

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

№ 2 (99)

Нижний Новгород 2013

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, 2013. № 2 (99). – 366 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 (отв. редактор), Т.П. Новикова (технич. редактор)
Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Л. Башкатов, В.М. Воротынцев,
В.В. Глебов, А.М. Groшев, 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, 2013

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

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

№ 2 (99)

Nizhni Novgorod 2013

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. – Nizhni Novgorod, 2013. № 2 (99). – 366 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 (Executive Editor), T.P. Novikova (Technical Editor)
Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.L. Bashkatov, V.M. Vorotintzev, 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. Mikhalevko, V.P. Khranilov, A.Y. Panov, S.N. Khrunkov,
Y.A. Chernyshov, V.M. Galkin

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Афонин И.Л., Бугаёв П.А., Носкович В.И. Анализатор комплексных параметров СВЧ-устройств.....	11
Шишков Г.И., Щитов А.М. Смесители СВЧ.....	22
Малышев Г.С., Раевский А.С. Влияние дисперсии волоконного световода на прохождение фрактального импульса в зашумленном канале.....	34
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	43
Костенко И.С., Зайцев А.И., Ялченир А., Рыбин А.В., Яркин С.К. Проявление Тохоку цунами 2011 года в районе Курильских островов и о. Сахалин.....	43
Мазова Р.Х., Кисельман Б.А., Осипенко Н.Н., Колчина Е.А. Анализ спектральных характеристик черноморских цунами.....	52
Катаева Л.Ю., Тарнаева С.А., Кольчик И.В. Численное моделирование распространения загрязнений в результате разгерметизации цистерны с ядовитыми химическими веществами.....	67
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	75
Бритвина Е.В., Крылов В.В., Мальков Ю.А. Алгоритм максимизации релевантности, использующий графовые модели данных.....	75
Никулин Е.А. Генератор абсолютно случайных полигонов.....	84
Соколова Э.С., Ляхманов Д.А. Анализ временных рядов технических параметров промышленных объектов.....	88
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	96
Агапов М.М., Панов А.Ю. Применение множественных критериев при решении логистических задач.....	96
Иванов А.А. Приводы систем точного позиционирования на основе обратного пьезоэффекта.....	104
Манцеров С.А., Панов А.Ю., Шканов И.Н., Дмитриев А.И. Планирование ремонтов и поставок запасных частей по данным технического состояния оборудования предприятия по производству упаковочных изделий.....	110
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	117
Большухин М.А., Будников А.В., Фомичев В.И., Свешников Д.Н., Романов Р.И. Актуальные вопросы развития экспериментальной базы данных для верификации CFD программ при их использовании в атомной энергетике.....	117
Бородин С.С., Варенцов А.В., Доронков Д.В., Пронин А.Н., Иксанова Г.Ш. Экспериментальные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВБЭР–300.....	126
Дмитриев С.М., Соборнов А.Е., Рязанов Р.Р., Котин А.В. Экспериментальное исследование процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различной геометрии.....	134

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	142
Худяков В.Н., Тютнев И.А., Александрович В.А. Основы выбора параметров трубоукладчиков, предназначенных для работ на болотах.....	142
Кошелев Ю.В., Соколов Д.А., Молев Ю.И. Подвеска рабочего органа и её влияние на степень очистки заснеженных дорог.....	147
Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляев А.М., Папунин А.В., Беляков В.В. Формирование снежного покрова в зависимости от ландшафта местности и оценка подвижности транспортно-технологических машин в течение зимнего периода.....	155
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	161
Сутырин В.И., Короткая Е.И. Расчетно-экспериментальная методика достижения нормативного каскадного перепада характеристик вибрации амортизированного судового оборудования.....	161
Вешуткин В.Д. Исследование прочности разборного понтона плавучей буровой установки на тензометрических моделях.....	168
Кулепов В.Ф., Двойченко Ю.А. Ледокольная способность плавающих ледорезных машин.....	177
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	183
Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Анализ переходного процесса при включении установки поперечной емкостной компенсации в три этапа.....	183
Асабин А.А., Верховский С.Я. Регулировочные характеристики тиристорного регулятора переменного напряжения с вольтодобавочным трансформатором при очередном двухзонном управлении.....	189
Чивенков А.И., Севастьянов В.В. Силовой модуль интегрированной системы управления электрическими сетями.....	196
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	205
Изотов В.А., Родионова Н.А. Определение оптимальной скорости заполнения полости литейной формы при литье тонкостенных отливок из стали методом литья по газифицируемым моделям.....	205
Панфилов А.А., Прусов Е.С., Кечин В.А. Проблемы и перспективы развития производства и применения алюмоматричных композиционных сплавов.....	210
Филиппов А.А., Пачурин Г.В. Ресурсосберегающая подготовка.....	218
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	228
Перетрутов А.А., Ксандров Н.В., Гагарина Т.Б., Чубенко М.Н., Ким П.П. Термодинамические и кинетические основы аммиачно-аммонийного извлечения соединений цинка и меди из техногенных отходов.....	228
Девяткина Т.И., Маркова Т.В., Рогожин В.В., Михаленко М.Г. О гальванического меднения алюминиевых сплавов.....	237
Рогожин В.В., Ананьева Е.Ю., Михаленко М.Г. Особенности электроосаждения никелевых покрытий из разбавленных аммиачно-цитратных электролитов.....	245
Комова Е.П., Скоробогатова Е.В., Арбатский А.П., Карташов В.Р. Определение состава комплексов глюкозамина с ионами D-металлов.....	252

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	257
Трифонов Ю.В., Яшин С.Н., Кошелев Е.В. Планирование модернизации оборудования производственной компании методом реальных опционов.....	257
Морозова Г.А., Мальцев В.А., Мальцев К.В. Методы управления образовательной организацией в регионе: современные подходы.....	271
Зайцев А.Н., Зайцев Д.А., Борисов С.А. Рынок интернет-проектов для бизнеса: состояние, динамика и перспективы.....	282
Мансуров Р.Ш., Лещенко Е.С. Основные ценности и проблемы современных компаний действующих в рыночных условиях хозяйствования.....	289
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	295
Коровина Е.В., Андреев Е.А. Коммуникативные аспекты работы с персоналом в организациях социально-культурного сервиса и образования.....	295
Прохорова М.В. Туристско-экскурсионный потенциал г. Нижнего Новгорода.....	302
Кудрявцев М.С. Нижегородская ярмарка как школа рекламы, черного пиара и самозащиты потребителей: анализ исторического опыта (XIX – начало XX в.).....	310
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	322
Вавилов В.Д. Устранение вибрационных и шумовых погрешностей микроакселерометров.....	322
Волков В.Л., Хрисанова М.В. Обеспечение статической и динамической точности микроэлектромеханического датчика угловой скорости.....	329
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	339
Кондратьев Г.В. Возможные применения теории категорий в информационных науках.....	339
Галкин В.М., Елисеев М.Е. Квазигруппы и координатизация проективных плоскостей.....	346
Елисеев М.Е., Липенков А.В., Сангалова М.Е. О решении обратной задачи при вычислении матрицы пассажирских корреспонденций.....	355

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Afonin I.L., Bugayov P.A., Noskovich V.I. Analyzer the complex parameters of micro-wave devices.....	11
Shishkov G.I., Schitov A.M. Microwave mixers.....	22
Malyshev G.S., Raevsky A.S. The influence of the dispersion of the optical fiber for pass- ing fractal pulse in a noisy channel.....	34
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	43
Kostenko I.S., Zaitsev A.I., Yachenir A., Rybin A.V., Yarkin D.C. Manifestation of 2011'th tohoku tsunami near Kuril islands and Sakhalin island.....	43
Mazova R.Kh., Kiselman B.A., Osipenko N.N., Kolchina E.A. Analysis f spectral charac- teristics of black sea tsunami.....	52
Kataeva L.Yu., Tarnaeva S.A., Kolchik I.V. Features of radiation f forest fires.....	67
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	75
Britvina E.V., Krylov V.V., Malkov U.A. Relevance maximizing algorithm based on graph data model.....	75
Nikulin E.A. Absolutely random polygons generator.....	84
Sokolova E.S., Lyakhmanov D.A. Analysis of dynamic series describes technical parame- ters of industrial objects.....	88
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	96
Agapov M.M., Panov Alexey Y. The application of multidimensional criteria in solving logistics tasks.....	96
Ivanov A.A. System drives of exact positioning on the basis of the reverse piezo effect.....	104
Mantserov S., Panov A., Shkanov I., Dmitriev A. Planning of repairs and spare parts supply according to the technical state of equipment of enterprise producing packaging products.....	110
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	117
Bolshukhin M.A., Budnikov A.V., Fomichev V.I., Sveshnikov D.N., Romanov R.I. Pressing issues of experimental database development to verify cfd codes used in nuclear power industry.....	117
Borodin S.S., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Pronin A.N., Iksanova G.H. Experimental researches of flow hydrodynamics and mass transfer to the coolant flow in the core frag- ments VBER-300.....	126
Dmitriev S.M., Sobornov A.E., Ryazapov R.R., Kotin A.V. Experimental research of heat transfer in a viscous flow in channels with twisted metallic bands different geometry.....	134

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	142
Khudyakov V.N., Tyutnev I.A., Alexandrovich V.A. Outlines of selections of options intended to work in the swamps.....	142
Koshelev Y., Sokolov D., Molev Y. Suspension of working body and its influence on the degree of cleaning the snow-covered roads.....	147
Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyaev A.M., Papunin A.V., Belyakov V.V. Formation of snow in relation to terrain landscape and evaluation mobility of transport and technological vehicle during the winter period.....	155
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	161
Sutyurin V.I., Korotkaya E.I. The settlement-experimental technique of achieve standard cascade difference of vibration insulation for the amortized ship equipment.....	161
Veshutkin V.D. Study of stress state connection unit block-made pontoon floating drilling platform.....	168
Kulepov V.F., Dvoychenko Yu. A. Icebreaker ability of floating ice cuttings machines.....	177
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	183
German L.A., Serebryakov A. S., Dulepov D.E. The analysis of transient process at inclusion of installation cross-section capacitor compensations in three stages metallurgy and science materials	183
Asabin A.A., Verkhovskiy S.Y. Regulation characteristics in the two-zone control of the thyristor ac voltage regulator with booster transformer.....	189
Chyvenkov A.I., Sevastyanov V.V. The power module of integrated control sistem by power grids..	196
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	205
Izotov V. A., Rodionova N. A. The optimal mold cavity filling speed definition under the thin wall steel casting by molding on installed gas models.....	205
Panfilov A.A., Prusov E.S., Kechin V.A. Problems and prospects of development of production and application alyumomatrichnykh of composite alloys.....	210
Filippov A.A., Pachurin G.V. Resource training blanks for steel hardening 40x bolt.....	218
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	228
Peretrutov A.A., Ksandrov N.V., Gagarina T.B., Chubenko M.N., Kim P.P. Thermodynamic and kinetic basis of water-ammonium extraction compounds of zinc and copper from industrial waste.....	228
Devyatkina T.I., Markova T.V., Rogozhin V.V., Mikhaleenko M.G. Features of galvanic copper plating of aluminum alloys.....	237
Rogozhin V.V., Ananieva E.Y., Mikhaleenko M.G. Features of an electrodeposition nickel covers from diluted ammonium-citric electrolytes.....	245
Komova E.P., Skorobogatova E.V., Arbatsky A.P., Kartashov V.R. Definition of structure the glycosamine with d-metall ions complexes.....	252
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	257
Trifofnov Yu.V., Yashin S.N., Koshelev E.V. Planning for upgrading equipment of manufacturing company using real options.....	257

Morozova G.A., Maltsev V.A., Maltsev K.V. Methods of control over the educational organization in the region: modern approaches.....	271
Zaytsev A.N., Zaytsev D.A., Borisov S.A. Market internet projects for business: state performance and outlook.....	282
Mansurov R.Sh., Leshenko E.S. Main values and problems of modern companies working in the market economic conditions	289
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	295
Korovina E.V., Andreev E.A. Communicative aspects of the work with office personnel within social-cultural service and education organizations.....	295
Prokhorova M.V. Tourist and excursion potential of Nizhny Novgorod.....	302
Kudryavtsev M.S. Nizhny Novgorod fair as advertisement, black pr and user self-dependence example: the analysis of historical experience (XIX – the beginning of XX century)	310
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	322
Vavilov V.D. Eliminating vibration and noise errors microaccelerometers.....	322
Volkov V.L., Chrisanova M.V. Provision steady-state and dynamic accuracy of the micro electromechanic sensor of angular velocity.....	329
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL AND SOCIAL SCIENCES	339
Kondratiev G.V. Possible applications of the category theory in information sciences.....	339
Galkin V.M., Elyseev M.E. The quasigroups and the coordinatization of the projective planes.....	346
Elyseev M.E., Lipenkov A.V., Sangalov M.E. On the solution of inverse problems in the calculation of matrix of the passenger correspondence.....	355

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.812

И.Л. Афонин, П.А. Бугаёв, В.И. Носкович

АНАЛИЗАТОР КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ

Севастопольский национальный технический университет

Рассматривается анализатор комплексных параметров СВЧ-устройств, построенный на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Исключается влияние на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части анализатора путем проведения предложенных калибровочных операций.

Ключевые слова: анализатор, СВЧ-параметры, комплексный коэффициент передачи, комплексный коэффициент отражения.

Введение

В настоящее время микроволновые методы находят все большее применение в системах измерения параметров цепей, параметров материалов, а также в системах технологического контроля различных производственных процессов.

Целью данной работы является разработка и создание анализатора комплексных параметров микроволновых устройств для применения в различных отраслях производства, в частности, анализаторов комплексных параметров микроволновых устройств радиолокационных, телекоммуникационных и навигационных систем.

К современным анализаторам предъявляются следующие основные требования:

- малые габариты и масса, что позволит встраивать анализаторы в труднодоступные места;
- высокая точность результатов, обеспечивающая высокую достоверность контроля;
- широкополосность, обеспечивающая проведение анализа в различных участках частотного диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- разработка методов построения и анализ математических моделей радиочастотных преобразователей электрических и неэлектрических величин;
- разработка алгоритмов обработки измерительной информации радиочастотного преобразователя;
- разработка структурой и функциональной схемы анализатора;
- проведение метрологических исследований.

Наиболее полно удовлетворяют перечисленным требованиям радиометрические анализаторы параметров СВЧ-цепей, построенные на основе калибруемых волноводно-щелевых преобразователей (ВЩП) [1, 2].

С уменьшением длины волны трудности конструирования ВЩП возрастают и возникают проблемы размещения датчиков мощности в ограниченном пространстве [2]. Этот не-

достаток можно преодолеть, уменьшая число датчиков мощности. Поэтому в работе исследован метод построения радиометрического анализатора комплексных коэффициентов отражения (ККО) и передачи (ККП) микроволновых устройств на основе двухдетекторного ВЩП [3, 4].

Двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь

Двухдетекторный микроволновый преобразователь выполнен в виде отрезка волновода прямоугольного сечения с прорезанными в его широкой стенке двумя щелями, связывающими волноводы детекторных головок (датчиков мощности) с основным трактом (рис. 1). Одна из щелей – поперечная, другая – продольная. Поперечная щель возбуждается поперечной составляющей напряженности магнитного поля, продольная щель – продольной [2]:

$$\dot{H}_x = j\dot{H}_0 \frac{2a}{\lambda_B} \sin \frac{\pi x}{a} \exp(j(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda_B})),$$

$$\dot{H}_z = \dot{H}_0 \cos \frac{\pi x}{a} \exp(j(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda_B})),$$

где λ_B – длина волны в волноводе.

Центры щелей связи расположены в одной поперечной плоскости. Фазовый сдвиг между ответвляемыми волнами, как следует из приведенных уравнений, равен 90° на любой частоте диапазона волновода [2].

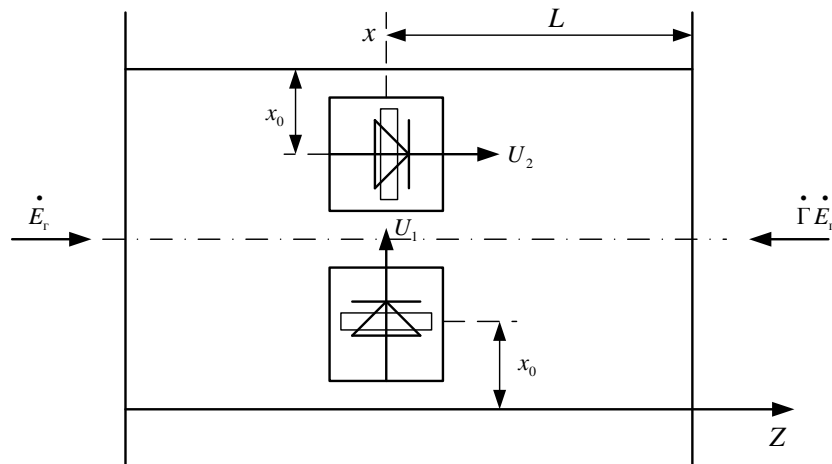


Рис. 1. Двухдетекторный ВЩП

Измеритель комплексных параметров СВЧ-устройств

Основным структурным элементом анализатора является калибруемый двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь.

Рассмотрим работу анализатора комплексных параметров СВЧ-устройств [5].

Функциональная схема анализатора приведена на рис. 2.

Измеритель состоит из ПЭВМ 1, устройства сопряжения 2, СВЧ-генератора с дискретной перестройкой частоты 3, двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя (ДДВЩП) 4, исследуемого элемента или устройства ИУ 5, отрезка регулярного волновода 7, U-образного 180° -ного изгиба 6 и согласованной нагрузки СН 8.

Двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь состоит из двух отрезков прямоугольного волновода, связанных между собой двумя отрезками запредельных волноводов с симметрично расположенным в них СВЧ-диодами, которые возбуждается двумя идентичными парами щелей связи I — III и II — IV. Верхний канал нагружен согласованной нагрузкой 8. Исследуемый четырехполюсник подключается между каналами

преобразователя с помощью U -образного 180° -ного изгиба 6. Центры продольных щелей I, III и поперечных — II и IV находятся в одной поперечной плоскости. Однако для наглядности изображения детекторные головки Д1 и Д2 на рисунке разнесены на электрическое расстояние, соответствующее 90° сдвигу волн между ними. Измеритель может работать как в режиме измерения комплексного коэффициента отражения, так и в режиме измерения комплексного коэффициента передачи.

