 \downarrow & & \downarrow \alpha \times 1 & & \\
 |Z \times X| & \xrightarrow{\gamma_Z} & |Z| \times |X| & \xrightarrow{\bar{f}} & |Y|
 \end{array}$$

Требованием теперь будет существование такой стрелки $h : Z' \times X \rightarrow Y$, что

$|h| = \bar{f} \circ \gamma_Z \circ |\alpha \times 1|$. Поскольку f – обобщенный элемент, существует стрелка

$g: Z \times X \rightarrow Y$, такая что $|g| = \bar{g} \circ \gamma_Z$. Поэтому, берем $h := g \circ (\alpha \times 1)$.

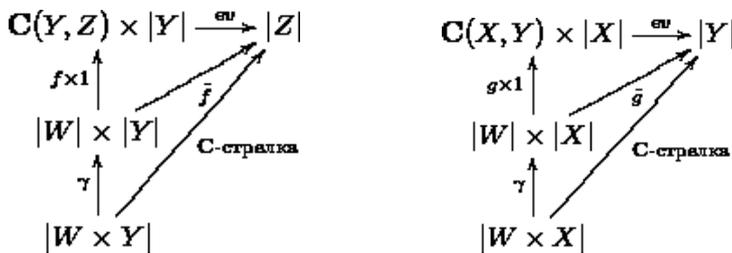
Утверждение 2. Если $|-|: \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{Set}$ – инъективный функтор, сохраняющий бинарные произведения, тогда категория \mathbf{C} является обогащенной обобщенными элементами в категории предпучков $\mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$.

Доказательство

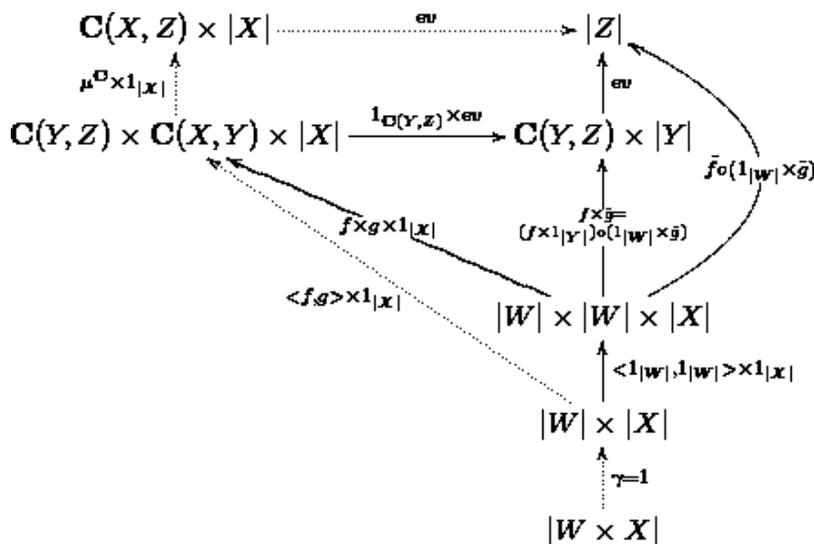
- $\forall X, Y \in \text{Ob } \mathbf{C} \ (G(|-|, \mathbf{C}(X, Y)) : \mathbf{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}) \in \text{Ob } \mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$,
- $\forall X, Y, Z \in \text{Ob } \mathbf{C}$ возьмем $\mu_{X, Y, Z} : G(|-|, \mathbf{C}(Y, Z)) \otimes G(|-|, \mathbf{C}(X, Y)) \rightarrow G(|-|, \mathbf{C}(X, Z))$ так, что $\forall W \in \text{Ob } \mathbf{C} \ \mu_{X, Y, Z; W}(f, g) := \mu_{X, Y, Z}^{\mathbf{C}} \circ \langle f, g \rangle$,

где $\mu_{X, Y, Z}^{\mathbf{C}} : \mathbf{C}(Y, Z) \times \mathbf{C}(X, Y) \rightarrow \mathbf{C}(X, Z)$ это композиция в \mathbf{C} , $\langle f, g \rangle : |W| \rightarrow \mathbf{C}(Y, Z) \times \mathbf{C}(X, Y)$ – опосредующая стрелка в произведении. $\mu_{X, Y, Z; W}$ натуральна в W , так как $(\mu_{X, Y, Z}^{\mathbf{C}} \circ \langle f, g \rangle) \circ |h| = \mu_{X, Y, Z}^{\mathbf{C}} \circ \langle f \circ |h|, g \circ |h| \rangle$ для $h : W' \rightarrow W$.

Почему стрелка $\text{ev} \circ ((\mu^{\mathbf{C}} \circ \langle f, g \rangle) \times 1) \circ \gamma$ может быть поднята в \mathbf{C} ? По условию



Достаточно взять $\gamma = 1$.



Требуемая пунктирная стрелка $\text{ev} \circ ((\mu^{\mathbf{C}} \circ \langle f, g \rangle) \times 1_{|X|}) \circ \gamma$ поднимается в \mathbf{C} , поскольку самый правый путь $\bar{f} \circ (1_{|W|} \times \bar{g}) \circ (\langle 1_{|W|}, 1_{|W|} \rangle \times 1_{|X|}) \circ 1_{|W \times X|}$ поднимается (для этого берем поднятия для \bar{f} , \bar{g} и единичные стрелки для единичных стрелок):

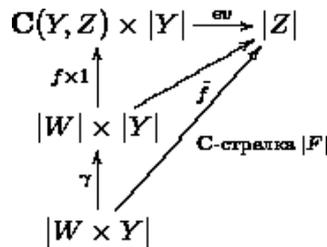
- (ассоциативность) $\forall f, g, h$ таких, что $f : |W| \rightarrow \mathbf{C}(Z, Z')$, $g : |W| \rightarrow \mathbf{C}(Y, Z)$, $h : |W| \rightarrow \mathbf{C}(X, Y)$ $\mu_{X, Z, Z'}^{\mathbf{C}} \circ \langle f, \mu_{X, Y, Z}^{\mathbf{C}} \circ \langle g, h \rangle \rangle = \mu_{X, Y, Z'}^{\mathbf{C}} \circ \langle \mu_{Y, Z, Z'}^{\mathbf{C}} \circ \langle f, g \rangle, h \rangle$, потому что