На вход одного из волноводов двухдетекторного ВЩП поступает СВЧ-сигнал от генератора с электронной дискретной перестройкой частоты. К выходному фланцу этого волновода подключается исследуемый четырехполюсник, модуль Γ и аргумент φ ККО, а также модуль T и аргумент ψ (ККП) которого подлежат определению. Сигналы с датчиков мощности ВЩП через устройство сопряжения поступают на компьютер, где они обрабатываются, а результаты измерения Γ и φ , T и ψ отображаются на экране дисплея.

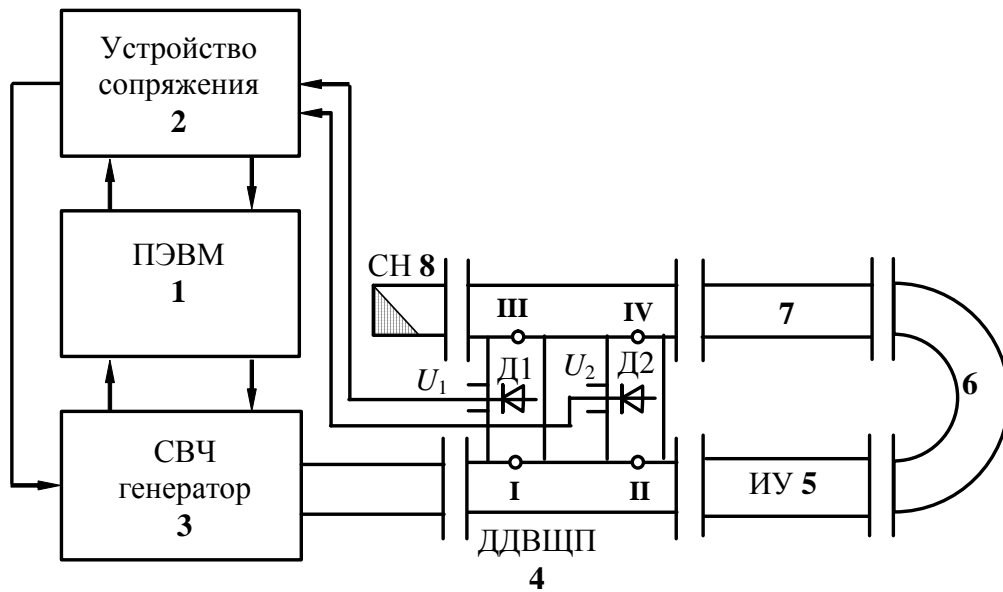


Рис. 2. Функциональная схема анализатора

Исследование анализатора комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения

При измерении комплексного коэффициента отражения к выходу исследуемого четырехполюсника присоединяется согласованная нагрузка.

Рассмотрим работу анализатора ККО для случая, когда выход генератора идеально согласован. В соответствии с математической моделью двухдетекторного ВЩП, учитывая 90° фазовый сдвиг между волнами, ответвляемыми щелями, и квадратичное детектирование СВЧ-сигналов диодами датчиков мощности, выражения для напряжений, снимаемых с диодов, имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 &= k_1 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right); \\ U_2 &= k_2 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты передачи детекторных головок;

E_r^2 — квадрат модуля комплексной нормированной амплитуды волны генератора;

L — расстояние от центра щелей связи до выходного фланца;

λ_B — длина волны в волноводе.

Сигналы с диодов несут информацию о модуле Γ и аргументе φ ККО. Однако из-за множителей $k_1 E_\Gamma^2$ и $k_2 E_\Gamma^2$, которые неизвестны, решение уравнений (1) невозможно. Величины этих множителей можно определить, если провести калибровку анализатора по согласованной нагрузке, для которой $\Gamma = 0$. При этом получим два калибровочных уравнения:

$$U_{1к} = k_1 E_\Gamma^2; \quad U_{2к} = k_2 E_\Gamma^2. \quad (2)$$

Совместное решение измерительных (1) и калибровочных (2) уравнений позволяет определить модуль и аргумент ККО исследуемого устройства. Разделив U_1 и U_2 на $U_{1к}$ и $U_{2к}$ соответственно, получим

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_{1к}} &= 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right); \\ \frac{U_2}{U_{2к}} &= 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

откуда

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} + \frac{U_2}{U_{2к}}\right) - 1}; \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{\frac{1}{4}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} - \frac{U_2}{U_{2к}}\right)}{\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} + \frac{U_2}{U_{2к}}\right) - 1}}\right) - \frac{4\pi L}{\lambda_B}. \end{aligned}$$

Таким образом, для определения модуля и аргумента ККО необходимо измерить сигналы с датчиков мощности при подключении к ВЦП исследуемого устройства и согласованной нагрузки.

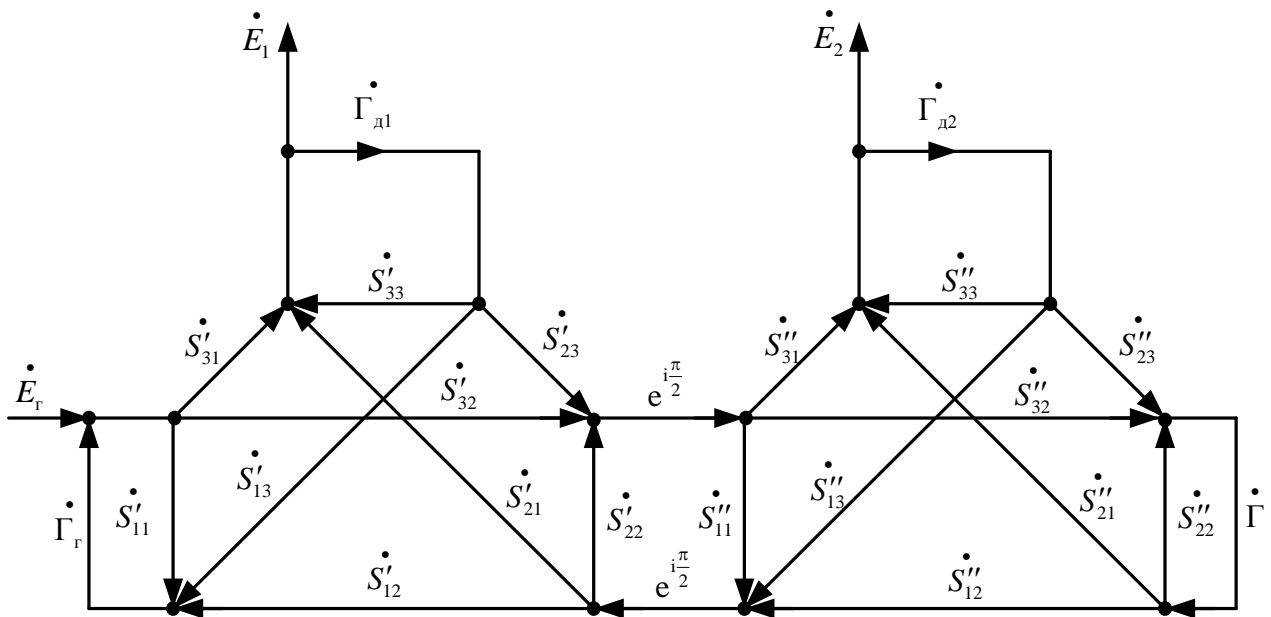


Рис. 3. Ориентированный граф микроволновой части анализатора ККО

Проанализируем работу анализатора для случая, когда ККО выхода генератора отличен от нуля.

Топологической моделью микроволновой части анализатора ККО, построенного на базе двухдетекторного ВЦП, является ориентированный граф, изображенный на рис. 3.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

\dot{E}_r – нормированная комплексная амплитуда волны генератора;

\dot{E}_1, \dot{E}_2 – нормированные комплексные амплитуды волн, ответвляемых щелями связи;

$\dot{\Gamma}, \dot{\Gamma}_r, \dot{\Gamma}_{d1}, \dot{\Gamma}_{d2}$ – ККО исследуемого устройства, выхода генератора, детекторных головок соответственно;

\dot{S}_{ij} – элементы матриц рассеяния шестиполюсников, образуемых щелевыми ответвлениями;

\dot{S} – параметры микроволнового преобразователя, представленные в топологической модели (рис. 3), весьма сложно определить, поэтому для дальнейшего анализа используем приведенный граф (рис. 4).

Обозначим $\dot{S}'_{31} = \dot{S}'_{21} = \dot{S}'_1$; $\dot{S}''_{31} = \dot{S}''_{21} = \dot{S}''_2$.

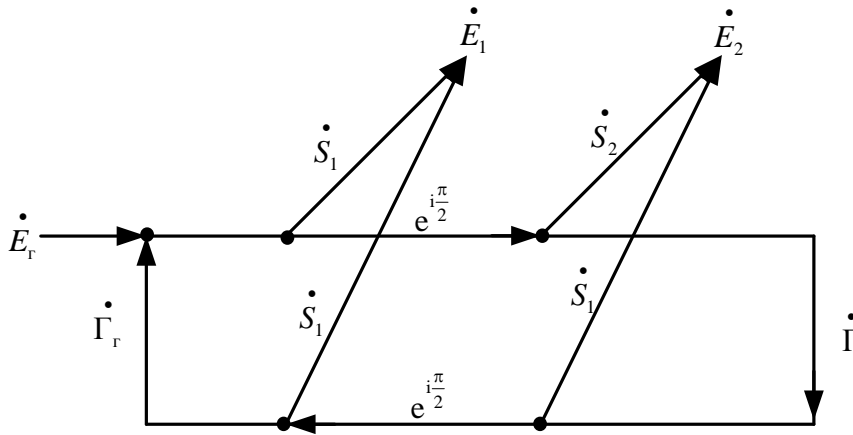


Рис. 4. Преобразованный граф микроволновой части анализатора ККО

Коэффициенты передачи \dot{S}'_1, \dot{S}''_2 щелей связи могут быть сравнительно легко измерены. При составлении приведенного графа учтено, что отражения от щелей малы, кроме того, из-за сдвига фаз ответвляемых волн, равного девяносто градусов, происходит взаимная компенсация отраженных от щелей сигналов. Переходное затухание щелей достигает 30 дБ и более, поэтому влиянием головок друг на друга можно пренебречь, а также не учитывать реакцию падающей и отраженной волн в основном тракте преобразователя на отражения от детекторных головок.

Применяя формулу Мезона [6], найдем решение ориентированного графа (рис. 4) относительно амплитуд волн \dot{E}_1, \dot{E}_2 :

$$\dot{E}_1 = \dot{S}'_1 \dot{E}_r \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma} e^{i\pi}}; \tag{4}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{S}''_2 \dot{E}_r e^{i\pi/2} \frac{1 - \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma} e^{i\pi}}. \tag{5}$$

После квадратичного детектирования сигналов (4), (5) имеем:

$$U_1 = k_1 E_r^2 \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}; \tag{6}$$

$$U_2 = k_2 E_r^2 \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}, \quad (7)$$

где U_1, U_2 – напряжения, снимаемые с диодов детекторных головок;

Γ_r, φ_r – модуль и аргумент ККО выхода генератора.

Аргумент ККО выхода генератора приведен к плоскости расположения центров щелей связи.

Совместное решение измерительных (6), (7) и калибровочных (2) уравнений позволяет исключить множители $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$. Измерительные уравнения приобретают вид

$$\frac{U_1}{U_{1к}} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}; \quad (8)$$

$$\frac{U_2}{U_{2к}} = \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (9)$$

В полученных двух уравнениях содержатся четыре неизвестные величины: измеряемые параметры Γ, φ и две константы микроволновой части — $\Gamma_r, \varphi_r(f) > 0$. Для решения уравнений относительно Γ и φ необходимо определить модуль Γ_r и фазу φ_r ККО выхода генератора.

Отраженная волна, возникающая в рассогласованном тракте, вторично отражается от выхода генератора, оказывая существенное дестабилизирующее воздействие на работу радиоэлектронных средств СВЧ, в том числе на работу ВЦП анализатора параметров волноводных устройств. Чтобы нейтрализовать это воздействие или учитывать его, необходимо знать величину комплексного коэффициента отражения выхода генератора. Существуют различные методы его измерения. Рассмотрим метод калибруемого шестиполюсника, представляющего собой датчик мощности, возбуждаемый щелью связи с основным волноводом двухщелевого ВЦП. Использование одной из детекторных головок ВЦП и получение результатов определения модуля и аргумента ККО выхода генератора в явном виде является значительным преимуществом этого метода.

Сигнал, снимаемый с детекторной головки с учетом калибровки по согласованной нагрузке, представлен выражением (8):

$$\frac{U_1}{U_{1к}} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)\right)}.$$

В качестве калибровочной нагрузки использован подвижный короткозамыкатель с параметрами $\Gamma = 1, \varphi = 180^\circ$. При первой калибровке подсоединяют короткозамыкающую пластину к выходному фланцу МВП. Величина отношения $\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1$, станет равной

$$\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1 = \frac{2\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)\right)}{1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)} = \frac{4\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (10)$$

Сместив пластину подвижного короткозамыкателя на электрическое расстояние, соответствующее 180° , при второй калибровке получаем

$$\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2 = \frac{4\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (10) и (11) позволяет найти значения модуля Γ_r и аргумента φ_r . Перепишем уравнения в несколько иной форме:

$$1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right) = \frac{4\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1}; \quad (12)$$

$$1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right) = \frac{4\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}. \quad (13)$$

Просуммировав эти уравнения, находим модуль Γ_r :

$$\Gamma_r = \sqrt{\left(\frac{2\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1} + \frac{2\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}\right) - 1}. \quad (14)$$

Вычитая из уравнения (12) уравнение (13) и преобразовав полученный результат, определим значение аргумента φ_r

$$\varphi_r = \arccos \left(\frac{\frac{\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1} - \frac{\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}}{\Gamma_r} \right) - \frac{4\pi L}{\lambda_B}. \quad (15)$$

При вычислении φ_r в уравнение (15) следует подставить значение Γ_r , найденное из уравнения (14).

Таким образом, решение уравнений (14) и (15) определяет величины модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения выхода генератора. Подстановка их в уравнения (8) и (9) дает возможность вычислить значения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения исследуемого устройства. При этом точное решение системы этих

уравнений исключает погрешность при определении искомым параметров Γ и φ , вызванную отражением волны от выхода генератора.

Для упрощения решения уравнений (8) и (9) перепишем их в несколько измененном виде:

$$A_1(X^2 + Y^2) + B_1X - C_1Y + D_1 = 0, \quad A_2(X^2 + Y^2) - B_2X - C_2Y + D_2 = 0.$$

Здесь введены следующие обозначения: $X = \Gamma \cos \varphi$; $Y = \Gamma \sin \varphi$;

$$A_1 = (1 - U_{1н} \Gamma_r^2); \quad A_2 = (1 - U_{2н} \Gamma_r^2); \quad B_1 = 2(1 + U_{1н} \Gamma_r \cos \varphi_r); \quad B_2 = 2(1 - U_{2н} \Gamma_r \cos \varphi_r);$$

$$C_1 = 2U_{1н} \Gamma_r \sin \varphi_r; \quad C_2 = 2U_{2н} \Gamma_r \sin \varphi_r; \quad D_1 = (1 - U_{1н}); \quad D_2 = (1 - U_{2н});$$

$$U_{1н} = \frac{U_1}{U_{1к}}; \quad U_{2н} = \frac{U_2}{U_{2к}}.$$

При этом $\frac{4\pi L}{\lambda_{в}} = 2\pi n$, где n — целое число.

Получив из решения этой системы реальную X и мнимую Y составляющие ККО, находят модуль Γ и аргумент φ по формулам

$$\Gamma = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right).$$

Следует отметить, что при определении аргумента ККО выхода генератора нужно знать не только численное значение φ_r , но и его знак. Данная задача решается путем незначительного изменения частоты измерительного генератора относительно исходной частоты f [2]:

$$\text{если } |\varphi_r(f + \Delta f)| > |\varphi_r(f)|, \text{ то } \varphi_r(f) < 0;$$

$$\text{если } |\varphi_r(f + \Delta f)| < |\varphi_r(f)|, \text{ то } \varphi_r(f) > 0.$$

Таким образом, предложены и исследованы метод построения и математическая модель калибруемого анализатора комплексного коэффициента отражения волноводных устройств, построенного на основе конструктивно простого двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Исключение влияния на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части прибора осуществлено путем проведения калибровочных операций. Рассмотренная методика определения модуля и фазы ККО выхода генератора позволила уменьшить погрешность прибора, обусловленную переломом волны от генератора. Реализация микроволновой части анализатора может быть осуществлена на базе любого типа металлодиэлектрического волновода.

Исследование анализатора комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы комплексного коэффициента передачи

Благодаря применению двух каналов в микроволновом преобразователе, можно измерять не только ККО, но и комплексный коэффициент передачи (ККП). Волна генератора, пройдя исследуемый четырехполюсник, поступает в верхний канал ВЩП. На диоды СВЧ благодаря щелям связи, прорезанным в широкой стенке верхнего волновода, ответвляются сигналы, пропорциональные амплитуде прошедшей волны. Кроме того, при работе анализатора в данном режиме на диоды датчиков мощности воздействуют еще два СВЧ-сигнала: один, пропорциональный амплитуде падающей волны, другой — отраженной.

Топологической моделью СВЧ-части анализатора в режиме измерения ККП является ориентированный граф, изображенный на рис. 5.

После преобразования графа, рассматривая работу анализатора ККП для идеализированного случая, когда выход генератора идеально согласован, $\Gamma_H = 0$ и заменяя обозначения: S_{11x} на Γ , S_{21x} на T , запишем решение графа.