- это равенство выполняется для каждого элемента $w \in |W|$;
- (единицы) $\forall X \in \text{Ob } \mathbf{C}$ берем $u_{X;W} : \mathbf{1} \rightarrow \text{Set}(|W|, \mathbf{C}(X, X)) : * \mapsto (w \mapsto 1_X)$. Эта стрелка естественна в W и $\forall f, g$ таких, что $f : |W| \rightarrow \mathbf{C}(X, Y)$, $g : |W| \rightarrow \mathbf{C}(Z, X)$ требуемые уравнения выполняются $\mu^{\mathbf{C}} \circ \langle f, u_{X;W} \rangle (w) = \mu^{\mathbf{C}}(f(w), 1_X) = f(w)$, $\mu^{\mathbf{C}} \circ \langle u_{X;W}, g \rangle (w) = \mu^{\mathbf{C}}(1_X, g(w)) = g(w)$, $w \in |W|$.

Утверждение 3. Имеет место изоморфизм предпучков $G(|\cdot|, \mathbf{C}(X, Y)) \xrightarrow{\sim} \mathbf{C}(X \times - , Y)$.

Доказательство

Рассмотрим диаграмму, определяющую обобщенный элемент f :



Каждой стрелке $F: W \times Y \rightarrow Z$ биективно соответствует стрелка $|F|$ (поскольку забывающий функтор инъективен, а $|F|$ поднимаемая в \mathbf{C} по определению обобщенного элемента). Стрелке $|F|$ биективно соответствует \tilde{f} и потом f (поскольку γ – изоморфизм для забывающего функтора, сохраняющего произведения и Set – декартово-замкнутая категория). Все соответствия естественны, так как γ естественна в W , и соответствие между сопряженными стрелками естественное.

Из последнего предложения сразу следует, что наличие забывающего функтора, сохраняющего бинарные произведения, является излишним требованием, и (ослабленным) решением задачи обогащения Ном-множеств почти объектами категории с бинарными произведениями оказывается (ожидаемое) соответствие $\mathbf{C}(X, Y) \mapsto \mathbf{C}(X \times - , Y)$, а, например, не $\mathbf{C}(X, Y) \mapsto \mathbf{C}(X \amalg - , Y)$ в случае существования копроизведения (хотя, конечно, $\mathbf{C}(X \amalg - , Y)$ тоже предпучок).

1.1. Почти структуры

Чтобы лучше проследивалась связь с почти структурами Б.П. Комракова [1], которые представляют и самостоятельный интерес, приведем определение структуры на объектах категории (правильно отражающее алгебраические и топологические структуры на множестве, гладкие структуры на топологическом пространстве и т.д.).



Определение 3. Структура типа \mathbf{E} на объектах категории \mathbf{B} это инъективный функтор \mathbf{B} , который

- допускает подъем изоморфизмов типа $f : B' \xrightarrow{\sim} p(E)$ (или, то же самое, $f : p(E) \xrightarrow{\sim} B'$);
- каждый слой E_B скелетален (то есть каждый класс изоморфных объектов состоит из одного объекта).



Утверждение 4. Для каждой структуры \mathbf{B} типа \mathbf{E} на объектах категории \mathbf{B}

- существует вложение $i_p :$

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{E} \\
 \downarrow p \\
 \mathbf{B} \hookrightarrow \mathbf{Set}^{\mathbf{E}^{\text{op}}} \\
 \left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} E \\ p(E) \end{pmatrix} \mapsto p(\mathbf{E}(-, E)) \quad \text{на объектах} \\ \begin{pmatrix} v \\ p(v) \end{pmatrix} \mapsto p(\mathbf{E}(-, v)) \quad \text{на стрелках} \end{array} \right.
 \end{array}$$

- $p(\mathbf{E}(-, E)) \hookrightarrow \mathbf{B}(p(-), p(E)) : \mathbf{E}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ (Hom-подфунктор)

Доказательство

Функториальность и инъективность очевидны (см. также [1, 4]). Это означает, что каждая структура \mathbf{E} на объектах категории \mathbf{B} точно представима специфической подкатегорией \mathbf{B} -Hom-подфункторов (в которой достаточно взять стрелки только типа $f \circ -$).

Вопрос, может ли объект $E \in \text{ObE}$ быть восстановлен из функтора $F \hookrightarrow \mathbf{B}(p(-), p(E))$, имеет в общем отрицательный ответ. В том случае, когда это возможно, он восстанавливается единственным образом. Но даже если это невозможно, подфунктор $F \hookrightarrow \mathbf{B}(p(-), p(E))$ ведет себя как объект в \mathbf{E} .

Определение 4

- Произвольный подфунктор $F \hookrightarrow \mathbf{B}(p(-), B) : \mathbf{E}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ называется почти- \mathbf{E} структурой над объектом $B \in \text{ObB}$.

- Категория \mathbf{B} с объектами $\begin{pmatrix} F \\ B \end{pmatrix}, B \in \text{ObB}, F \hookrightarrow \mathbf{B}(p(-), B)$ и морфизмами $\begin{pmatrix} f \circ - \\ f \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} \mathbf{B}(p(-), f) \\ f \end{pmatrix}$, где $f : B \rightarrow B'$, называется категорией почти- \mathbf{E} структур над \mathbf{B} .

- Почти- \mathbf{E} коструктура над $B \in \text{ObB}$ это подфунктор $F' \hookrightarrow \mathbf{B}(B, p(-)) : \mathbf{E} \rightarrow \mathbf{Set}$ [почти коструктуры не являются двойственными к почти структурам, все вместе они ведут себя ковариантно].

- Категория \mathbf{B} с объектами $\begin{pmatrix} F' \\ B \end{pmatrix}, B \in \text{ObB}, F' \hookrightarrow \mathbf{B}(B, p(-))$ и морфизмами $f : \begin{pmatrix} F' \\ B \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} F'_1 \\ B_1 \end{pmatrix}$, такими, что $f : B \rightarrow B_1 \in \text{ArB}$ и $\forall E_1 \in \text{ObE} \forall g \in \mathbf{B}(B_1, p(E_1)) \quad g \circ f \in \mathbf{B}(B, p(E_1))$, называется категорией почти- \mathbf{E} коструктур над \mathbf{B} .

Пример

Возьмем $\mathbf{Poly}(E_1, E_2, \dots, E_n; -) \hookrightarrow \mathbf{Set}(p(E_1 \times \dots \times E_n), p(-)) : \mathbf{Vect} \rightarrow \mathbf{Set}$, подфунктор полилинейных отображений. Тогда $\mathbf{Poly}(+, +, \dots, +; -) : \mathbf{Vect}^n \rightarrow \mathbf{Set}^{\mathbf{Vect}}$ определяет подкатегорию почти- \mathbf{Vect} коструктур над $(p \circ (\times^n))(\mathbf{Vect}^n) \hookrightarrow \mathbf{Set}$ (где $p : \mathbf{Vect} \rightarrow \mathbf{Set}$ – забывающий функтор).

$$\begin{array}{c}
 \mathbf{E} \\
 \downarrow p \\
 \mathbf{B}
 \end{array}$$

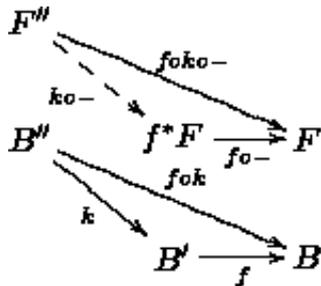
Утверждение 5. Для структуры типа \mathbf{E} на \mathbf{B}

\mathbf{AE}
 \downarrow
 \mathbf{B} – расслоение и $\mathbf{E} \xrightarrow{p} \mathbf{B}$ и $\mathbf{AE} \xrightarrow{p} \mathbf{B}$ – подкатегория.

Доказательство

• Если $\begin{pmatrix} F \\ B \end{pmatrix} \in \text{Ob } \mathbf{B}$ и $f : B' \rightarrow B$, возьмем $f^* F := \{g : p(X) \rightarrow B' \mid X \in \text{Ob } \mathbf{E}, f \circ g \in F(X) \subset \mathbf{B}(p(X), B)\}$. Тогда

$f^* F \xrightarrow{f} \mathbf{B}(p(-), B')$ – подфунктор, и $\begin{pmatrix} f^* F \\ B' \end{pmatrix} \xrightarrow{f} \begin{pmatrix} F \\ B \end{pmatrix}$ – декартов морфизм над f



Назначение дает требуемое вложение:

$$\left\{ \begin{array}{l} \begin{pmatrix} E \\ p(E) \end{pmatrix} \mapsto p(\mathbf{E}(-, E)) \xrightarrow{p} \mathbf{B}(p(-), p(E)) \quad \text{на объектах} \\ \begin{pmatrix} v \\ p(v) \end{pmatrix} \mapsto p(\mathbf{E}(-, v)) = \mathbf{B}(p(-), p(v)) \quad \text{на стрелках} \end{array} \right.$$

С позиции почти структур (в уточненном ранее смысле) в утверждении 2 устанавливается специфическое обогащение категории почти структурами над категорией множеств \mathbf{Set} , потому что $G(|-, \mathbf{C}(X, Y)) \xrightarrow{\sim} \mathbf{Set}(|-, \mathbf{C}(X, Y))$.

Иногда полезно рассматривать обогащение категории \mathbf{D} предпучками обобщенных элементов с областями определения в другой категории \mathbf{C} . В этом случае назовем \mathbf{D} AC-категорией. Так, например, в категорной конструкции локально-тривиальных векторных расслоений оказывается естественным обогащать категорию линейных топологических пространств $\mathbf{VectTop}$ в категории топологических пространств \mathbf{Top} (см. [4]).

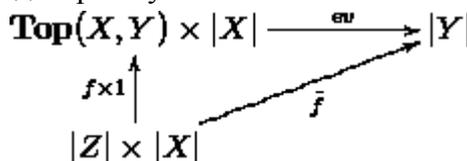
Все обычные конкретные категории, такие как \mathbf{Top} , \mathbf{Grp} , \mathbf{Rng} и т.д., несут соответствующие почти структуры, которые в некоторых случаях могут быть структурами.

Пример (компактно-открытая топология [1])

Утверждение 6. Если X локально компактное топологическое пространство (так что семейство \mathbf{T} топологий на $\mathbf{Top}(X, Y)$, для которых отображение взятия значения $ev : \mathbf{Top}(X, Y) \times |X| \rightarrow |Y|$ непрерывно, непусто и содержит минимальный элемент, компактно-открытую топологию на $\mathbf{Top}(X, Y)$), тогда $\tau \in \mathbf{T}$ – компактно-открыта, если и только если $\forall Z \in \text{Ob } \mathbf{Top}$ каждый обобщенный элемент $f : |Z| \rightarrow \mathbf{Top}(X, Y)$ непрерывен.

Доказательство

” \Rightarrow ” Рассмотрим диаграмму



Мы хотим показать, что отображение $f : |Z| \rightarrow \mathbf{Top}(X, Y)$ непрерывно (с компактно-

открытой топологией в $\mathbf{Top}(X, Y)$), если отображение $\bar{f}: |Z| \times |X| \rightarrow |Y|$ непрерывно, то есть что $\forall z \in |Z| \forall U^K$ (предбазового) компактно-открытого множества $U^K \ni f(z) \ni$ окрестность $V \ni z$, такая, что $f(V) \subset U^K$. Это эквивалентно тому, что $\forall z \in |Z| \forall U^K \ni f(z) \ni V \ni z$, такая, что $\bar{f}(V \times K) \subset U$. Поскольку \bar{f} непрерывно $\forall (z, x) \in \{z\} \times K$ и \forall открытого множества $U \ni \bar{f}(z, x) \ni$, открытая окрестность $V_Z \times W_X \ni (z, x)$, такая, что $\bar{f}(V_Z \times W_X) \subset U$. $\bigcup_{x \in K} W_X \supset K$ (открытое покрытие). Поэтому, в силу компактности K , $\exists W_{x_1}, \dots, W_{x_n}$, такие, что $\bigcup_{i=1}^n W_{x_i} \supset K$. Возьмем $V := \bigcap_{i=1}^n (V_i)_Z$, где $(V_i)_Z$ соответствует W_{x_i} (то есть $(V_i)_Z$ открыто, $(V_i)_Z \ni z$, $\bar{f}((V_i)_Z \times W_{x_i}) \subset U$). Тогда $\bar{f}(V \times K) \subset U$.