Результирующие нормированные комплексные амплитуды волн \dot{E}_1 , \dot{E}_2 , ответвленных щелями связи нижнего и верхнего волноводов определяются соотношениями

$$\dot{E}_1 = \dot{S}_1 \dot{E}_r [1 + \dot{\Gamma} + T]; \tag{16}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{S}_2 \dot{E}_r e^{\frac{j\pi}{2}} [1 - \dot{\Gamma} - T]. \tag{17}$$

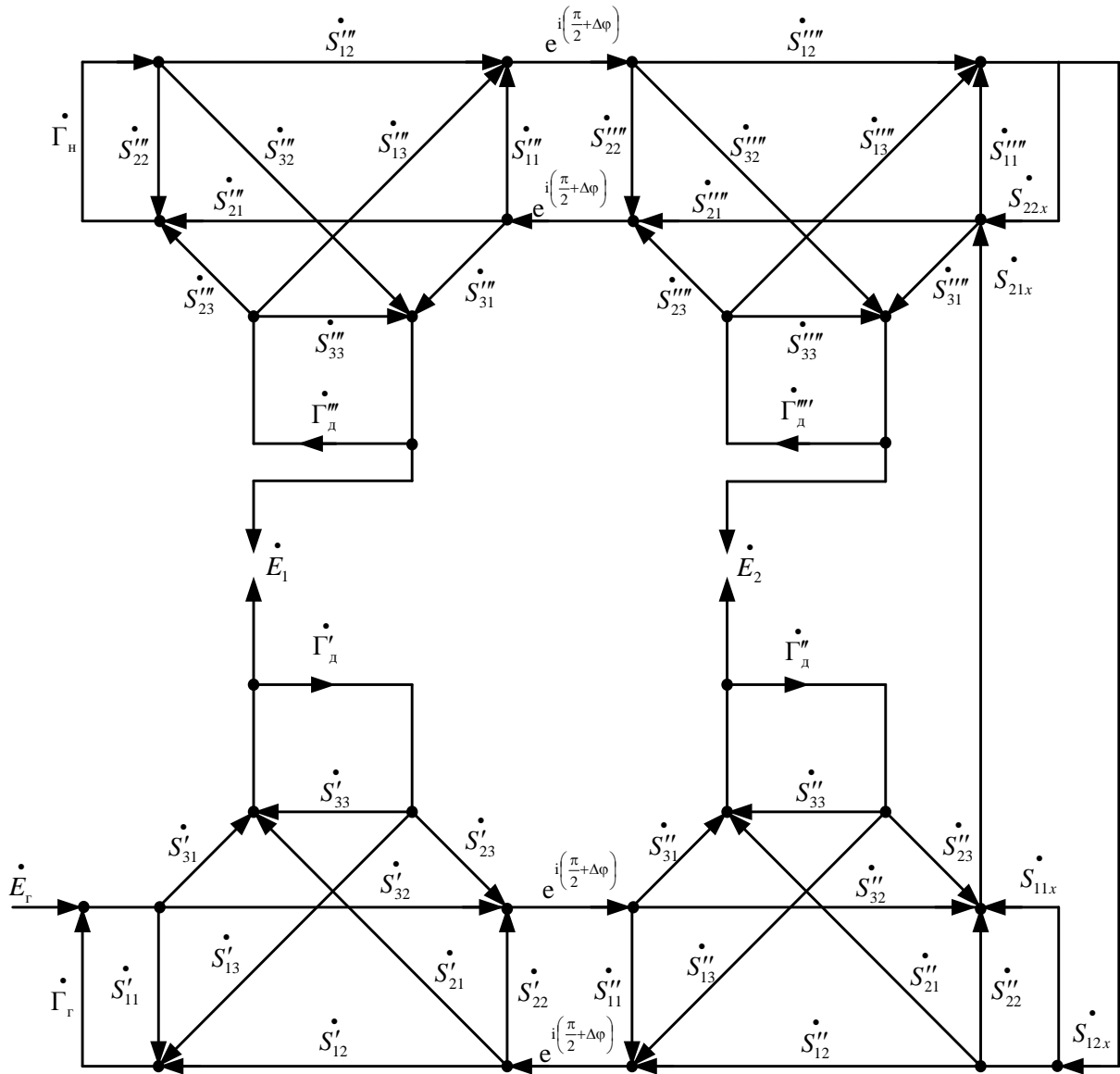


Рис. 5. Ориентированный граф СВЧ-части анализатора в режиме измерения ККП

После квадратичного детектирования сигналов (16), (17) имеем

$$U_{1T} = k_1 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)); \tag{18}$$

$$U_{2T} = k_2 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)); \tag{19}$$

где U_{1T} , U_{2T} – напряжения, снимаемые с диодов детекторных головок при измерении модуля и аргумента коэффициента передачи;

T и ψ – модуль и аргумент ККП исследуемого четырехполюсника.

Совместное решение измерительных (18), (19) и калибровочных (2) уравнений позволяет исключить множители $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$. Измерительные уравнения приобретают вид

$$\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (20)$$

$$\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi). \quad (21)$$

Учитывая (3), имеем

$$\frac{U_1}{U_{1\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi; \quad (22)$$

$$\frac{U_2}{U_{2\kappa}} = 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \varphi, \quad (23)$$

где $\frac{U_1}{U_{1\kappa}}$, $\frac{U_2}{U_{2\kappa}}$ – результаты измерений сигналов с датчиков мощности при работе анализатора в режиме измерения ККО, уравнения (20) и (21) с учетом (22) и (23) приобретают вид

$$\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} = \frac{U_1}{U_{1\kappa}} + T^2 + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi);$$

$$\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} = \frac{U_2}{U_{2\kappa}} + T^2 - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi).$$

Поскольку модуль и аргумент ККО уже измерены, неизвестными в этих двух уравнениях являются модуль T и аргумент ψ ККП. Для их определения преобразуем уравнения путем их суммирования и вычитания.

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) + \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = 2T^2 + 4\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (24)$$

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) - \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = 4\Gamma T \cos \psi. \quad (25)$$

Для сокращения записи введем обозначения левых частей уравнений:

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) + \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = M;$$

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) - \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = H.$$

Константы M и H подставим в уравнения (24) и (25) и проведем дополнительное их преобразование:

$$M = 2\Gamma^2 \cos^2 \psi + 2T^2 \sin^2 \psi + 4\Gamma T \cos \varphi \cos \psi + 4\Gamma T \sin \varphi \sin \psi;$$

$$T \cos \psi = \frac{H}{4}; \quad (26)$$

$$\text{или } M = \frac{H^2}{8} + 2T^2 \sin^2 \psi + H\Gamma \cos \varphi + 4\Gamma T \sin \varphi \sin \psi. \quad (27)$$

Из уравнения (27) находим — $T \sin \psi$.

$$(T \sin \psi)_{1,2} = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (28)$$

Единственность решения уравнения (28) определяется конкретными значениями найденных параметров: Γ , φ , H , M . Обозначим правую часть этого равенства символом P , то есть

$$T \sin \psi = P = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (29)$$

Учитывая (26) и (29), модуль T комплексного коэффициента отражения равен

$$T = \sqrt{T^2 \cos^2 \psi + T^2 \sin^2 \psi} = \sqrt{\frac{H^2}{16} + P^2} .$$

При этом с учетом выражений (26) и (29), фаза ψ ККП определится соотношением

$$\psi = \arctg \left(\frac{4P}{H} \right) .$$

Выводы

Таким образом, разработан и предложен анализатор комплексных параметров СВЧ-устройств, построенный на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя, который позволяет измерять не только модуль и фазу комплексного коэффициента отражения, но и модуль, и фазу комплексного коэффициента передачи исследуемого четырехполюсника. При этом исключение влияния на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части анализатора осуществлено путем проведения калибровочных операций.

Библиографический список

1. **Бондаренко, И.К.** Автоматизация измерений параметров СВЧ-трактов / И.К. Бондаренко, Г.А. Дейнега, З.В. Маграчев. – М.: Сов. радио, 1969. – 304 с.
2. **Гимпилевич, Ю.Б.** Калибруемый измеритель комплексного коэффициента отражения на основе двухканального микроволнового преобразователя / Ю.Б. Гимпилевич, В.И. Носкович // Радиотехника. 2006. Вып. 145. С. 130–134.
3. **Афонин, И.Л.** Исследование частотно-фазовой зависимости в волноводно-щелевом ответвителе / И.Л. Афонин, И.В. Лашенко // Академія ВМС ім. П.С. Нахімова: зб. наук. пр. – Севастополь, 2010. Вип. 1 (1). С. 54–57.
4. **Семенов, Н.А.** Техническая электродинамика: учеб. пособ. для вузов / Н.А. Семенов. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
5. Пат. 99989 Україна, МПК^{2006.01} G 01 R 27/06. Вимірник комплексних параметрів НВЧ пристроїв / Бугайов П.О., Афонін І.Л., Боков Г.В., Саламатін В.В., заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. № а201111329; заявл. 26.09.11; опубл. 25.10.12, Бюл. № 20.
6. **Силаев, М.А.** Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. радио, 1970. – 248 с.

Дата поступления
в редакцию 06.05.2013

I.L. Afonin, P.A. Bugayov, V.I. Noskovich

ANALYZER THE COMPLEX PARAMETERS OF MICROWAVE DEVICES

Sevastopol National technical university

Purpose: Creating new analyzer complex parameters of microwave devices based on dual two-detector waveguide-slot drive.
Design / methodology / approach: Analyzer is based on a two-channel two-detector-plane waveguide transducer, in which, the influence on the result of interfering effects of microwave own constants, through calibration operations.
Findings: An analyzer based on waveguide-slot converter is shown in detail.
Research limitations/implications: Analysis of complex parameters of microwave devices.
Originality/value: Using the new analyzer complex parameters of microwave devices simplifies the design and manufacture of waveguide-slot converter reliability paid off for the same functionality, ie, measuring how complex transfer and complex reflection coefficient without increasing measurement error and its bandwidth.

Key words: analyzer, microwave parameters, complex transfer, the complex reflection coefficient.

УДК 621.372.8

Г.И. Шишков¹, А.М. Щитов²

СМЕСИТЕЛИ СВЧ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный
институт «Кварц» им. А.П. Горшкова²

Описаны принципы действия и конструкции смесителей частоты. Приведены методики расчета и проектирования балансных смесителей проходного типа и смесителя с диплексером в диапазоне частот 18-26 ГГц. Рассмотрен вариант двойного балансного смесителя на диапазон 6-18 ГГц. Приведены технические характеристики.

Ключевые слова: радиотехнические приборы, частота, смеситель, сигнал, ослабление.

Введение

Преобразователь частоты – это устройство, осуществляющее трансформацию (перенос) спектра сигнала из одной частотной области в другую.

Одним из важнейших направлений радиотехники является радиоизмерительное. Принцип действия большинства радиоизмерительных приборов СВЧ- и КВЧ-диапазонов основан на использовании преобразователей частоты. Это входные приёмные устройства, преобразующие спектр частот СВЧ-сигналов в диапазон промежуточных частот (ПЧ), где уже осуществляется регистрация и обработка сигналов (в стробоскопических осциллографах, амплифазометрах, анализаторах цепей, анализаторах спектра, частотомерах), выходные устройства, преобразующие информационные сигналы из низкочастотной области в СВЧ-диапазон для передачи к измеряемому объекту (в источниках зондирующих сигналов анализаторов цепей и импульсных рефлектометров, в измерительных генераторах и синтезаторах СВЧ).

Для преобразования частоты СВЧ-сигналов используются полупроводниковые приборы различного принципа действия и назначения, на основе которых разрабатывается необходимая номенклатура преобразователей частоты.

Наибольшее распространение получили диодные преобразователи. До настоящего времени они являются основным типом преобразователей (смесителей) частоты в радиоприёмных устройствах (РПУ) и радиоизмерительной аппаратуре (РИА) сантиметрового (см) и миллиметрового (мм) диапазонов длин волн.

Из обширного класса диодных преобразователей частоты, используемых в технике СВЧ, в данной статье рассматриваются *гармонические смесители (по первой гармонике сигнала гетеродина)*, которые являются входными устройствами высокочувствительных радиоизмерительных приборов (РИП) СВЧ: панорамных приемников, анализаторов спектра, измерителей ослабления с большим (предельным) динамическим диапазоном измерений; а также находят применение для формирования сигналов в сверхширокополосных свип-генераторах в нижнем участке СВЧ-диапазона.

Небалансные смесители

Схема простейшего *небалансного смесителя* (НБС) содержит направленный ответвитель (НО) для сложения колебаний информационного сигнала и сигнала гетеродина, перемножитель на смесительном диоде и полосовой фильтр (ПФ) для выделения преобразованного сигнала (рис. 1).

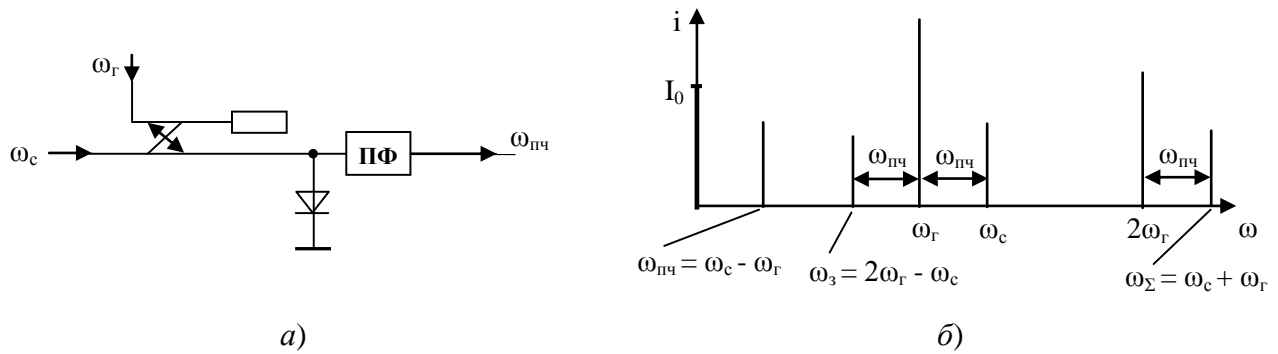


Рис. 1. Схема (а) и спектр (б) колебаний небалансного смесителя

Колебания сигнала $U_c(t) = U_c \cos(\omega_c t + \varphi_c)$ и гетеродина $U_r(t) = U_r \cos(\omega_r t + \varphi_r)$ в схеме сложения образуют биения $U(t) = U_r(t) + U_c(t)$ сложной формы, подаваемые на диод, вольт-амперную характеристику (ВАХ) которого можно аппроксимировать степенным рядом

$$i = a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + a_4 U^4 + \dots \quad (1)$$

В спектре тока диода имеется постоянная составляющая I_0 , гармоники гетеродина, гармоники сигнала и комбинационные составляющие с частотами $|\pm m\omega_c \pm n\omega_r|$, где m и n – целые числа. При условии $U_c \ll U_r \approx 1$ В смеситель осуществляет линейное преобразование спектра информационного сигнала. На выходе смесителя фильтр выделяет основной продукт преобразования – разностную (промежуточную) частоту $\omega_{пч} = \omega_c - \omega_r$.

Кроме разностной частоты (рис. 1.), в резистивных смесителях на диодах с барьером Шотки (ДБШ) примерно такую же амплитуду будут иметь колебания суммарной частоты (СЧ) $\omega_\Sigma = \omega_c + \omega_r$ и немного меньшую амплитуду колебания зеркальной частоты (ЗЧ) $\omega_3 = 2\omega_r - \omega_c$. Колебания СЧ и ЗЧ отражаются от диода в сторону входа. Поскольку они несут более половины энергии информационного сигнала, то при их поглощении в согласованном СВЧ-тракте (вентиль или аттенуатор на входе), потери преобразования $L = 10 \cdot \lg P_c / P_{пч}$, где $P_{пч}$ – мощность сигнала промежуточной частоты, будут более 6 дБ. За счет дополнительных потерь на активном сопротивлении диода и просачивании сигнала в тракт гетеродина суммарные потери преобразования НБС могут достигать 8-10 дБ. Благодаря отсутствию отражения амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) согласованного по ЗЧ НБС равномерна в широкой полосе частот, а фазочастотная характеристика (ФЧХ) – линейна.

Для уменьшения потерь преобразования в сигнальный тракт НБС вводят полосовые фильтры (ПФ) и фильтры нижних частот (ФНЧ), пропускающие информационный сигнал и отражающие в соответствующей фазе колебания ЗЧ и СЧ. Располагая фильтры на определенном расстоянии от диода, можно обеспечить условия, при которых продукты вторичного преобразования $\omega_r - \omega_3 = \omega_{пч}$ и $2\omega_r - \omega_\Sigma = \omega_{пч}$ складываются в фазе с основными колебаниями $\omega_{пч}$. Такие устройства называются смесителями с отражением или восстановлением (регенерацией) энергии ЗЧ и СЧ. Их потери преобразования могут быть снижены на ~ 2-3 дБ, но оптимальные фазовые соотношения реализуются, как правило, в узком диапазоне частот, а их АЧХ и ФЧХ неравномерны.

Серьезными недостатками схем НБС являются:

- преобразование (без подавления) амплитудных шумов гетеродина на ПЧ, что значительно увеличивает коэффициент шума ($K_{ш}$);
- высокий требуемый уровень мощности сигнала гетеродина;

- малая развязка входных/выходных трактов; высокий уровень нелинейных и интермодуляционных искажений, что ограничивает его динамический диапазон.

В силу указанных причин НБС в современных РИП СВЧ- и КВЧ-диапазонов практически не используются.

Балансные смесители

Широкое применение находят *балансные смесители*. Они могут быть двухдиодными, двойными балансными, кольцевыми и двойными кольцевыми. Анализ различных вариантов схем балансных смесителей СВЧ и примеры их конструктивного выполнения даны в [1, 2].

Основы обобщенной теории расчета смесителей на ДБШ с определением их передаточных, импедансных и шумовых характеристик подробно изложены в [3-5]. Однако вопросы практического проектирования смесителей с оптимизацией комплекса важнейших для применения в РИП характеристик: широкополосности, равномерности АЧХ и ФЧХ, развязки каналов, минимума КСВН входов/выходов и др., а также вопросы их оптимального использования в разработках РИП в специальной литературе освещены недостаточно.

Современные тенденции проектирования РИП связаны с реализацией входных устройств, включающих в себя: смесители, усилители, фильтры и т.п. – в виде единой большой гибридной интегральной схемы (ГИС). В связи с этим, привлекательны смесители в модульном исполнении или в виде интегральной схемы (ИС) на кристалле, предназначенные для встраивания в ГИС.