” \Leftarrow ” Возьмем пространство $Z = \mathbf{Top}(X, Y)$ с компактно-открытой топологией. Выберем в \mathbf{Hom} -множестве $\mathbf{Top}(X, Y)$ (вверху диаграммы) не минимальную топологию $\tau \in \mathbf{T}$, положим $f := 1 \in \mathbf{ArSet}$. Тогда $1: \mathbf{Top}(X, Y) \rightarrow \mathbf{Top}(X, Y)$ является допустимым обобщенным элементом, поскольку ev непрерывно, но 1 не является непрерывным отображением.

Следовательно, для локально-компактного пространства X , почти- \mathbf{Top} структура $G(|Z|, \mathbf{Top}(X, Y))$ совпадает с компактно-открытой топологией, то есть в действительности является \mathbf{Top} структурой.

2. Продолжение функторов

Практическим следствием обогащения \mathbf{Hom} -множеств предпучками обобщенных элементов является возможность продолжения на них функторов, чтобы определить на них структуры, привычные для объектов категории (как, например, аналог решетки, являющейся топологией для топологических пространств), развить определенную технику (например, касательный функтор и инфинитезимальное исчисление для гладких многообразий) и вычислить другие интересующие нас характеристики (например, группы (ко)гомологий и гомотопий). Однако следует иметь в виду, что если такие характеристики определяются не конепрерывным функтором (или хотя бы не коммутирующим с фильтрованными копределами), то они будут отличаться от классических, когда почти структура *совпадает* со структурой.

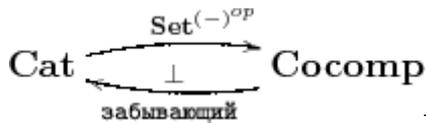
Из леммы Йонеды $\text{Nat.Trans.}(\mathbf{Hom}(-, A), P) = \{a: \mathbf{Hom}(-, A) \rightarrow P \mid a \in P(A)\} \xrightarrow{\sim} P(A)$ сразу следует, что любой предпучок $P: \mathbf{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ является коконусом над диаграммой $\int_{\mathbf{C}} P \xrightarrow{\pi} \mathbf{C}$, где $\int_{\mathbf{C}} P$ – категория элементов предпучка P , состоящая из пар (A, a) , $a \in P(A)$, со стрелками из \mathbf{C} , сохраняющими отмеченные элементы, π – функтор, забывающий отмеченные элементы. На самом деле этот коконус является универсальным (то есть копределом представимых функторов).

Утверждение 7

- Для каждого предпучка $P: \mathbf{C}^{\text{op}} \rightarrow \mathbf{Set}$ выполняется $P = \text{Colim}(\int_{\mathbf{C}} P \xrightarrow{\pi} \mathbf{C} \xrightarrow{y_{\mathbf{C}}} \mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}})$, где $y_{\mathbf{C}}$ – вложение Йонеды категории \mathbf{C} ;
- Вложение Йонеды $y_{\mathbf{C}}: \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$ является универсальным копополнением \mathbf{C} , то есть $\forall F: \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{E}$, где \mathbf{E} – кополная категория (все копределы существуют), $\exists!$ (с точностью до изоморфизма) конепрерывный функтор $\bar{F}: \mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}} \rightarrow \mathbf{E}$ такой, что

$$\begin{array}{ccc} \mathbf{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}} & \xrightarrow{\bar{F}} & \mathbf{E} \\ y_{\mathbf{C}} \uparrow & \nearrow F & \\ \mathbf{C} & & \end{array}$$

- $\bar{F}(P) = \text{Colim}(\int_{\mathbf{C}} P \xrightarrow{\pi} \mathbf{C} \xrightarrow{F} \mathbf{E})$, где $P \in \text{ObSet}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$, $\int_{\mathbf{C}} P$ – категория элементов P , π – естественная проекция;



- – сопряжение между **Cat** и ее полной подкатегорией кополных категорий **Cocomp** с вложением Йонеды $y_{\mathbf{C}} : \mathbf{C} \rightarrow \text{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$ в качестве единицы;
- Каждый функтор $F : \mathbf{C} \rightarrow \mathbf{D}$ допускает единственное (с точностью до изоморфизма)

$$\begin{array}{ccc} \text{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}} & \xrightarrow{-F} & \text{Set}^{\mathbf{D}^{\text{op}}} \\ y_{\mathbf{C}} \uparrow & & \uparrow y_{\mathbf{D}} \\ \mathbf{C} & \xrightarrow{F} & \mathbf{D} \end{array}$$

конепрерывное расширение $F : \text{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}} \rightarrow \text{Set}^{\mathbf{D}^{\text{op}}}$ такое, что

Доказательство см. в [6, 7].

Примеры

1. Квазитопология на пространстве отображений. Рассмотрим конепрерывный контравариантный представимый функтор $\text{Top}(-, S) : \text{Top} \rightarrow \text{Lat} : X \mapsto \tau_X$, где S – пространство Серпинского (состоящее из двух точек, одна из которых открыта, другая нет), принимающий значения в категории решеток **Lat** и назначающий топологическому пространству X его топологию τ_X . Тогда Ном-множеству $\text{Top}(X, Y)$, как несущему почти топологическую структуру $G(|-, \text{Top}(X, Y))$, сопоставляется (однозначно с точностью до изоморфизма) решетка $\tau_{\text{Top}(X, Y)}$ в **Lat**, которая может быть названа *квазитопологией* на множестве $\text{Top}(X, Y)$. $\tau_{\text{Top}(X, Y)} = \text{Lim}(\int_{\text{Top}} G(|-, \text{Top}(X, Y)) \xrightarrow{\pi} \text{Top} \xrightarrow{\text{Top}(-, S)} \text{Lat})$.

Лемма 1. Для локально компактного топологического пространства X предпучок обобщенных элементов $G(|-, \text{Top}(X, Y))$ представим пространством $\text{Top}_{\pi}(X, Y)$ с компактно-открытой топологией. При этом $\text{Top}(X, Y) = \text{Colim}(\int_{\text{Top}} G(|-, \text{Top}(X, Y)) \xrightarrow{\pi} \text{Top})$.

Доказательство первой части леммы сразу следует из утверждения 6. Формула следует из утверждения 7 и того факта, что универсальный коконус для $G(|-, \text{Top}(X, Y))$ состоит по существу из обобщенных элементов, которые в этом случае являются стрелками в **Top**.

Утверждение 8. Квазитопология $\tau_{\text{Top}(X, Y)}$, сопоставляемая предпучку $G(|-, \text{Top}(X, Y))$ с локально-компактным X , является компактно-открытой топологией, равной $\tau_{\text{Top}(X, Y)} = \text{Lim}(\int_{\text{Top}} G(|-, \text{Top}(X, Y)) \xrightarrow{\pi} \text{Top} \xrightarrow{\text{Top}(-, S)} \text{Lat})$.

Доказательство следует из леммы 1 и утверждения 7.

Замечание. Хотя формула из утверждения 7 (пункт 3) позволяет продолжать любые функторы со значением в кополной категории на предпучки из $\text{Set}^{\mathbf{C}^{\text{op}}}$, в случае когда предпучок представимый (то есть по существу объект категории \mathbf{C}) значения функтора на предпучке и соответствующем объекте, вообще говоря, не изоморфны $\bar{F}(\mathbf{C}(-, C)) \neq F(C)$ (это просто отражает факт, что не все функторы коммутируют с копределами). Для того чтобы они были изоморфны достаточно, чтобы функтор F коммутировал с фильтрованными копределами в \mathbf{C} , потому что категория элементов представимого предпучка $\int_{\mathbf{C}} \mathbf{C}(-, C)$, над которой берется копредел, содержит конечный элемент $1 = C \xrightarrow{1_C} C$, и, следовательно, фильтрованная, а каждый объект $C \in \text{Ob}\mathbf{C}$ в любой категории \mathbf{C} является фильтрованным

копределом своих обобщенных элементов. При обогащении Hom -множеств категории \mathbf{C} обобщенными элементами с целью вычислить какие-то характеристики этих Hom -множеств, в случае, когда предпучок обобщенных элементов представим $G(|-|, \mathbf{C}(X, Y)) \simeq \mathbf{C}(-, C)$ (то есть, когда почти структура является структурой), а функтор F не коммутирует с фильтрованными копределами (как, например, функтор сингулярных гомологий и когомологий в **Top**), мы получим две разные характеристики объекта. Поэтому, для категорий \mathbf{C} , в которых обогащение приводит иногда к объектам этой категории (как в **Top**), важно, чтобы ‘функторы характеристик’ коммутировали с фильтрованными копределами. В остальных случаях, когда это не так или неизвестно, формулу $F(P) = \text{Colim}(\int_{\mathbf{C}} P \xrightarrow{\pi} \mathbf{C} \xrightarrow{F} \mathbf{E})$ использовать можно (по крайней мере, даже в случае совпадения почти структуры со структурой, она всегда дает некоторый объект $F(\mathbf{C}(-, C))$ с опосредующей стрелкой из ‘правильной характеристики’ в него $F(\mathbf{C}) \rightarrow F(\mathbf{C}(-, C))$).

2. Дифференциальное исчисление на пространстве (гладких) отображений. Пусть $\mathbb{R}\text{-Alg}$, $\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ – категории соответственно (гладких) алгебр и внешних дифференциальных алгебр над \mathbb{R} , $\Lambda : \mathbb{R}\text{-Alg} \rightarrow \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ – функтор взятия свободной внешней дифференциальной алгебры (левый сопряженный к забывающему функтору $p_0 : \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg} \rightarrow \mathbb{R}\text{-Alg}$, выделяющему алгебру элементов степени 0) [5]. Как левый сопряженный, Λ конепрерывен.

Сопоставим канонически:

$$\begin{aligned} \mathbb{R}\text{-спектру алгебры } \mathbf{A} \text{ внешнюю дифференциальную алгебру} \\ \bar{\Lambda}(\mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{A}, \mathbb{R})) = \text{Colim}(\int_{\mathbb{R}\text{-Alg}} G(|-|, \mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{A}, \mathbb{R})) \xrightarrow{\pi} \mathbb{R}\text{-Alg} \xrightarrow{\Lambda} \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}), \\ \text{множеству отображений } \mathbb{R}\text{-спектров } \mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{A}, \mathbb{R}) \text{ в } \mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{B}, \mathbb{R}) \text{ внешнюю} \\ \text{дифференциальную алгебру} \\ \bar{\Lambda}(\mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{B}, \mathbf{A})) = \text{Colim}(\int_{\mathbb{R}\text{-Alg}} G(|-|, \mathbb{R}\text{-Alg}(\mathbf{B}, \mathbf{A})) \xrightarrow{\pi} \mathbb{R}\text{-Alg} \xrightarrow{\Lambda} \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}). \end{aligned}$$

Здесь под гладкой алгеброй понимается алгебра, замкнутая относительно гладких операций. Существует левый сопряженный функтор из категории $\mathbb{R}\text{-Alg}$ на подкатегорию гладких алгебр, пополняющий алгебру до гладкой [5]. Однако конструкция имеет смысл и в негладком случае. Также можно заменить поле \mathbb{R} произвольным коммутативным кольцом \mathbb{R} .

3. Когомологии пространств решений дифференциальных уравнений. Пусть $\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ обозначает здесь категорию *гладких* внешних дифференциальных алгебр (представляющую категорию гладких дифференциальных уравнений), $\Lambda(\mathbb{R}^n)$ обозначает алгебру гладких дифференциальных форм на \mathbb{R}^n (представляющую пространство параметров). Множеством решений дифференциального уравнения $\mathcal{D} \in \text{Ob}\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ является $\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}(\mathcal{D}, \Lambda(\mathbb{R}^n))$ [5].