В диапазоне частот до 20 ГГц проектирование смесителя СВЧ, не требующего реализации очень высоких (предельных) характеристик по основным параметрам (диапазону частот, потерям преобразования, коэффициенту шума, развязке каналов и т.д.), может осуществляться с применением готовых изделий (модулей, кристаллов) и выполнением рекомендаций изготовителя по подключению и монтажу в ГИС.

Однако применение готовых смесительных модулей или ИС, имеющих, как правило, потери преобразования и $K_{ш}$ на 3-5 дБ хуже предельно достижимых, не позволяет реализовать согласующие цепи для уменьшения потерь преобразования за счет регенерации энергии ЗЧ и СЧ, ввиду наличия встроенных (неизвестных потребителю) согласующих цепей. Часто требования к смесителям РИП таковы, что невозможно подобрать готовый модуль или ИС. Примером таких устройств являются входные модули конверторов (преобразователей частоты) широкополосных РПУ [6-9].

Рассмотрим задачу синтеза смесителей (конверторов) как комплексированных СВЧ-устройств на базе оригинальных микрополосковых конструкций в виде ГИС СВЧ. Сформулируем требования к основным электрическим характеристикам смесителя:

- | | |
|----------------------------------------------------|-------------------------|
| • диапазон частот: | |
| - по входу СВЧ сигнала | 18 - 26 ГГц; |
| - по входу гетеродина | 32 ГГц; |
| - по выходу ПЧ | 6 - 14 ГГц; |
| • потери преобразования | не более 10 дБ; |
| • требуемая мощность гетеродина | не более 10 дБм |
| • уровень компрессии $\Delta K_p = 1$ дБ | $P_{вх} \geq -10$ дБм ; |
| • подавление зеркального и побочных каналов приёма | не менее 45 дБ. |

Для удовлетворения указанным требованиям будем проектировать балансные смесители на бескорпусных ДБШ или диодных сборках как единый СВЧ-узел совместно с входным и выходным фильтром в соответствии со следующим алгоритмом:

- выбор общей конструкции смесителя;

- выбор структуры и расчет конструктивно-технологических параметров фильтров исходя из требуемых характеристик по подавлению побочных каналов приема;
- комплексирование смесителя и согласующих фильтров в единое СВЧ-устройство и оптимизация его элементов для достижения заданных параметров.

Выбор общей конструкции смесителя является основополагающим этапом проектирования. В специальной литературе [1-5] можно найти много различных вариантов микрополосковых конструкций для реализации смесителя в заданном диапазоне частот. При выборе оптимальной конструкции полезно руководствоваться следующими принципами:

- симметрия схемы;
- ортогональность полей входного СВЧ-сигнала и сигнала гетеродина для увеличения развязки входов;
- простота реализации фильтров;
- максимально простая и широкополосная связь смесительного узла с СВЧ-сигналом и сигналом гетеродина;
- возможность регулировки в рабочем режиме.

Рассмотрим два варианта конструктивного выполнения смесителя:

- *смеситель проходного типа* с формированием противофазного сигнала гетеродина щелевым резонатором (рис. 2);
- *смеситель с дуплексером* по входу СВЧ-сигнала и подачей гетеродина к диодам по волноводно-щелевой линии (рис. 3).

Балансные смесители проходного типа

Конструкция балансного смесителя проходного типа показана на рис. 2.

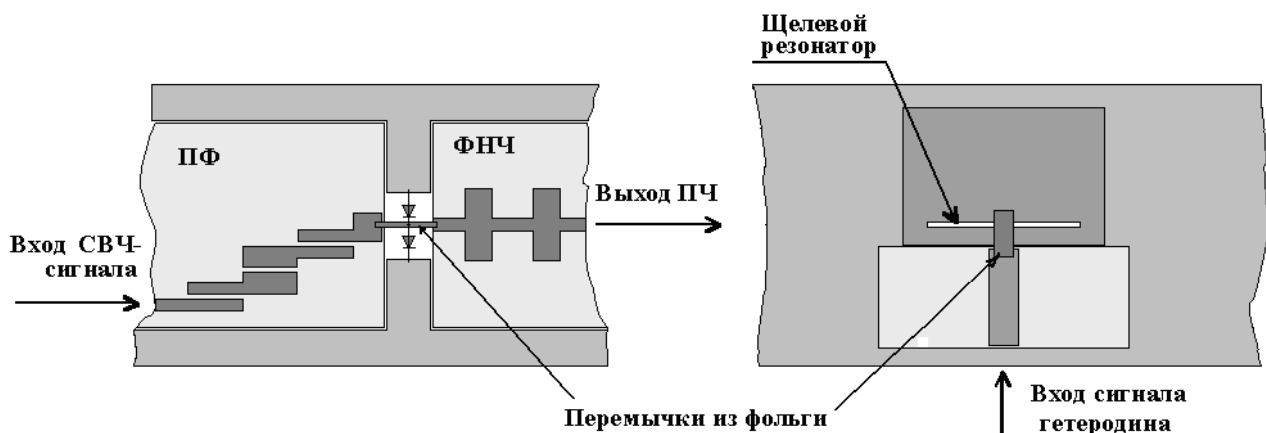


Рис. 2. Смеситель проходного типа

Основа конструкции – последовательное соединение двух микрополосковых фильтров: входного полосового (на связанных полуволновых резонаторах или шлейфового – в зависимости от диапазона частот) и выходного ФНЧ, начинающегося (со стороны диодов) индуктивной секцией. К точке соединения фильтров подключена пара смесительных диодов (разнополярно), другие выводы диодов заземлены. Для противофазного возбуждения диодов сигналом гетеродина он формируется щелевым резонатором (электрическая длина $\lambda_{г}/2$), выполненным с обратной стороны подложки в экране плат фильтров так, чтобы точки заземления выводов диодов были расположены по разным сторонам резонатора, на краях и посередине длины резонатора. Сигнал гетеродина подается по микрополосковой линии (МПЛ) и возбуждает резонатор с помощью короткозамкнутой перемычки из фольги или разомкнутым шлейфом (в виде антенны). Конструкция смесителя обеспечивает хорошую

развязку между каналом гетеродина и входом СВЧ-сигнала (выходом ПЧ) за счет симметрии и ортогональности электромагнитных полей в линиях. Конструкция удобна для настройки в рабочем режиме.

Расчет характеристик смесителей и его конструктивных элементов проведен с помощью пакета программ автоматизированного расчета СВЧ-устройств *Serenade*. Выбор структуры входного микрополоскового фильтра, типа и толщины подложки определяется возможностью его практической реализации с потерями в полосе пропускания ≈ 1 дБ и уровнем ослабления в требуемых полосах загираания (38-46 ГГц для ослабления зеркального канала и 50-58 ГГц для $f_{\text{пар.}} = 2f_r - f_{\text{пч}}$) не менее 45 дБ.

Заметим, что любая структура микрополоскового ПФ имеет паразитные полосы пропускания в диапазоне частот выше рабочей полосы. Однако, в данном случае это не вызывает необходимости расширять полосу заграждения за счет включения дополнительных ФНЧ, так как входные малошумящие усилители (МШУ), предусмотренные структурой конверторов [9], вносят заметное ослабление (≈ 20 дБ) на частотах выше их рабочего диапазона. Благодаря этому требования к вносимому ослаблению ПФ в полосах приёма по ЗК и выше могут быть ослаблены до 25 дБ, что существенно упрощает процесс расчета и практической реализации ПФ.

Требования к выходным ФНЧ – это минимальные потери в диапазоне частот выходных сигналов и максимальное вносимое ослабление (≥ 50 дБ) в полосе входных сигналов и на частотах гетеродина. Результаты расчета характеристик ПФ и ФНЧ показывают, что оптимальным вариантом представляется реализация фильтров на кварцевой подложке толщиной 0,3 мм, структура ПФ – на четвертьволновых закороченных шлейфах.

Следующий шаг автоматизированного расчета и проектирования – оптимизация конструктивно-топологических элементов смесителя в целом для достижения заданных параметров.

Для оптимизации характеристик смеситель представлялся следующей моделью (рис. 3).

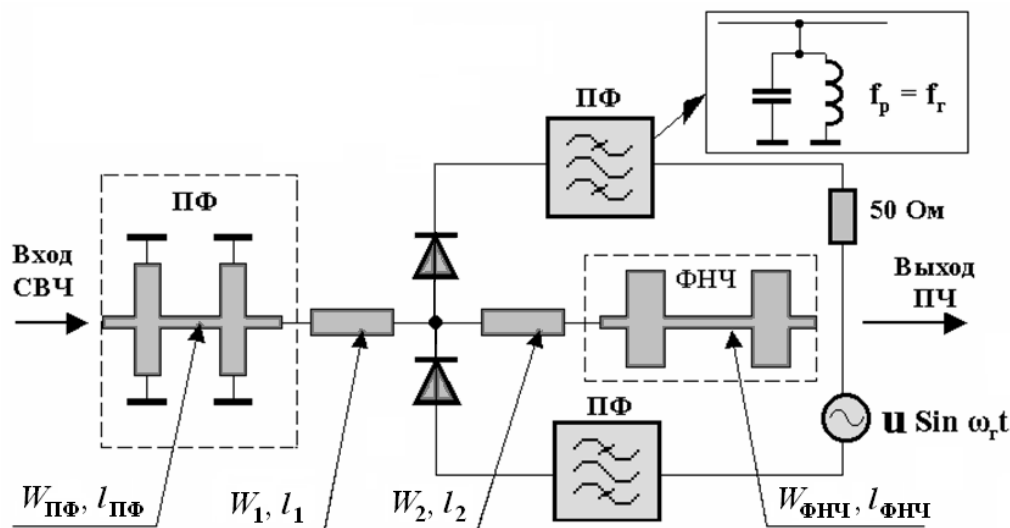


Рис. 3. Модель смесителя проходного типа

Конструктивно-топологические параметры входного ПФ: структура на четвертьволновых закороченных шлейфах и выходного ФНЧ – на индуктивно-емкостных отрезках МПЛ – задаются по результатам предварительного расчета. Между точкой подключения диодов и выходным ФНЧ вводится отрезок МПЛ (W_2, l_2) с целью образования пучности напряжения входного сигнала (на средней частоте) в точке подключения диодов при отражении от ФНЧ.

Между входным ПФ и точкой подключения диодов тоже введен отрезок МПЛ (W_1, l_1) для предотвращения шунтирования входным ПФ напряжения ПЧ. Возбуждение диодов сме-

сителя моделируется подключением источника гетеродина через высокочастотные полосовые фильтры, обеспечивающие беспрепятственное прохождение сигнала гетеродина и короткое замыкание на входе для входного СВЧ-сигнала и выходного ПЧ. Полосовые фильтры в тракте гетеродина являются вспомогательными элементами, смоделированными на сосредоточенных L, C -элементах для имитации реального режима работы смесителя. Оптимизация смесителя заключается в вариации топологических параметров в заданных пределах (длины и ширины отрезков МПЛ $(l_1, W_1), (l_2, W_2)$ и ближайших к точке подключения диодов элементов фильтров $(W_{ПФ}, l_{ПФ}), (W_{ФНЧ}, l_{ФНЧ})$ с целью достижения минимальных потерь преобразования в рабочем диапазоне частот.

Такой подход к расчету смесителя позволяет получить малые потери преобразования на $f_{пч} = f_{\bar{a}} - f_c$ за счет исключения (минимизации) потерь на частотах $f_{пч}' = f_{\bar{a}} + f_c$ и $f_{пч}'' = 2f_{\bar{a}} - f_c$: в процессе оптимизации создаются оптимальные фазовые соотношения отражающих импедансов со стороны фильтров, что способствует вторичному преобразованию сигналов $f_{пч}'$ и $f_{пч}''$ в полезный продукт с частотой $f_{пч}$, – в результате увеличивается уровень выходного сигнала.

В процессе расчета смесителей параметры арсенидо-галлиевых ДБШ ($C_0 = 0,03$ пФ, $R_s = 5,5$ Ом, $I_{max} = 30$ мА, $I_s = 10^{-13}$ А) выбирались соответствующими реальным (АА147Б, диодные микросборки разработки НИИПИ «Кварц»).

Далее приведены результаты расчета и оптимизации смесителя проходного типа диапазона частот 18-26 ГГц (рис. 4 – рис. 7). На рис. 5 IP_3 – интермодуляционная составляющая (интермодуляционные искажения третьего порядка характеризуют верхний предел динамического диапазона смесителя).

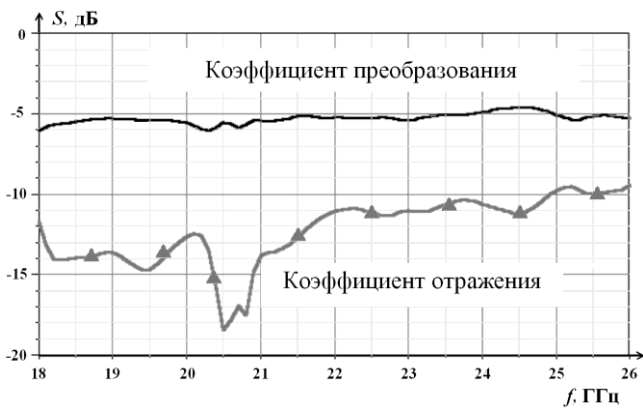


Рис. 4. Коэффициент преобразования и коэффициент отражения

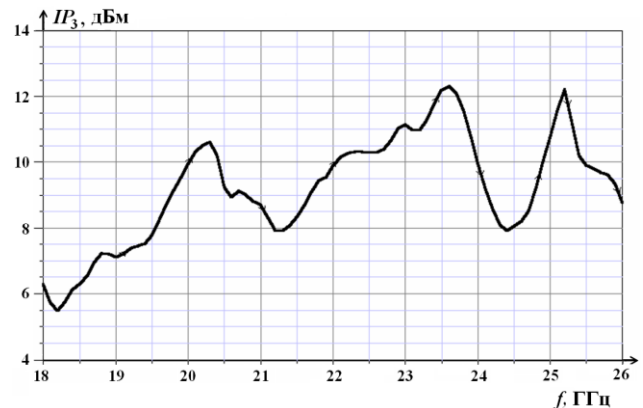


Рис. 5. Зависимость IP_3

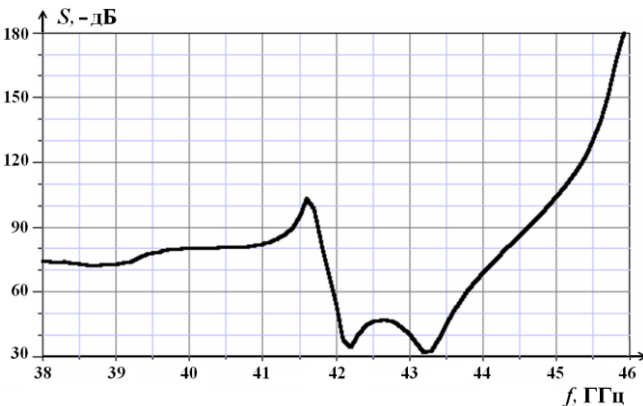


Рис. 6. Относительный уровень ослабления зеркального канала $f_{зк} = 2f_{г} - f_c$; $f_{пч} = f_{зк} - f_{г}$

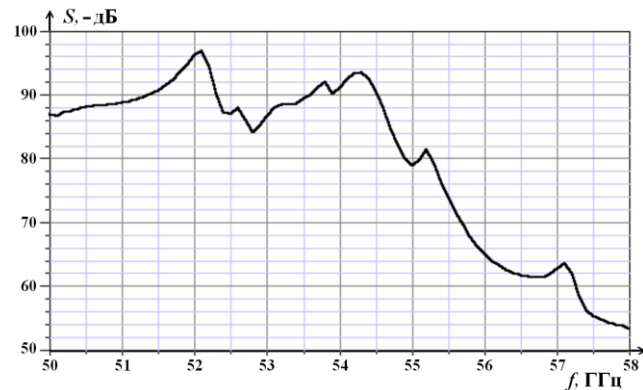


Рис. 7. Уровень ослабления суммарного канала $f_{\square к} = f_{г} + f_c$; $f_{пч} = 2f_{г} - f_{\square к}$

Балансные смесители с диплексером

Конструкция балансного смесителя с диплексером в тракте входного сигнала показана на рис. 8.

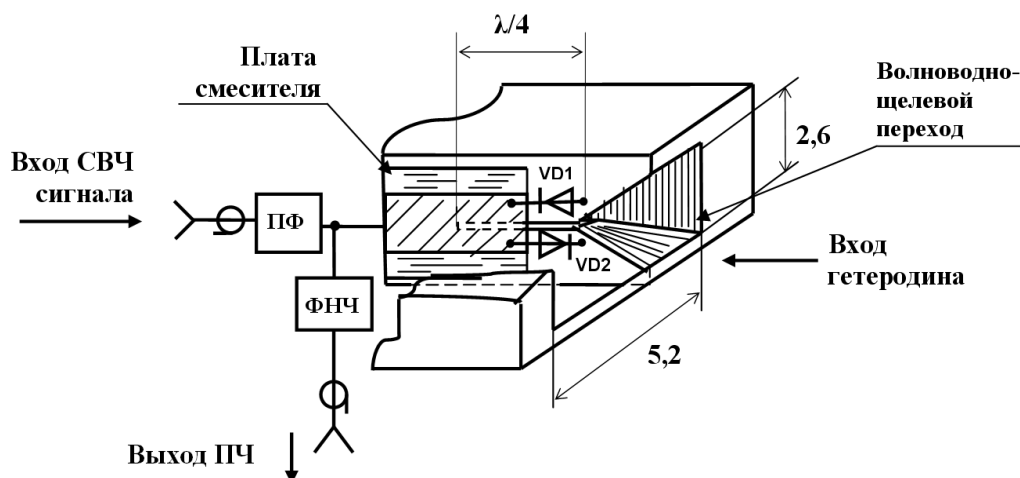


Рис. 8. Разрез конструкции смесителя с диплексером

Входной СВЧ-сигнал подается синфазно на диоды балансного смесителя через полосовой многосвязный фильтр.