Имеются очевидные функторы $\text{CoCh} : \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg} \rightarrow \text{CoCh}(\mathbb{R}\text{-Vect})$ и $H^m : \text{CoCh}(\mathbb{R}\text{-Vect}) \rightarrow \mathbb{R}\text{-Vect}$ (первый забывает структуру алгебры и оставляет структуру коцепного комплекса векторных пространств над \mathbb{R} , второй сопоставляет комплексу его пространство когомологий в размерности m). Тогда когомологии пространства решений $\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}(\mathcal{D}, \Lambda(\mathbb{R}^n))$ могут быть вычислены по (той же) формуле $H^m(\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}(\mathcal{D}, \Lambda(\mathbb{R}^n))) = \text{Colim}(\int_{\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}} G(|-|, \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}(\mathcal{D}, \Lambda(\mathbb{R}^n))) \xrightarrow{\pi} \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg} \xrightarrow{H^m} \mathbb{R}\text{-Vect})$.

Если превратить алгебру параметров $\Lambda(\mathbb{R}^n)$ в топологическую алгебру, введя на ней, например, jet -топологию, тогда множество решений дифференциального уравнения $\mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}(\mathcal{D}, \Lambda(\mathbb{R}^n))$, естественно, наделяется начальной топологией (то есть наименьшей, в которой все элементы алгебры \mathcal{D} становятся непрерывными функциями на множестве решений). Как реальные когомологии пространства решений относятся к введенным ранее неизвестно.

Иногда нужно немного изменить определение 2 обобщенного элемента, чтобы получить «правильный» предпучок, обогащающий Hom -множество (или некоторое его подмножество). Это осуществляется ограничением предпучка обобщенных элементов на подходящую подкатегорию объектов и стрелок.

4. Функтор Ли и алгебра инвариантных форм на $\text{Aut}(X)$. Пусть $X \in \text{ObDiff}$ – гладкое многообразие, $\text{LieGrp} \hookrightarrow \text{Diff}$ – (неполная) подкатегория групп Ли в категории гладких многообразий.

Рассмотрим предпучок $\text{Act}(|-|, \text{Aut}(X)) : \text{LieGrp}^{\text{Op}} \rightarrow \text{Set}$, назначающий каждой группе Ли G множество всех ее гладких действий на многообразии X и каждому гомоморфизму групп Ли $H \rightarrow G$ очевидную замену действий группы G на действия группы H . Этот предпучок не представим, поскольку $\text{Aut}(X)$ не является группой Ли. Это дает возможность однозначно и корректно определить алгебру Ли и алгебру левоинвариантных форм на $\text{Aut}(X)$.

Пусть $\text{Lie} : \text{LieGrp} \rightarrow \text{LieAlg}$ и $\Lambda_{\text{inv}} : \text{LieGrp} \rightarrow \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}$ – функторы, назначающие соответственно алгебру Ли левоинвариантных векторных полей и алгебру левоинвариантных дифференциальных форм на группе Ли. Тогда группе автоморфизмов гладкого многообразия X соответствуют алгебра Ли

$$\text{Lie}(\text{Aut}(X)) := \text{Colim}(\int_{\text{LieGrp}} \text{Act}(|-|, \text{Aut}(X)) \xrightarrow{\pi} \text{LieGrp} \xrightarrow{\text{Lie}} \text{LieAlg})$$

и внешняя дифференциальная алгебра

$$\Lambda_{\text{inv}}(\text{Aut}(X)) := \text{Lim}(\int_{\text{LieGrp}} \text{Act}(|-|, \text{Aut}(X)) \xrightarrow{\pi} \text{LieGrp} \xrightarrow{\Lambda_{\text{inv}}} \mathbb{R}\text{-}\Lambda\text{-Alg}).$$

Замечания

1. Поскольку мы используем одну и ту же формулу копредела, чтобы не повторяться, просто укажем, что любые функторы могут быть распространены на Hom -множества тем же самым способом (например, касательный функтор на гладких многообразиях или функтор гомологий на топологических пространствах). В том случае, когда категория значений \mathbf{D} функтора не кополная (как для касательного функтора), его нужно продолжить вложением Йонеды $\mathbf{y}_{\mathbf{D}} : \mathbf{D} \hookrightarrow \text{Set}^{\mathbf{D}^{\text{op}}}$. Как конкретно вычислять эти копределы, мы здесь не рассматриваем (автор пробовал вычислять в соответствии с определением группы гомологий пространства отображений окружности в себя $\text{Top}(S^1, S^1)$ над малой декартовой категорией, порожденной сферами положительной размерности, и получил $H_0(\text{Top}(S^1, S^1)) = H_1(\text{Top}(S^1, S^1)) = \dots + \mathbb{Z} + \mathbb{Z} + \mathbb{Z} + \dots$ (суммирование над \mathbb{Z}) и нули в остальных размерностях).

2. (Ко)пределы обычно определяются над малыми диаграммами (области определения которых множества), а во всех приведенных примерах диаграммы большие (над классами). Это может привести к тому, что (ко)пределный объект будет нести структуру класса, а не множества. Чтобы выйти из данного затруднения, следует либо разрешить большие объекты, рассматриваемые в большем универсуме, либо ограничить рассмотрение подходящими малыми подкатегориями (замкнутыми относительно бинарного умножения), по которым берется копредел.

Заключение

Приведенная конструкция обогащения является естественным обобщением обогащения, применяемого в декартово-замкнутых категориях (которых не так много) на декартовы категории (все обычные категории в математике декартовы). Конструкция позволяет продолжать функторы на Hom -множества, перенося на них технику, используемую на объектах. Важной особенностью конструкции, не представленной как отдельное свойство

в этой статье, является возможность ослабления структуры объектов (это особенно важно для ослабления структуры категории). Автор надеется в этом контексте получить структуру слабой бесконечномерной категории.

Библиографический список

1. **Комраков, Б.П.** Структуры на многообразиях и однородные пространства / Б.П. Комраков. – Минск, 1978.
2. **Kelly, G.M.** Basic concepts of enriched category theory, Cambridge University Press, 1982.
3. **Borceux, F.** Handbook of Categorical Algebra 2. Categories and Structures, Cambridge University Press, 1994.
4. **Kondratiev, G.V.** Manifolds, Structures Categorically, ArXiv:math.CT/0608503. 2006. – 38 p.
5. **Kondratiev, G.V.** Strict Infinity Categories. Concrete Duality, ArXiv:math.CT/0807.4256v1. 2008. – 50 p.
6. **MacLane, S.** Categories for the working mathematician, Springer-Verlag, 1971.
7. **MacLane, S. I. Moerdijk,** Sheaves in Geometry and Logic, Springer-Verlag, 1992.
8. **Weibel, C.A.** An Introduction to Homological Algebra, Cambridge University Press, 1994.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2012*

G.V. Kondratiev

CANONICAL ENRICHED CATEGORIES IN THE CATEGORY OF PRESHEAVES OF SETS

University of Sao Paulo, Brazil

A canonical enrichment of a category with binary products in the presheaf category of sets is discussed. It is the next step when the category is cartesian but not cartesian-closed and its Hom-sets are not objects in the category. Since cartesian-closed categories are quite rare and everyday categories in Mathematics are just Cartesian there is a need for this enrichment to be able to treat Hom-sets as the objects. As a presheaf a Hom-set becomes a colimit of representables being its parametrizations and reparametrizations in the usual sense, that is Hom-sets become colimits of the objects of the category (or almost-objects of the category) and, in particular, cocontinuous functors return their 'classical' characteristics which they should have. It can happen that these almost-objects do belong to the category, like compact-open topology in the category of topological spaces. In the examples, a quasitopology on Hom-sets in the category of topological spaces, Lie functor on $\text{Aut}(X)$ in the category of differential manifolds, cohomology of solution spaces of differential equations are considered. The relationship of this enrichment with almost-structures by B.P. Komrakov is also discussed.

Key words: category, presheaf, colimit, quasiobjects.

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

*Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Тел. 8 312 4367372
E-mail: rio@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 протокола 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.

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 с использованием слов «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.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Белоусов Евгений Леонидович – ген. конструктор, первый зам. гендиректора по НИОКР ОАО "НПО "Поле́т", д-р техн. наук, проф.,

e-mail: polyot@atnn.ru

Войткевич Константин Леонидович – директор по НИОКР ОАО "НПО "Поле́т", д-р техн. наук, проф., e-mail: polyot@atnn.ru

Кейстович Александр Владимирович – гл. науч. сотруд. ОАО "НПО "Поле́т", доктор техн. наук, доц., e-mail: polyot@atnn.ru

Брянцев Владимир Федорович – гл. науч. сотруд. ОАО "НПО"Поле́т", д-р физ.-мат. наук, доц., e-mail: polyot@atnn.ru

Сайфетдинов Харис Имамович, консультант директора Московского филиала ОАО "НПО "Поле́т", д-р воен. наук, проф.,

e-mail: polyot@atnn.ru

Козлов Валерий Александрович – ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, начальник науч.-исслед. отдела, гл. науч. сотруд., д-р техн. наук, проф., e-mail: vKozlov@niiis.nnov.ru

Сорокин Александр Владимирович - ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», г. Нижний Новгород, вед. инженер, e-mail: insav@rambler.ru

Букварев Евгений Александрович – м.н.с НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: bukwarev@nntu.nnov.ru

Беляев Александр Игоревич – магистрант каф. ИР НГТУ им Р.Е. Алексеева, e-mail: rs@nntu.nnov.ru

Половинкина Анна Сергеевна - магистрант каф. ИР НГТУ им Р.Е. Алексеева, e-mail: rs@nntu.nnov.ru

Ястребов Андрей Викторович - магистрант каф. ИР НГТУ им Р.Е. Алексеева, e-mail: rs@nntu.nnov.ru

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

Асеева Наталья Владимировна – зам. зав. каф. ИСиТ, РИУ ВШЭ, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail: naseeva@hse.ru

Громов Евгений Михайлович – зав. каф. «Математика», РИУ ВШЭ,

д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail : egromov@hse.ru

Тютин Виктор Владимирович – зам.зав. каф. «Математика», РИУ ВШЭ, канд. физ.-мат. наук, доц., e-mail address: vtyutin@hse.ru

Рувинская Екатерина Александровна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail:e.rouvinskaya@gmail.com

Авербух Елена Леонидовна – аспирант НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail:Averbukh.lena@gmail.com

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Ворон Александр Максимович - магистрант каф. ВСиТ ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 4 36 82 28.

Ломакин Дмитрий Викторович – канд. техн. наук, доц. каф. ЭСИМ ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 436 82 28.

Мартынюк Михаил Владимирович – канд. физ.-мат. наук, доц. каф. ИСУ ИРИТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: cscs@nntu.nnov.ru

Лазарев Евгений Александрович – аспирант каф. ВСиТ ИРИТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 436 82 28.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Савин Игорь Алексеевич – зав. каф КиТМП КНИТУ им. А. Н. Туполева-КАИ, г. Набережные Челны, канд. техн. наук, e-mail: savin64@rambler.ru

Котельников Владимир Иванович - НГТУ им. Р. Е. Алексеева, доц. каф. ТОМ, тел. 436-57-10

Краснов Аркадий Олегович - зав. каф. «Восстановление и ремонт БТИ», НВИИВ РФ, канд. техн. наук, тел. (831 45) 7-37-90

Кожемякин Виталий Петрович – доц. каф. ДБМ, НВИИВ РФ, тел. (831 45) 7-37-90

Миронов Андрей Александрович – ст. инженер ЦНИИ «Буревестник», тел. 242-16-17

Беспалов Валерий Валентинович – доц. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, e-mail: bespalov@mail.ru

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Варенцов Андрей Владиславович – инженер каф. АТСиМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (831) 436-80-23, e-mail: vav88@mail.ru

Зяблицев Денис Валерьевич – магистрант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: denis3882228@mail.ru

Солнцев Дмитрий Николаевич – аспирант каф. АТСиМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: dim-solncev@yandex.ru

Пронин Алексей Николаевич – магистрант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: proninaleksei@mail.ru

Морозкин Олег Николаевич – инженер 1-й кат ОАО «ОКБМ Африкантов», тел. 246-96-50

Бирюков Владимир Валерьевич – ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Грачев Владимир Александрович – магистрант, ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Кольцов Максим Вячеславович – аспирант, ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Малышев Григорий Сергеевич – магистрант, ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Раевский Алексей Сергеевич – зав. каф. ФТОС, ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: raevsky@nntu.nnov.ru