Сигнал гетеродина через волноводно-щелевой переход возбуждает короткозамкнутую щелевую линию. К ее точкам, удаленным от короткозамкнутого конца на $\lambda_r/4$, подключены диоды. Входной ПФ и выходной ФНЧ образуют диплексер для развязки каналов смесителя.

Особенностью проектирования смесителей данной конструкции (с диплексером) является необходимость оптимизации топологии диплексера прежде, чем оптимизировать характеристики смесителя.

Результаты расчёта основных характеристик различных типов смесителей сведены в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики различных типов смесителей

Характеристики	Смеситель проходного типа	Смеситель с диплексером
Потери преобразования (max), дБ	7	7
Мощность гетеродина P_r (опт.), дБм*	5	6
КСВН входа сигнала (max)	2,1	2,4
Ослабление побочных каналов приёма, дБ: 3К ($2f_r - f$)	30	35
	54	65
Нелинейные искажения:		
Уровень компрессии (1 дБ), дБм	-3,5	-9
Уровень гармонических искажений $f_{пч} = 2(f_r - f_c)$, при $P_c = -10$ дБм, дБс	50	50
Уровень интермодуляционных искажений 3-го порядка (дБс) при $P_{c1,2} = -10$ дБм	31	20

Примечание: дБм – децибел относительно милливатта.

Расчёт показывает, что возможна реализация достаточно малых потерь преобразования (7 дБ с учётом ослабления в ПФ и ФНЧ) при невысоком уровне $P_r = 5$ дБм. Расчётная не-

равномерность АЧХ в полосе 40 МГц не превышает 0,1 - 0,15 дБ. Недостаточное ослабление побочных каналов приёма 20 - 30 дБ наблюдается только в тех участках диапазона частот, где входные МШУ вносят дополнительные потери не менее 30 дБ. Характеристики нелинейных искажений показывают, что максимальный уровень мощности на входе смесителя не должен превышать $-(15 - 20)$ дБм для ослабления интермодуляционных искажений 3-го порядка не менее 50 дБс.

Относительно малый уровень компрессии и подавления гармонических и интермодуляционных искажений связан с минимизацией при расчёте характеристик смесителей требуемого уровня мощности гетеродина ($P_T = 5 - 7$ дБм), что продиктовано минимальными затратами при реализации источников гетеродинных сигналов.

Заметного улучшения характеристик смесителей по нелинейным искажениям можно достичь за счёт смещения рабочей точки на ВАХ диодов внешним источником напряжения с одновременным увеличением P_T на несколько децибел (до $P_T = 10$ дБм). Результаты расчёта интермодуляционных характеристик смесителей при запирающем напряжении смещения диодов 0,5 В и $P_T = 10$ дБм показывают, что минимальное значение IP_3 смесителя проходного типа увеличивается на 7 дБ с 5,5 до 12,5 дБм.

Практически режим с повышенным уровнем подавления нелинейных искажений может быть реализован за счёт включения диодов через резистивно-емкостные цепи (автосмещение) или использование диодов с повышенным потенциальным барьером.

Все основные характеристики различных типов смесителей (проходного типа и с диплексерами) примерно одинаковы и выбор оптимального варианта, очевидно, может быть связан с конструктивными и технологическими особенностями.

Экспериментальные характеристики потерь преобразования спроектированных по результатам расчета смесителей приведены в табл. 2.

Таблица 2

Экспериментальные характеристики смесителей

$F_{вх}$, ГГц		18	19	20	21	22	23	24	25	26
$F_{пч}$, ГГц		14	13	12	11	10	9	8	7	6
Потери преобразования, дБ	Смеситель проходного типа	11,5	11,0	9,3	6,0	8,0	8,4	9,0	6,2	6,8
	Смеситель с диплексером	10,1	7,8	6,0	6,0	6,2	6,4	5,8	5,5	7,4

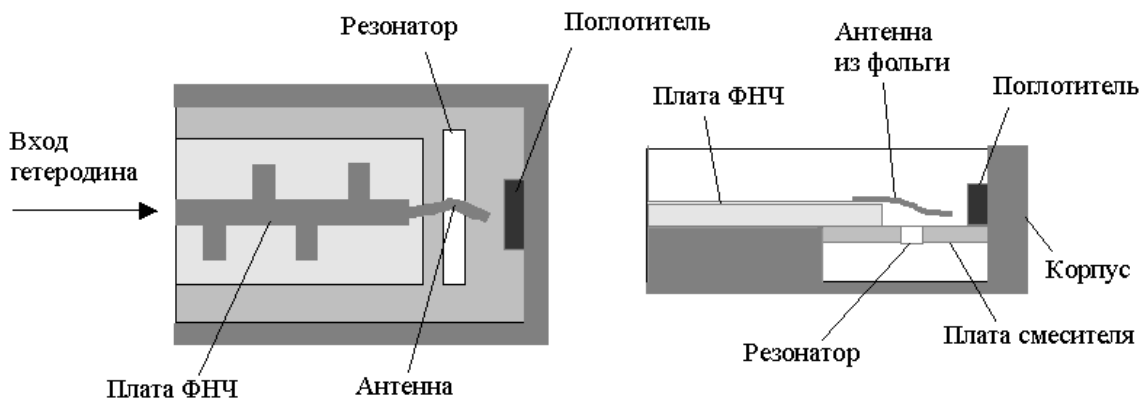


Рис. 9. Эскиз конструкции гетеродинного тракта смесителя 18 - 26 ГГц

Измерения проведены при $P_c = -10$ дБм, $F_r = 32$ ГГц и $P_r = 8,5$ дБм. В смесителях использованы диоды AA147 В, подобранные в пары по вольт-амперным и вольт-фарадным характеристикам. Результаты измерения ослабления побочных каналов приема показывают, что в обоих смесителях с МШУ на входе (18-26 ГГц, $K_p \sim 20$ дБ) зеркальный и паразитные каналы приема $2F_r - F_c$ и $F_c - 2F_r$ ослаблены не менее чем на 60 дБ.

Конструктивной особенностью смесителя проходного типа диапазона частот 18-26 ГГц является способ возбуждения щелевого резонатора, формирующего противофазные сигналы для запитки диодов. Экспериментально установлено, что в данном устройстве возбуждение щелевого резонатора более эффективно не короткозамкнутой перемычкой из фольги, а разомкнутой антенной (рис. 9).

Таблица 3

Экспериментальные характеристики конверторов

Диапазон частот по входу СВЧ сигнала, ГГц	2 – 6	18 – 26	26 – 37	37 – 42
Частота гетеродина, ГГц	16	32	44	48
Диапазон частот по выходу ПЧ, ГГц	10 – 14	6 – 14	7 – 18	6 – 11
Коэффициент передачи, дБ при $P_{вх} \leq -30$ дБм	20,6-22,5	21,5-25,8	19,5-24,2	24,0-25,0
Коэффициент шума, дБ при $P_{вх} \leq -30$ дБм	2,0-2,5	2,5-4,6	2,5-4,0	3,0-4,0
Ослабление побочных каналов приёма, дБ при $P_{вх} \leq -30$ дБм				
Зеркальный канал	50-66	45-90	51-83	68-78
Преобразование $2F_r - F_{пч}$	47-70	> 75 min	62-90	> 80
Преобразование $2F_r + F_{пч}$	–	> 88	–	> 80
Максимальная мощность сигнала ПЧ, мВт при $\Delta K = -1$ дБ	> 2	> 1	> 2	> 2
КСВН входа (max)	1,8	1,5	2,3	1,8
КСВН выхода (max)	2	1,7	1,7	1,7

Следует отметить, что оптимизация конструктивных параметров, в частности, геометрии камеры (корпуса) при возбуждении щелевого резонатора разомкнутой антенной или короткозамкнутой перемычкой, является серьезной электродинамической задачей и требует теоретической проработки, так как система щелевой резонатор с пересекающей его перемычкой является излучающей. Стенки корпуса образуют высокодобротную волноведущую структуру. Для предотвращения нежелательных интерференционных явлений (влияние крышки и стенок корпуса) целесообразно под крышку и в камеру устанавливать поглощающий материал (как показано на рисунке).

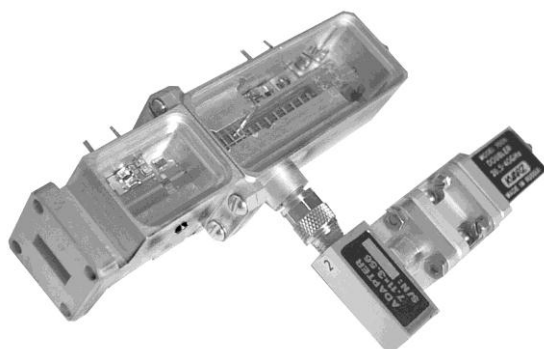


Рис. 10. Входной модуль конвертора 18-26 ГГц

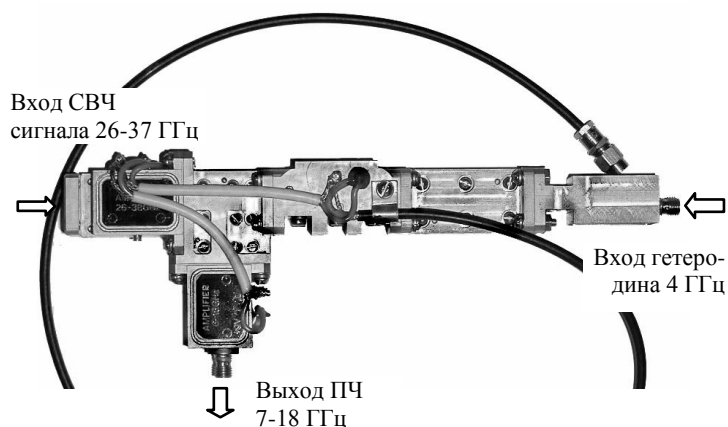


Рис. 11. Входной модуль конвертора 26-37 ГГц

Настройка смесителя производится по реализации минимальных равномерных потерь преобразования в рабочем диапазоне частот и практически сводится к незначительной коррекции топологии плат входного ПФ и выходного ФНЧ установкой пластин ($0,3 \times 0,3$ мм) из индиевой фольги.

С использованием рассмотренной методики спроектированы смесители и на их базе комплект входных широкополосных конверторов (смесители с МШУ на входе и УПЧ на выходе) [6, 7, 9] на диапазон частот 2-42 ГГц. Экспериментальные характеристики входных устройств конверторов приведены в табл. 3.

Внешний вид входных модулей конверторов приведен на рис. 10 и рис. 11.

Двойной балансный смеситель

В качестве первой ступени преобразования частоты высокочувствительных широкополосных РИП (анализаторы сигналов и спектра, панорамные приемники и т.п.) находят применение смесители с перестраиваемым по частоте сигналом гетеродина и относительно высокой фиксированной частотой ПЧ. Проектирование таких смесителей представляет особую сложность в связи с предъявляемыми к ним жесткими требованиями по потерям преобразования в широком диапазоне частот, равномерности АЧХ, высокой степени изоляции каналов, большому динамическому диапазону преобразуемых сигналов с малым уровнем нелинейных искажений и т.п. Примером такого устройства является смеситель широкополосного приемника с $F_c = 6-18$ ГГц, $F_r = 9-15$ ГГц, $F_{пч} = 2,94$ ГГц.

В НИИПИ «Кварц» разработана оригинальная конструкция двойного балансного смесителя, структурная схема которого приведена на рис. 12, внешний вид – на рис. 13. Входной СВЧ-сигнал через кольцевой синфазный делитель мощности Конна подается по МПЛ на две смесительные секции. Сигнал гетеродина с копланарного волновода разделяется двумя щелевыми линиями и противофазно возбуждает пары смесительных диодов. Выходной сигнал ПЧ снимается со средних точек диодов, суммируется в противофазе трансформатором на ферритовом сердечнике, далее усиливается и проходит на выход через ПФ.

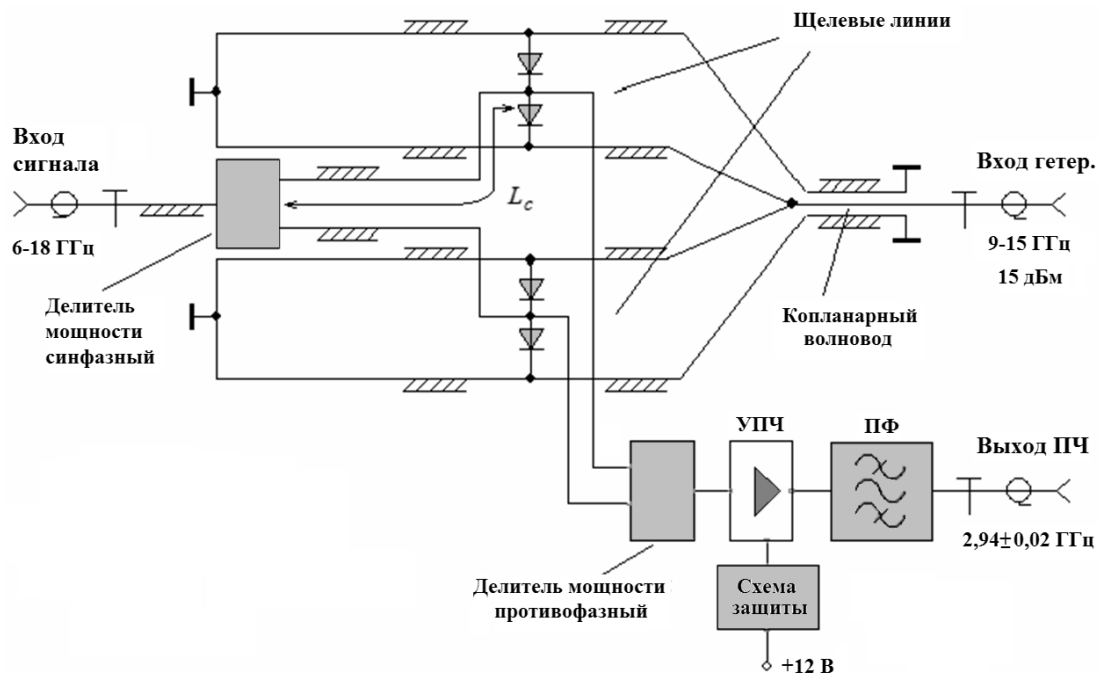


Рис. 12. Структурная схема смесителя 6-18 / 2,94 ГГц

Для эффективного возбуждения сигналом гетеродина щелевые линии замкнуты на расстоянии $L_T = \lambda_{г.ср} / 4$ - четверти длины волны средней частоты гетеродина ($f_{г.ср} = 12$ ГГц).

Волновое сопротивление щелевых линий выбрано $Z_{щ} = 100$ Ом для минимизации коэффициента отражения со входа гетеродинного сигнала. Волновое сопротивление копланарного волновода 50 Ом. Электрическая длина 50-омных микрополосковых линий сигнала от кольцевого делителя мощности до точки подсоединения диодов (L_c) выбирается равной четверти длины волны на частоте ПЧ (2,94 ГГц), что обеспечивает пучность напряжения сигнала ПЧ на диодах и минимум его на сигнальном входе.

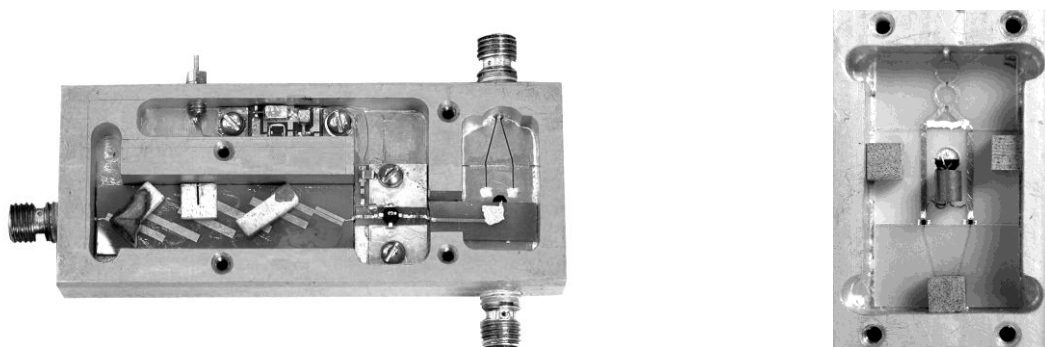


Рис. 13. Внешний вид смесителя 6 – 18 ГГц

В качестве смесительных диодов использованы микросборки из двух диодов (разработки НИИПИ «Кварц») [10].

Усилитель сигнала ПЧ выполнен на микросхеме ERA-3 ф. Mini-Circuits (USA). Полосовой фильтр – микрополосковый на полуволновых связанных резонаторах – изготовлен на высокочастотной керамической подложке с $\epsilon = 40$ с целью уменьшения габаритов. Конструктивно смеситель выполнен в виде микросборки с тремя коаксиальными разъемами 3,5/1,5 мм (гнездо) и НЧ вводом питания +12 В. Габаритные размеры смесителя 70×48×12 мм.

В табл. 4 приведен коэффициент передачи смесителя, измеренный при входной мощности СВЧ-сигнала $\sim 0,1$ мВт и мощности сигнала гетеродина ~ 40 мВт. Частота гетеродина перестраивалась в пределах 9-15 ГГц. Для диапазона входных сигналов 6-12 ГГц $f_{пч} = f_{г} - f_{с}$, а для диапазона 12-18 ГГц $f_{пч} = f_{с} - f_{г}$.

Таблица 4

Коэффициент передачи смесителя 6-18 ГГц

f_c , ГГц	6	8	10	12	12	14	16	18
f_g , ГГц	8,94	10,94	12,94	14,94	9,06	11,06	13,06	15,06
K_p , дБ	1,0	3,9	5,5	2,3	3,5	4,8	0,7	2,1

Коэффициент преобразования смесителя – в пределах 0,7 - 5,5 дБ. Приведённые результаты получены при подключении к сигнальному входу смесителя вентиля, а к выходу ПЧ – ФНЧ с частотой среза 8 ГГц. Вентиль обеспечивает КСВН устройства не более 1,4 и увеличивает «развязку» между каналами. Собственная «развязка» входов смесителя (гетеродин-сигнал) 20-30 дБ. ФНЧ вносит затухание не менее 40 дБ в диапазоне паразитных полос пропускания ПФ (8-18 ГГц). Поскольку стандартные вентили предназначены для диапазона частот 8-18 ГГц, то на частоте 6 ГГц они вносят ослабление 2-3 дБ, чем и объясняется снижение K_p смесителя на нижней границе частотного диапазона.