Щербаков Владимир Викторович – ИЯЭиТФ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Бахметьев Александр Михайлович – зам. директора по науке, нач. НИОКР, ОАО «ОКБМ Африкантов», д-р техн. наук, e-mail: vab@okbm.nnov.ru

Былов Игорь Александрович – нач. отдела ОАО «ОКБМ Африкантов», тел. 246-96-72

Звягин Евгений Андреевич – инженер по ИТ, ОАО «ОКБМ Африкантов», тел. 246-96-72

Абрамов Лев Викторович – инженер – конструктор, ОАО «ОКБМ Африкантов», e-mail: vab@okbm.nnov.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Рябов Г.К. - КГТА им. В.А. Дегтярева, г. Ковров.

Леонтьева В.С. – КГТА им. В.А. Дегтярева, г. Ковров.

Федосеев Ю.В. – ОАО «Завод им. В.А. Дегтярева», тел. (49232) 9 16 50

Орлов Лев Николаевич - зав. каф. АиТ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р. техн. наук, проф., тел. (831) 436-73-63

Рогов Петр Сергеевич – инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 201-04-15

Вашурин Андрей Сергеевич – вед. инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 201-04-15

Тумасов Антон Владимирович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: anton.tumasov@gmail.com

Феокистов Николай Федорович – гл. конструкт., ООО «Инновационные технологии», г. Ворсма, тел. (831) 466-95-92

Грошев Анатолий Михайлович - директор АМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 436-63-64

Костин Сергей Юрьевич – вед. инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 201-04-15

Трусов Юрий Павлович – вед. инженер, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 201-04-15

Конилова Галина Альбертовна – директор ИЛ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. 436-63-64

Середа Павел Валерьевич - директор по развитию, Группа ГАЗ (дивизион «Легкие коммерческие автомобили»), тел. 299-09-84

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ

Нгуен Дык Тхинь – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, тел. (987) 744-63-86

Зуев Валерий Андреевич - зав. каф. КиАТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 436-78-96

Семенов Дмитрий Александрович – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: Se_M_eN@mail.ru

Рудницкий Андрей Вадимович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, тел. 436 78 96

Рудницкий Вадим Игнатьевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 436 78 96

Князьков Владимир Вячеславович – зав. каф. ИГ НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 257 86 77

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Лежнюк Петр Демьянович – зав. каф. ЭСС, ВНТУ, г. Винница, Украина, д-р. техн. наук, проф., тел. (0432) 59-83-39

Комар Вячеслав Александрович – ВНТУ, г. Винница, Украина, канд. техн. наук, доц., тел. (0432) 59-83-39

Седов Виктор Иванович - НФ МИИТ, г. Нижний Новгород, канд. техн. наук, доц., e-mail: sedov_victor@vail.ru

Соснина Елена Николаевна – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: sosnyua@yandex.ru

Шалухо Андрей Владимирович – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: Shaluho.Andrey@mail.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Гончар Александр Викторович – м.н.с. НФ ИМАШ РАН, e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Мишакин Василий Васильевич – зав. лабораторией НФ ИМАШ РАН, д-р техн. наук, проф., e-mail: imndt31@mts-nn.ru

Скуднов Вениамин Аркадьевич – зав. каф. МТПОМ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: kvas@nntu.nnov.ru,

Редькина Наталья Викторовна – аспирант, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, e-mail: mtpom@nntu.nnov.ru

Пачурин Виктор Германович – зам директора по производству ООО «Нау стандарт», e-mail: pvg101@yandex.ru

Филиппов Алексей Александрович – тех. директор ООО «Метмаш», г. Н. Новгород, e-mail: tugarino@mail.ru

Пачурин Герман Васильевич – зав. каф. ПБиЭ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: PachurinGV@mail.ru

Химия, химические и биотехнологии

Востоков Владимир Михайлович – НГТУ им.Р.Е. Алексеева, канд. хим. наук., доц., e-mail: vmvostokov@e-mail.ru

Плохов Сергей Владимирович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 436 93 57.

Карташов Виктор Романович – зав. каф. БФФХ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р хим.наук, проф., тел. 436-93-57.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Корнилов Дмитрий Анатольевич – зам. декана по НИД ФЭМИ, НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р эконом. наук, проф., тел. 436-98-74

Беляев Олег Геннадьевич – руководитель Группы развития корпоративного бизнеса, Нижегород. филиал ОАО «АК БАРС» Банк, тел. 421-60-00

Узбекова Александра Сергеевна - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. эконом. наук, доц., тел. 432-53-99

Ратафьев Сергей Васильевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. эконом. наук, доц., тел. 432-53-99

Иванов Алексей Андреевич – помощник регионального представителя в г. Н. Новгород, ООО «Премьер-Продукт», e-mail: alexey@rambler.ru

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

Смирнов Юрий Викторович – УМЦ по ГО и ЧС Нижегородской обл., канд. филос. наук, e-mail: bungle-5@yandex.ru

Шестакова Лариса Анатольевна – зав. каф., НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р педагог. наук, проф., e-mail: ppp@nntu.nnov.ru

Казакова Валерия Игоревна - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. филос. наук, доц. e-mail: trenklen@nntu.nnov.ru

Худяков Михаил Вячеславович – ООО «НПО Технология», e-mail: trenklen@nntu.nnov.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

Кондратьев Геннадий Вячеславович - д-р физ.-мат. наук, Университет Сан-Паулу, Бразилия, e-mail: gennadii.kondratiev@gmail.com

Аниковский Владимир Васильевич – зам.зав. каф. НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. физ.-мат.наук, доц., тел. 257 86 91

Журавлёв Сергей Георгиевич – МГАДИ, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: sergio2009@yandex.ru

Игошин Владимир Александрович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, проф., e-mail: vaigoshin@rambler.ru

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

№ 3 (96)

Редакторы: **Т.В. Третьякова, Е.В. Комарова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 11.09.2012. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43,5. Уч.-изд. л. 40. 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 44757
«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»