Широкая номенклатура смесителей СВЧ, разработанных в НИИПИ «Кварц», представлена в [11].

Библиографический список

1. Твердотельные устройства СВЧ в технике связи / Л.Г. Гассанов [и др.]. – М.: Радио и связь, 1988. – 288 с.
2. Радиоприемные устройства / В.Н. Банков [и др.]; под ред. Л.Г. Барулина. – М.: Радио и связь, 1984. – 272 с.
3. **Розанов, Б.А.** Приемники миллиметровых волн / Б.А. Розанов, С.Б. Розанов. – М.: Радио и связь, 1989. – 168 с.
4. **Maas, S.A.** Nonlinear Microwave circuits. 1988. – 480 p.
5. **Vendelin, G.D.** Microwave Circuit Design Using Linear and Nonlinear Techniques. 1990. – 757 p.
6. **Щитов, А.М.** Широкополосные конверторы для радиоприёмных устройств СВЧ диапазона 2-42 ГГц. / А.М. Щитов [и др.] // Радиолокация. Навигация. Связь: сборник докладов XII Международной научно-технической конференции. Воронеж. 2006. Т. 1. С. 642–653.
7. **Щитов, А.М.** Широкополосные преобразователи частоты (конверторы) для радиоприёмных устройств СВЧ-диапазона 1-42 ГГц. / А.М. Щитов [и др.] // Материалы XV координационного семинара по СВЧ-технике. Нижний Новгород 2007 С. 120-124.
8. **Щитов, А.М.** Широкополосные преобразователи частоты диапазона 40-60 ГГц. Проблемы проектирования / А.М. Щитов [и др.] // Успехи современной радиоэлектроники. 2010. №2. С. 43-51.
9. **Щитов, А.М.** Многофункциональные комплексированные устройства СВЧ – элементная база современной радиоэлектронной аппаратуры / А.М. Щитов [и др.] // Антенны. 2004. Вып. 7 (86). С. 31–39.
10. **Зайцев, Ю.С.** Монолитные диодные пары с барьером Шоттки на GaAs для преобразователей частоты миллиметрового диапазона длин волн / Ю.С. Зайцев [и др.] // Передовой опыт. Горький. 1990. № 3. С. 30–33.
11. Коаксиальные, волноводные и оптические устройства // Каталог НИИПИ «Кварц». – Н. Новгород, 2010.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2012*

G.I. Shishkov, A.M. Schitov

MICROWAVE MIXERS

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

The frequency mixers principle of operation and its designs are describes. It presents the methods for calculation of the balanced transmission-type mixers and the mixer with the diplexer in 18-26 GHz range. In addition, comparative calculated behaviors and experimental results, concordant with a calculation, are obtained.

The article also contains the results of the design of the frequency converters for frequency range 2-42 GHz, based on involved mixers.

Moreover, it considers a variant of the original-structured double balanced mixer for 6-18 GHz range, which has found an application in the broadband panoramic receiver.

Key words: radio devices, frequency, mixer, signal, attenuation.

УДК 621.396

Г.С. Малышев, А.С. Раевский

ВЛИЯНИЕ ДИСПЕРСИИ ВОЛОКОННОГО СВЕТОВОДА НА ПРОХОЖДЕНИЕ ФРАКТАЛЬНОГО ИМПУЛЬСА В ЗАШУМЛЕННОМ КАНАЛЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен результат численного эксперимента по исследованию прохождения фрактального импульса через одномодовый волоконный световод с учетом хроматической дисперсии. Наряду с полезным сигналом передавался маскирующий шумовой сигнал. Показано, что для эффективной очистки фрактального сигнала от шума на выходе волоконно-оптической линии связи необходимо наряду с кодом фрактального сигнала знать коэффициент дисперсии волоконного световода.

Ключевые слова: фрактальный импульс, дисперсия, белый гауссов шум, дискретное вейвлет-преобразование.

Введение

В настоящее время разработаны специальные средства незаметного считывания информации с волоконно-оптических линий связи (ВОЛС). В связи с этим необходимо применять специальные методы защиты передаваемой по ВС информации. Одним из эффективных методов предотвращения несанкционированного доступа к информации является криптографическое шифрование данных [1]. Однако при таком подходе подразумевается, что факт наличия в канале связи передаваемого сообщения заранее известен злоумышленнику. В результате вопрос защиты информации сводится к выбору криптостойкого шифрования, что само по себе является сложной задачей.

В то же время можно пойти по другому пути: скрыть от злоумышленника сам факт передачи информации. Для этого можно использовать сигналы, имеющие шумоподобный характер. Одним из подходов к решению данной задачи является применение для модуляции оптической несущей фрактальных сигналов [2], имеющих шумоподобную структуру. Благодаря такой структуре они незаметны на фоне шумов, что делает невозможным детектирование информационной посылки по максимуму интенсивности импульса. Для генерирования фрактальных сигналов используются программируемые генераторы [3].

Для маскировки информационного сигнала необходимо обеспечить искусственное зашумление передаваемых данных и передавать поляризованный отвлекающий сигнал высокой интенсивности, который на приемном конце ВОЛС может быть удален при помощи анализатора. Для выделения фрактальных импульсов из маскирующего шумового сигнала необходимо применять цифровые методы очистки от шума [4]. Однако эффективно протектировать очищенный импульс можно лишь в том случае, если априори известна структура самого фрактального сигнала. Именно эти преимущества фракталов обеспечивают высокую скрытность передаваемой информации. Однако в ВС существенную роль будет играть эффект дисперсии [5], что требует внесения специальных корректировок в алгоритм выделения информационных импульсов из шума.

Описание фрактального сигнала

Возьмем за основу фрактальный импульс $\psi(t)$, который определяется следующим образом [4]:

$$\psi(t) = \frac{1}{c_\psi} \left| F U W B \left(\frac{t-b}{T_0} \right) \right|, \quad (1)$$

где c_ψ - нормировочный коэффициент; T_0 - полная длительность фрактального импульса; b - смещение центра симметрии сигнала по оси абсцисс;

$$FUWB(t) = \left[1 - \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n \cos(3\beta^n (2t-1)) \text{sign}(2t-1) \Theta(t) \right];$$

$$\text{sign}(t) = \begin{cases} 1, t > 0 \\ 0, t = 0 \\ -1, t < 0 \end{cases}, \quad \Theta(t) = \eta(t) - \eta(t-1), \quad \eta(t) = \begin{cases} 1, t \geq 0 \\ 0, t < 0 \end{cases}.$$

На рис. 1, *a*, *b* показаны соответственно временная реализация квадрата амплитуды фрактального импульса (1) и его амплитудный спектр, построенные для значений $T_0 = 0.5$ нс, $b = -T_0/2$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 2$.

В настоящей статье будем рассматривать ВОЛС с модуляцией оптической несущей по интенсивности, под спектром сигнала будем понимать спектр огибающей. Для построения спектра (рис. 1, *b*) использовался алгоритм быстрого преобразования Фурье. По оси ординат откладываются абсолютные значения интеграла Фурье

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \psi(t) e^{-i\omega t} dt.$$

Выделение фрактального сигнала из шума

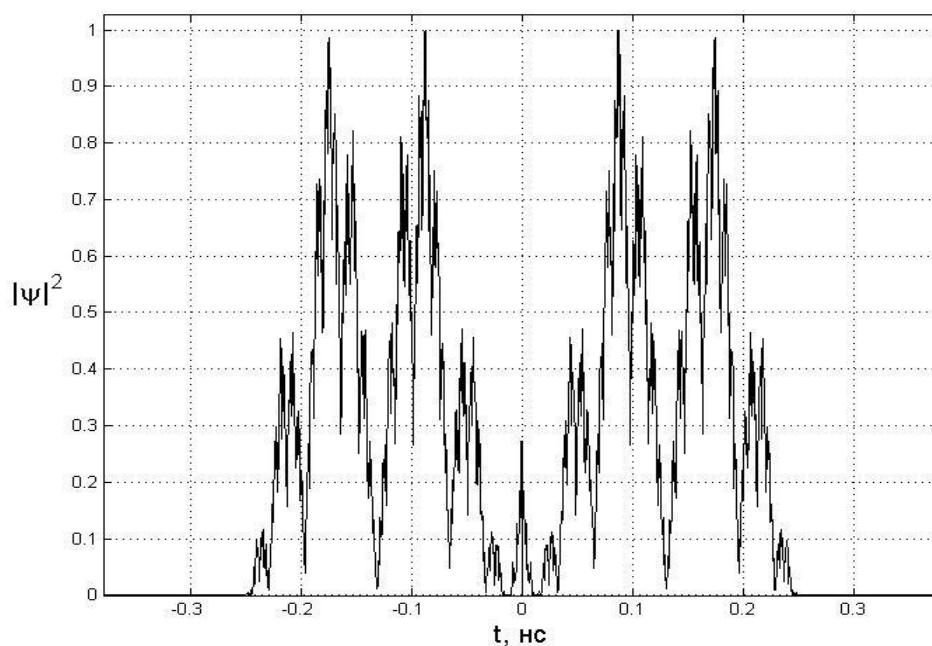
В работе [4] показано, что для оптимальной фильтрации таких сигналов можно использовать метод быстрого дискретного вейвлет - преобразования, так как он является одним из самых чувствительных за счёт свойства масштабирования вейвлетов [6]. Более того, этот метод отличается высоким быстродействием, так как основан на вычислении линейных свёрток с фильтрами вейвлетов [7]. Однако не существует универсальной методики, которая позволила бы определить тип того вейвлета, фильтр которого производил бы наилучшую очистку сигнала от шума. Для каждого конкретного вида сигналов необходимо подбирать один из существующих вейвлетов. Поэтому для очистки от шума были проверены четыре типа вейвлетов – вейвлеты Добеши, койфлеты, симлеты и биортогональные вейвлеты. Путём численного эксперимента было установлено, что для очистки сигнала (1) больше всего подходят вейвлеты Добеши. В частности, использовался вейвлет Добеши 8 (*db8*), фильтры которого содержат по 16 элементов. Далее под фильтрами будем понимать именно фильтры вейвлетов.

В качестве модели шума использовался дискретный белый гауссов шум (БГШ) с фактически нулевым математическим ожиданием и конечным числом отсчётов. В отличие от своего непрерывного аналога, дискретный БГШ имеет конечную дисперсию [7]. Название БГШ связано с тем, что график выборочной автокорреляционной функции дискретного шума имеет в центре резкий пик. При увеличении числа элементов дискретного БГШ величина этого пика также возрастает. В то же время известно, что автокорреляционная функция непрерывного БГШ математически описывается через дельта-функцию Дирака. Именно на основании этой аналогии дискретный БГШ получил своё название. Выборочная автокорреляционная функция представляет собой массив, элементы которого определяются следующим образом:

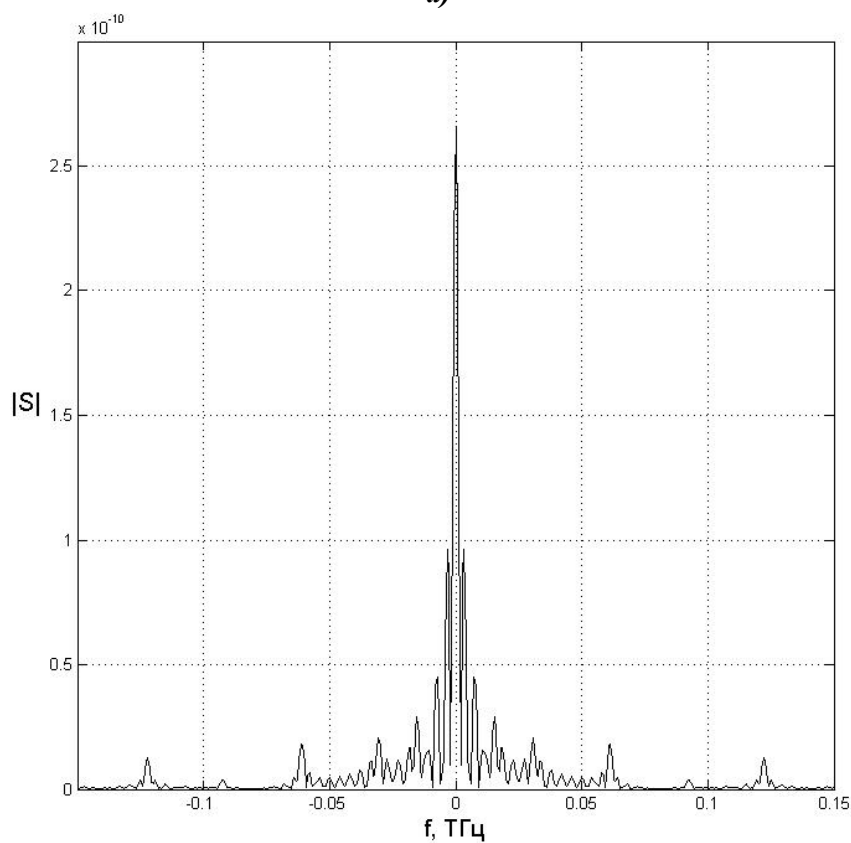
$$r_k = \frac{\sum_{n=k+1}^N (x_n - m_x)(x_{n-k} - m_x)}{\sum_{n=1}^N (x_n - m_x)^2}, \quad k = 1, 2, \dots, (2N-1),$$

где N – это число элементов массива $\{x_k\}$; m_x - это математическое ожидание дискретной случайной величины. Как уже отмечалось, в случае дискретного БГШ с конечным числом элементов $m_x \approx 0$. Для бесконечного числа элементов выполняется строгое равенство $m_x = 0$. Для моделирования массива дискретного БГШ необходимо использовать генератор случай-

ных чисел, распределённых по нормальному закону.



a)



б)

Рис. 1. Характеристики фрактального импульса (1), построенные для значений $T_0 = 0.5$ нс, $b = -T_0/2$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 2$.

a – временная реализация квадрата амплитуды фрактального импульса;

б – амплитудный спектр фрактального импульса

В настоящей работе при моделировании зашумлённого сигнала на выходе приёмника полагалось, что дискретный БГШ является аддитивным шумом, то есть суммируется с основным сигналом. В результате мы получаем реализацию $\xi(t)$, образец которой показан на рис. 2. Численно реализация $\xi(t)$ представляется как сумма двух массивов, первый из которых состоит из дискретных отсчётов незашумлённого сигнала $P(t) = |\psi(t)|^2$, а второй представляет собой дискретный БГШ. Функция $\psi(t)$ определяется с помощью выражения (1). Для зашумления сигнала генерировался дискретный БГШ с выборочной дисперсией 0.04 и соответствующим стандартным отклонением в $\sqrt{0.04} = 0.2$.

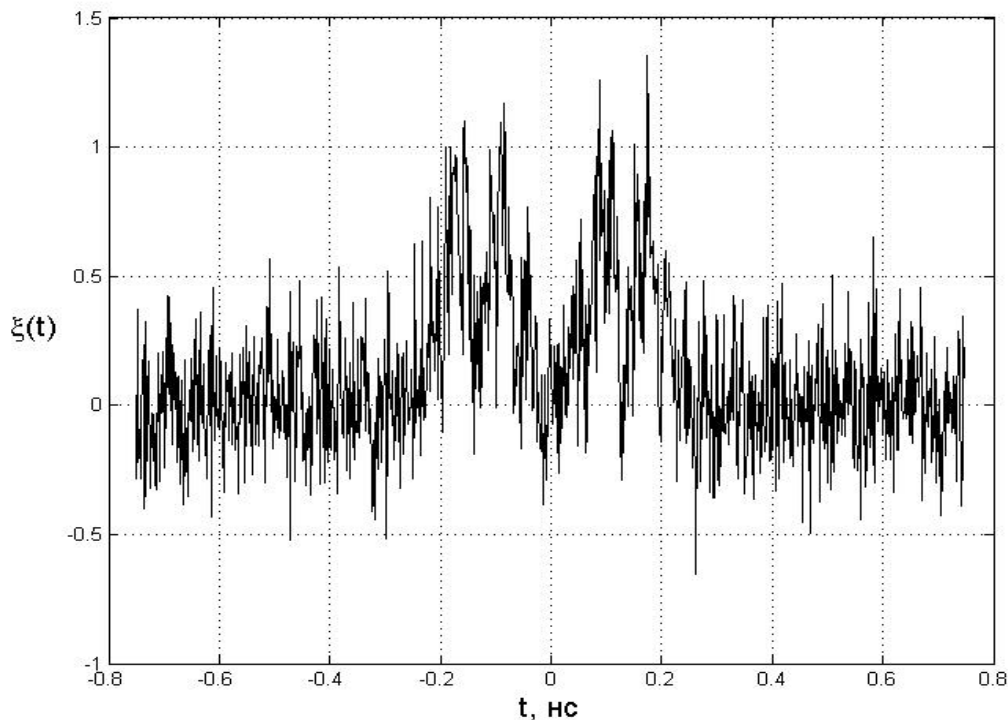


Рис. 2. Зашумлённый фрактальный сигнал

Применяя к массиву дискретного БГШ алгоритм быстрого преобразования Фурье (БПФ), мы получим, что дискретный спектр шума неравномерен. Это ещё одно отличие от непрерывного БГШ, который, как известно, имеет постоянный уровень спектра во всём диапазоне частот. Спектр дискретного БГШ, посчитанный с помощью алгоритма БПФ [8], занимает всю полосу частот от нуля до максимального значения, определяемого формулой $\omega = \pi/\Delta t$, где Δt - это шаг дискретизации принимаемого сигнала.

Остановимся подробнее на процессе удаления шума. Заметим сначала, что принятый зашумлённый сигнал называют реализацией. Под шумом понимают высокочастотные составляющие в спектре принятой реализации. Поэтому идея очистки состоит в том, чтобы выделить высокочастотную структуру оцифрованного зашумлённого сигнала путём свёртки с дискретным ФВЧ. В качестве такого фильтра в данной работе применялись высокочастотные фильтры разложения вейвлета *db8*. Процедура получения такой свёртки заложена уже в сам алгоритм дискретного вейвлет преобразования. На первом шаге происходит вычисление дискретной свёртки массива $\{f_k\}$ отсчётов зашумлённого сигнала с низкочастотным $\{h_k^*\}$ и высокочастотным $\{g_k^*\}$ фильтрами разложения и последующей за этим децимацией, то есть выбором из полученной свёртки только элементов с чётными номерами $2n$:

$$a_{1,n} = \sum_k h_k^* \cdot f_{2n-k}, \quad d_{1,n} = \sum_k g_k^* \cdot f_{2n-k}.$$

Таким образом, мы получаем две последовательности коэффициентов. Первая последовательность коэффициентов называется массивом коэффициентов аппроксимации первого уровня и обозначается $\{a_{1,m}\}$. Ясно, что этот массив содержит информацию о низкочастотных компонентах сигнала. Другая последовательность называется массивом коэффициентов детализации первого уровня и обозначается $\{d_{1,m}\}$. Этот массив содержит информацию о высокочастотных, то есть шумовых, компонентах принятой реализации. Процесс вычисления свёрток может быть продолжен. Коэффициенты аппроксимации и детализации для любого j -го уровня разложения находятся по заданным коэффициентам $\{a_{j-1,m}\}$ аппроксимации $(j-1)$ -го уровня [7]:

$$a_{j,n} = \sum_k h_k^* \cdot a_{j-1,2n-k}, \quad \forall j, \forall n. \quad (2)$$

Для коэффициентов детализации получается аналогичное выражение:

$$d_{j,n} = \sum_k g_k^* \cdot a_{j-1,2n-k}, \quad \forall j, \forall n. \quad (3)$$

На основании выражений (2) и (3) можно сделать вывод, что коэффициенты аппроксимации и детализации j -го уровня разложения получаются путём вычисления свёртки коэффициентов $\{a_{j-1,m}\}$ аппроксимации $(j-1)$ -го уровня разложения с соответствующими фильтрами разложения $\{h_k^*\}$, $\{g_k^*\}$ и последующей децимацией, то есть выбором из полученной свёртки только элементов с чётными номерами $2n$. Прямую децимацию принято обозначать значком $(\downarrow 2)$.

Так как коэффициенты детализации были получены путём свёртки с ФВЧ, то очистка от шума может быть осуществлена с помощью зануления части коэффициентов детализации с последующим восстановлением исходного сигнала. Численно было установлено, что для 6 - или 7 - уровневой разложения необходимо занулять коэффициенты детализации первых трёх уровней. Для более высоких уровней разложения предварительно определялась та часть массива коэффициентов, которая содержала максимальные по абсолютному значению коэффициенты детализации. Эта часть массива сохранялась без изменения, а оставшиеся коэффициенты детализации отбрасывались.

Далее необходимо решить задачу обращения, то есть по заданным коэффициентам детализации $\{d_{j,n}\}$ и аппроксимации $\{a_{j,n}\}$ j -го уровня разложения определить коэффициенты аппроксимации $\{a_{j-1,n}\}$ $(j-1)$ -го уровня разложения. Для этого сделаем обратную децимацию массива коэффициентов $\{a_{j,n}\}$ и $\{d_{j,n}\}$, то есть определим массивы $\{\tilde{a}_{j,m}\}$ и $\{\tilde{d}_{j,m}\}$, у которых на чётных местах $m = 2k$ стоят элементы $a_{j,k}$ и $d_{j,k}$, а на остальных – нули:

$$\tilde{a}_{j,m} = \begin{cases} a_{j,k}, m = 2k \\ 0, m = 2k + 1 \end{cases}, \quad \tilde{d}_{j,m} = \begin{cases} d_{j,k}, m = 2k \\ 0, m = 2k + 1 \end{cases}. \quad (4)$$

Тогда формула реконструкции будет иметь вид [7]

$$a_{j-1,n} = \sum_m (h_{n-m} \tilde{a}_{j,m} + g_{n-m} \tilde{d}_{j,m}). \quad (5)$$

Таким образом, установлено, что процедура обращения производится с помощью низко- $\{h_k\}$ и высокочастотного $\{g_k\}$ фильтров реконструкции с предварительной обратной децимацией. Обратную децимацию принято обозначать значком $(\uparrow 2)$. Дискретные фильтры

реконструкции $\{h_k\}$ и $\{g_k\}$ находятся путём транспонирования (изменения порядка следования) фильтров разложения $\{h_k^*\}$ и $\{g_k^*\}$ с последующим комплексным сопряжением. Схематично процедуры прямого и обратного вейвлет-преобразований показаны на рис. 3, а, б.

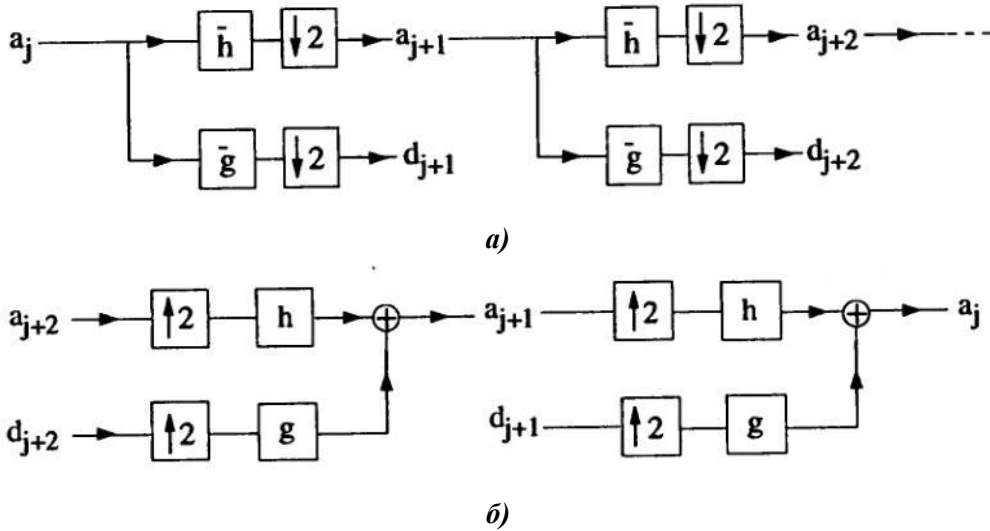


Рис. 3. Реализация алгоритма дискретного вейвлет-преобразования:
 а – прямое дискретное вейвлет-преобразование (разложение);
 б – обратное дискретное вейвлет-преобразование (реконструкция)

После того, как будет произведена очистка принятого сигнала, можно переходить непосредственно к восстановлению самого информационного сообщения. Будем полагать, что наличие СШП сигнала на отведённой позиции означает символ «1», а отсутствие – символ «0». Для фиксирования фрактального импульса понадобится вычисление следующих функционалов [4]:

$$\hat{B} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P(t)P_0(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P_0^2(t)dt}, \quad \hat{D} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} P^2(t)dt}{\int_{-\infty}^{\infty} P_0^2(t)dt}. \tag{6}$$

Эти функционалы определяют меру схожести фрактального сигнала, имеющего мощность $P_0(t)$ на входе в линию, и восстановленного сигнала, имеющего мощность $P(t)$. Чем ближе функционалы (6) к единице, тем выше вероятность того, что принятый сигнал является фрактальным импульсом, который соответствует логической единице. Так как фрактальный импульс имеет сложную временную реализацию, то численное интегрирование выражений (6) является сложной задачей. На практике применяются специальные устройства, называемые интеграторами. Простейшим устройством такого типа является интегрирующая RC-цепь. Однако для численных расчётов гораздо проще от выражений (6) перейти к их дискретным аналогам.

Необходимо отметить, что фрактальный импульс (1) имеет компактный носитель, то есть вся энергия этого импульса сосредоточена на конечном интервале, называемом носителем. В выражении (1) длина носителя задаётся параметром T_0 . Так как при построении рис. 1 полагали, что $T_0 = 0.5$ нс, то длина носителя данного не зашумлённого импульса равна 0.5 нс. Численно было установлено, что для световода с коэффициентом дисперсии $\beta_2 = -20$ пс²/км и длиной $L=50$ км, дисперсионные эффекты начинают играть заметную роль именно в случае

начальной длительности импульса, равной 0.5 нс. Из рис. 1 видно, что вне интервала $[-T_0/2, T_0/2]$ импульс обращается в ноль, поэтому функционал \hat{B} будет близок к единице в том случае, когда очистка от шума произведена успешно в пределах этого интервала.

Влияние дисперсии на результат приема фрактального сигнала

Ставилась задача – определить, каким образом эффекты дисперсии повлияют на качество приёма информации. Для моделирования эффекта дисперсии использовались следующие выражения. Спектр произвольного импульса на длине z световода определяется по формуле [5]:

$$\tilde{U}(z, \omega) = \tilde{U}(0, \omega) \exp\left[-\frac{i}{2} z \omega^2 \beta_2\right]. \quad (7)$$

где $\tilde{U}(0, \omega)$ - спектра импульса на входе:

$$\tilde{U}(0, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} U(0, T) e^{-i\omega T} dT. \quad (8)$$

Под импульсом $U(0, T)$ в данном случае понимается сигнал (1). Временная реализация импульса на длине z световода находится с помощью обратного преобразования Фурье:

$$U(z, T) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{U}(z, \omega) e^{i\omega T} d\omega. \quad (9)$$

Для расчётов полагали, что длина линии составляет 50 км. Значение коэффициента дисперсии полагали равным $\beta_2 = -20$ пс²/км, что характерно для ВС стандартного профиля показателя преломления на длине волны 1,55 мкм [5]. Начальная длительность фрактального импульса (1) принималась равной $T_0 = 0.5$ нс. Временная реализация квадрата амплитуды диспергировавшего фрактального импульса приведена на рис. 4.

После того, как была рассчитана временная реализация импульса на выходе ВС с дисперсией, производилось искусственное зашумление полученного сигнала. Для моделирования зашумлённого сигнала на выходе приёмника использовался дискретный БГШ с выборочной дисперсией 0.04 и соответствующим стандартным отклонением в $\sqrt{0.04} = 0.2$. В результате получаем на выходе приёмника реализацию $\xi(t)$, образец которой показан на рис. 5.

Всего было произведено 15 численных экспериментов с зашумлением диспергировавшего фрактального сигнала и последующей его фильтрацией. В ходе каждого эксперимента был произведён расчёт по формулам (6). Далее производилось усреднение полученных значений. В результате для рассматриваемого импульса были получены следующие данные:

$$\hat{B}_1^d = 0.729, \quad \hat{D}_1^d = 0.723. \quad (10)$$

Видно, что наличие дисперсии привело к значительному отличию функционалов схожести от 1. Можно сделать вывод, что для того, чтобы организовать успешный приём, необходимо заранее определить коэффициент дисперсии в волоконном световоде и скорректировать выражение для $P_0(t)$ с учётом эффекта дисперсии.

Выводы

Таким образом эффект дисперсионного уширения фрактального импульса может быть использован для обеспечения дополнительной защиты передаваемой информации. Допустим, что злоумышленнику стали известны параметры передаваемого фрактального сигнала. Тогда в качестве контрмеры можно внести в ВС участок волокна с высоким значением дисперсии, что приведёт к значительному изменению формы сигнала. Без дополнительной информации о коэффициенте дисперсии введённого участка, злоумышленнику не удастся ор-

ганизовать эффективное считывание данных. В то же время сами получатели секретной информации смогут восстановить первоначальную форму сигнала при помощи компенсатора дисперсии.

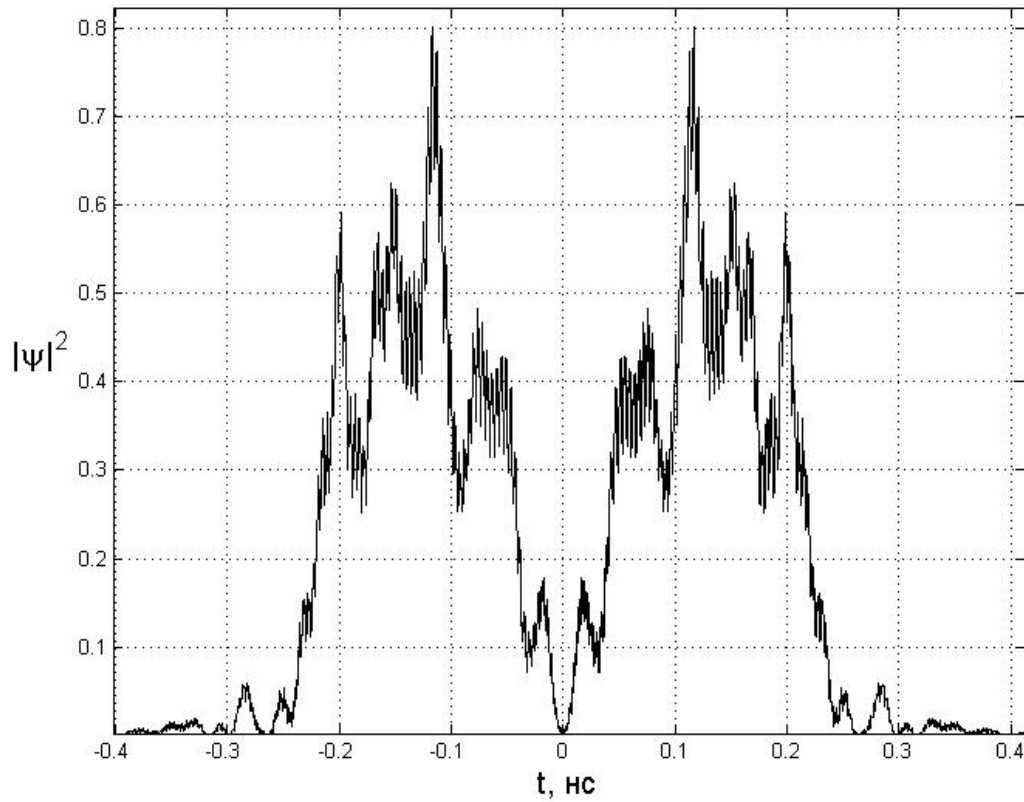


Рис. 4. Временная реализация квадрата амплитуды диспергировавшего фрактального импульса (1), построенная для значений $T_0 = 0.5$ нс, $b = -T_0/2$, $\alpha = 0.7$, $\beta = 2$, $L = 50$ км, $\beta_2 = -20$ пс²/км

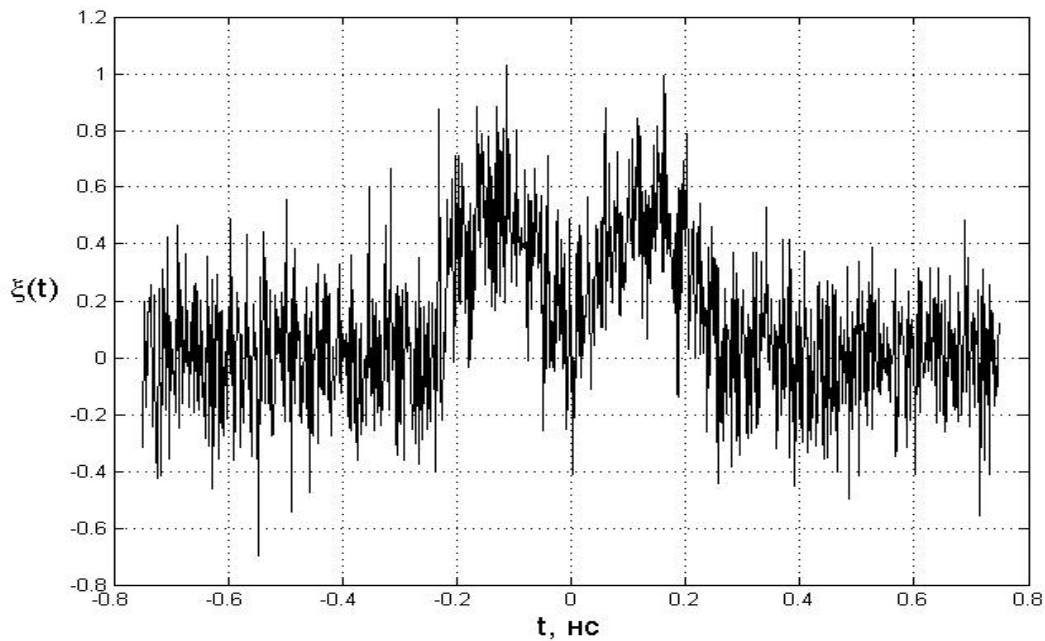


Рис. 5. Зашумлённый диспергировавший фрактальный импульс на выходе оптического приёмника. Зашумлению подвергался сигнал, показанный на рис. 4

Библиографический список

1. Введение в информационную безопасность: учеб. пособие для вузов / А.А. Малюк [и др.]; под ред. В.С. Горбатова. – М.: Горячая линия - Телеком, 2011. – 288 с.
2. **Захаров, К.А.** О дискретизации сигнала с фрактальной структурой / К.А. Захаров, Р.П. Мейланов // Известия вузов. Радиофизика. 2001. Т. 44. №8. С. 709–711.
3. **Болотов, В.Н.** Генерирование сигналов с фрактальными спектрами / В.Н. Болотов, Ю.В. Ткач // Журнал технической физики. 2006. Т.76. Вып. 4. С. 91–98.
4. **Сухарев, Е.М.** Информационная безопасность: методы шифрования / Е.М. Сухарев. – М.: Радиотехника, 2011. – 208 с.
5. **Агравал, Г.** Нелинейная волоконная оптика / Г. Агравал. – М.: Мир, 1996. – 323 с.
6. **Штарк, Г.** Применение вейвлетов для ЦОС / Г. Штарк. – М.: Техносфера, 2007. – 192 с.
7. **Смоленцев, Н.К.** Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 448 с.
8. **Юнаковский, А.Д.** Начала вычислительных методов для физиков / А.Д. Юнаковский. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН, 2007. – 220 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2013*

G.S. Malyshev, A.S. Raevskii

**THE INFLUENCE OF THE DISPERSION OF THE OPTICAL FIBER FOR PASSING
FRACTAL PULSE IN A NOISY CHANNEL**

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

Purpose: Investigate the effect of the dispersion of the optical fiber at the reception fractal pulses propagating in a noisy channel.

Design/methodology/approach: Effect of dispersion of the fiber at the reception fractal pulse is determined by calculating the quantities determining the similarity measure is not noisy pulse and the signal obtained after the removal of noise.

Findings: The results show that the effects of the dispersion of the optical fiber can be used to further protect the information transmitted through the optical fiber.

Research limitations/implications: These results provide a starting point for the development of fiber - optic communication lines, in which the information is transmitted using UWB pulses.

Originality/value: The possibility of organizing secure communication in an optical fiber-based fractal pulse.

Key words: fractal momentum variance, white Gaussian noise, the discrete wavelet transform.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.465

И.С. Костенко¹, А.И. Зайцев^{1,2}, А. Ялченир³, А.В. Рыбин², С.К. Яркин²

ПРОЯВЛЕНИЕ ТОХОКУ ЦУНАМИ 2011 ГОДА В РАЙОНЕ КУРИЛЬСКИХ ОСТРОВОВ И О. САХАЛИН

Специальное конструкторское бюро средств автоматизации морских исследований ДО РАН,
г. Южно-Сахалинск¹,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
Технический университет центральной Азии, Анкара, Турция³

Цель: изучение особенностей распространения волн цунами в акватории Курильских островов и Охотского моря.

Научный подход: вычислительные эксперименты проводились с использованием программного комплекса NAMI DANCE. При моделировании в акватории Тихого океана и Охотского моря использовались нелинейные уравнения мелкой воды. При проведении моделирования в зависимости от полной глубины менялся пространственный и временной шаг, что позволило учитывать численную дисперсию, вычислялось значение близкое к аналитическому значению дисперсионного слагаемого. А для моделирования происхождения волны в Охотское море через проливы Курильских островов использовалась вложенная сетка.

Результат: проведено численное моделирование распространения Японского цунами 11 марта 2011 года с использованием вложенных сеток для детального изучения особенностей распространения волн цунами и проникновения их в Охотское море через проливы Курильских островов. Проанализировано распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана.

Новизна: Проведена оценка интенсивности воздействия цунами в районе Курильских островов и о. Сахалин. Для анализа энергии цунами в районе проливов Курильских островов по результатам численного моделирования построены совмещенные спектры уровня моря в районах крупных проливов Фриза и Буссоль.

Ключевые слова: моделирование распространения цунами, интенсивность цунами, число Фруда.

Введение

У юго-восточного побережья Японии 11 марта 2011 года, начиная с 5:46:23 ВСВ, произошла серия крупных землетрясений. Магнитуда основного толчка составляла 9,0. Его координаты 38.322° с.ш., 142.369° в.д. Глубина очага 32 км. Всего было зарегистрировано более 400 афтершоков. Образовавшееся цунами обрушилось на побережье Японии волной более десяти метров, вызвав в узких заливах подъем уровня до 41 м [8]. Это цунами нанесло колоссальный экономический и материальный вред, привело к большим человеческим жертвам.

Несмотря на то, что произошедшее цунами является одним из самых сильных в истории наблюдения и сильнейшим на Японских островах, на территории России [1, 4], расположенной в непосредственной близости от источника цунами, волны наблюдались с высотами не более 3 м. С целью изучения особенностей распространения волн цунами в акватории Курильских островов и Охотского моря проведена серия вычислительных экспериментов.

На пути распространения волн цунами в Охотское море расположены Курильские острова протяженностью около 1200 км, которые включают в себя более 30 больших и множество мелких островов. На рис. 1 представлена карта этого района. Всего насчитывается более 26 проливов с преобладающими глубинами до 500 м. Максимальная глубина чуть бо-

лее 2000 метров. Со стороны Тихого океана расположен Курило-Камчатский желоб с глубинами до 10000 метров. Непосредственно перед Курильскими островами глубины уменьшаются. В районе южных и центральных Курильских островов расположен подводный хребет Витязь. Со стороны Охотского моря в районе южных и центральных Курильских островов находится Курильская котловина с глубинами около 3000 м, а в районе северных Курил глубины уменьшаются по направлению к полуострову Камчатка. Отсюда следует, что Курильский архипелаг является естественной преградой между Тихим океаном и Охотским морем, поэтому изучению особенностей распространения и воздействия цунами именно в этом регионе уделено особое внимание.

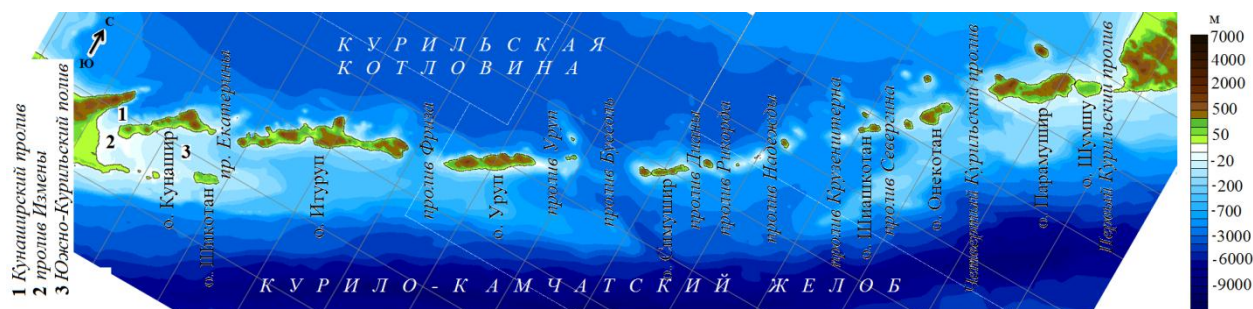


Рис. 1. Карта Курильских островов

Методика исследований

Вычислительные эксперименты проводились с использованием программного комплекса NAMI DANCE. При моделировании в акватории Тихого океана и Охотского моря использовались нелинейные уравнения мелкой воды:

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{MN \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R \cos \theta} \frac{\partial \eta}{\partial \lambda} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M \sqrt{M^2 + N^2} = fN, \quad (1)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \lambda} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{1}{R \cos \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{N^2 \cos \theta}{D} \right) + \frac{gD}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \theta} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N \sqrt{M^2 + N^2} = -fM, \quad (2)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \theta} \left[\frac{\partial M}{\partial \lambda} + \frac{\partial}{\partial \theta} (N \cos \theta) \right] = 0, \quad (3)$$

где η – смещение уровня моря; M , N – компоненты расхода воды вдоль широты λ и долготы θ ; D – полная глубина бассейна; g – ускорение силы тяжести; n – коэффициент шероховатости дна; R – радиус Земли; f – параметр Кориолиса ($f = 2\omega \sin \theta$); ω – частота вращения Земли. В расчетах используется значение $n = 0.0025$ м, характерное для естественного дна (песок, мелкая галька).

При проведении моделирования в зависимости от полной глубины менялся пространственный и временной шаг, что позволило учитывать численную дисперсию [7], вычислялось значение, близкое к аналитическому значению дисперсионного слагаемого.

На открытых границах использовались граничные условия свободного прохождения. На побережье ставилась стенка на глубине 5 м.

Для выполнения расчетов в качестве основной использовалась батиметрия с шагом сетки 0,022 градуса, а для моделирования происхождения волны в Охотское море использовалась вложенная сетка с шагом 0,007 градуса [2]. При проведении моделирования компьютерный мареограф устанавливается на 3 узел сетки от берега. Использование мелкой сетки позволяет более точно совместить места установки стационарных и модельных мареографов [5].

Для примера на рис. 2, а, б приведено расположение узлов сетки в районе г. Северо-

Курильск (о. Парамушир). Видно, что на батиметрии с мелкой сеткой (рис. 2, б) компьютерный мареограф будет расположен в непосредственной близости от портового ковша, где установлен стационарный мареограф. Это позволит сопоставить данные наблюдения за уровнем моря и моделирования в близлежащей точке. Вложенные сетки используются для относительно небольших участков акватории, так как их использование значительно уменьшает скорость проведения вычислительных экспериментов.

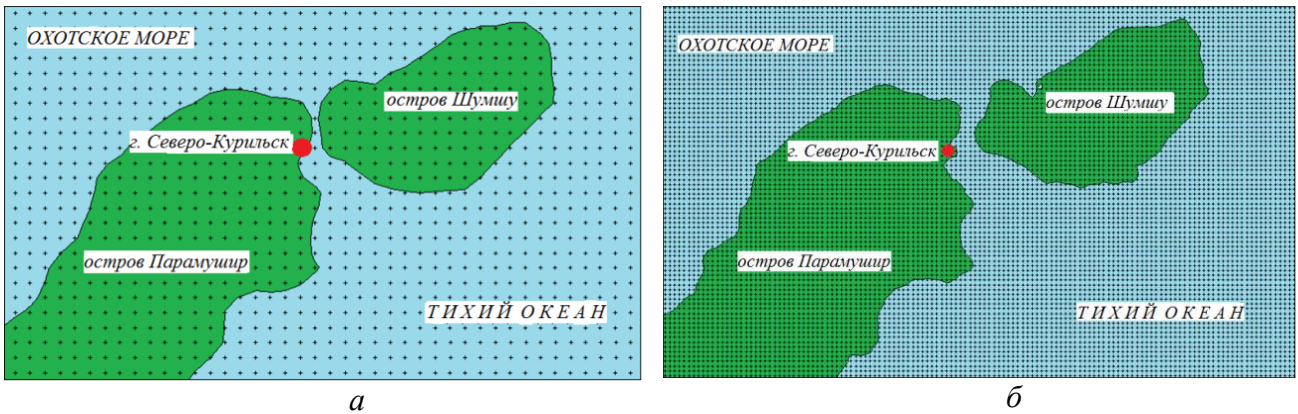


Рис. 2. Расположение узлов сеток в районе г. Северо-Курильск с шагом 0,022 градуса (а) и 0,007 градуса (б)

Проведение вычислительных экспериментов

Для проведения вычислительных экспериментов из параметров десяти наиболее крупных землетрясений, способных сгенерировать цунами, построены источники. При проведении моделирования источники запускались пропорционально времени возникновения рассматриваемых землетрясений, в результате чего в одном вычислительном эксперименте проводились расчеты распространения цунами от всех источников. Так как источники расположены в непосредственной близости друг от друга, то на рис. 3 они выглядят как один большой источник и сосредоточены у восточного побережья о. Хонсю (Японские острова).

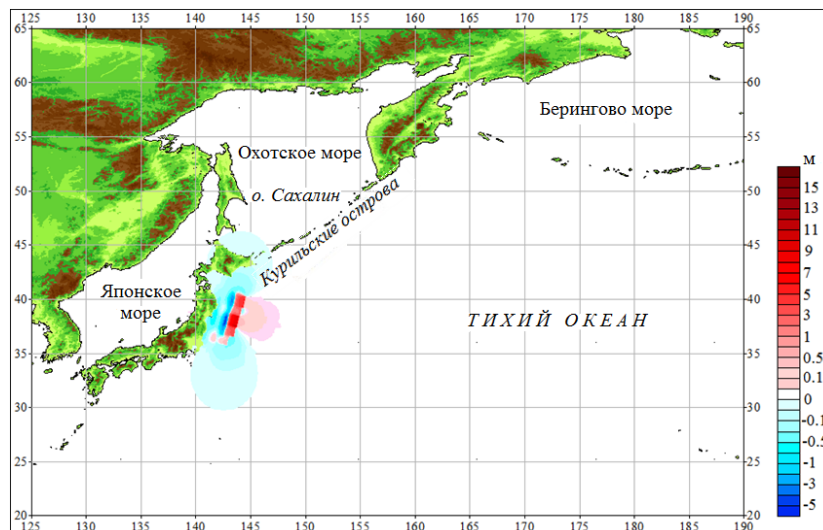


Рис. 3. Источник Японского цунами 11 марта 2011 года, состоящий из 11 сегментов

Для изучения особенностей распространения цунами построено расчетное время распространения профиля волн в северо-западной части Тихого океана (рис. 4). Видно, что в Охотское море цунами проникают с запаздыванием по времени, по сравнению со временем

распространения по акватории Тихого океана. По акватории Охотского моря цунами распространяются в широтном направлении, начиная от центральных Курильских островов, где расположены наиболее широкие и глубокие проливы. Это подтверждает карта распространения цунами через 1 ч 20 мин после начала землетрясений. На ней видно, что основной фронт волн цунами проникает через проливы Фриза, Уруп и Буссоль (рис. 5).

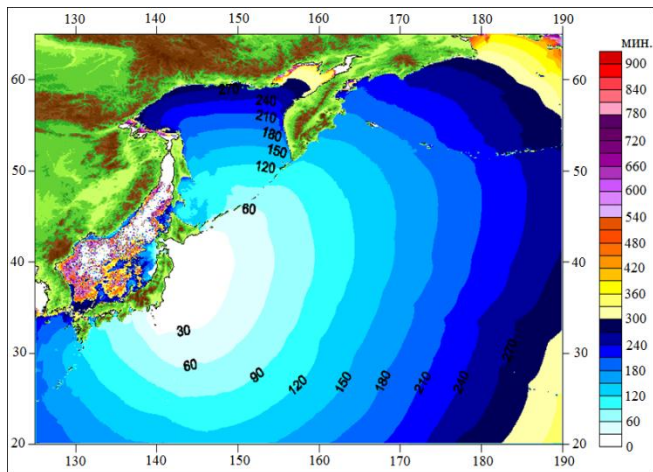


Рис. 4. Время распространения цунами в северо-западной части Тихого океана

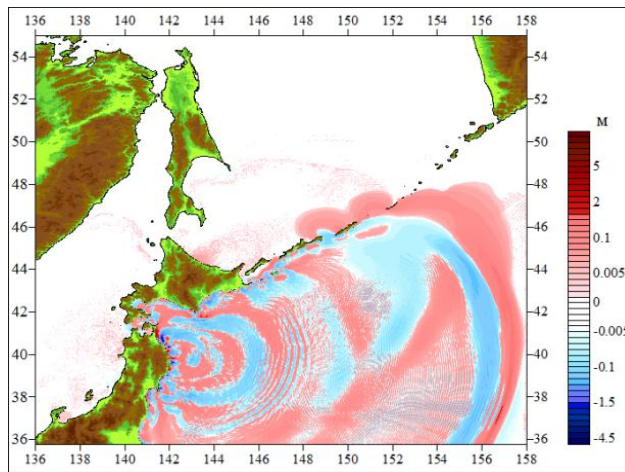


Рис. 5. Волны цунами спустя 1 ч 20 мин после землетрясения по результатам моделирования

По результатам моделирования построено распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана (рис. 6). Максимальные амплитуды волн наблюдались в Тихом океане к юго-востоку от о. Хонсю. Это связано с расположением и формой источников цунами [3]. Наибольшие амплитуды наблюдались у восточного побережья о. Хонсю и юго-восточного побережья о. Хоккайдо (Японские острова) в районе расположения эпицентров землетрясения. На территории России основному воздействию цунами подверглись Курильские острова. Максимальные волны наблюдались в п. Малокурильское (о. Шикотан) 3 м. На побережье Сахалина, Камчатки и Приморского края волны наблюдались с меньшими амплитудами. На побережье Приморского края высоты волн не превышали 0,4 м, а на побережье Камчатки – 0,8 м. Анализ наблюдений за амплитудами волн цунами в северо-западной части Тихого океана подтверждает результаты моделирования.

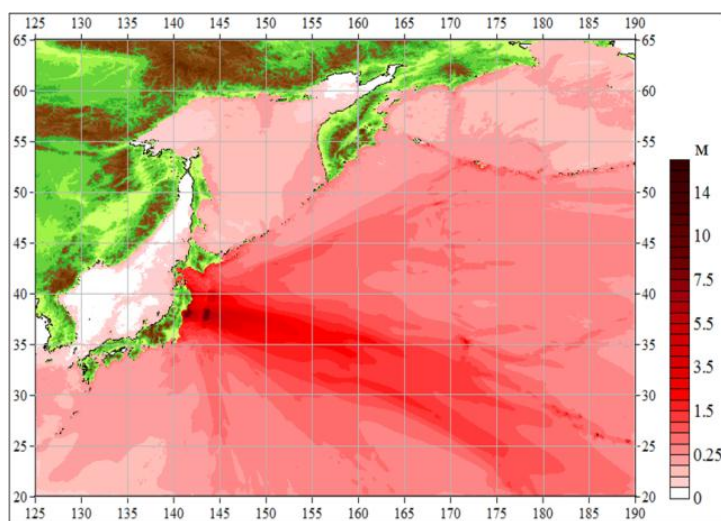


Рис. 6. Распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана

В табл. 1 приведены высоты волн цунами, проявившиеся у побережья Курильских островов и о. Сахалин. На Сахалине волны наблюдались с меньшими амплитудами по сравнению с Курильскими островами. На юго-западном побережье о. Сахалин (м. Крильон, г. Невельск, п. Правда, г. Холмск, г. Углегорск) волны цунами были небольшими, так как после прохождения проливов Японских и Курильских островов амплитуда их значительно уменьшается.

Таблица 1

Высоты волн цунами, проявившиеся на побережье Сахалина и Курильских островов, вызванные землетрясениями у юго-восточного побережья Японии

Наименование населенного пункта	Высота цунами, м	Наименование населенного пункта	Высота цунами, м
п. Малокурильское (о. Шикотан)	3	п. Охотское (о. Сахалин)	
г. Южно-Курильск (о. Кунашир)	1,89	г. Корсаков (о. Сахалин)	0,67
г. Курильск (о. Итуруп)	0,56	м. Крильон (о. Сахалин)	0,29
п. Буревестник (о. Итуруп)	2	г. Невельск (о. Сахалин)	0,27
г. Северо-Курильск (о. Парамушир)	1,6	п. Правда (о. Сахалин)	0,25
г. Поронайск (о. Сахалин)	0,85	г. Холмск (о. Сахалин)	0,22
п. Стародубское (о. Сахалин)	0,65	г. Углегорск (о. Сахалин)	0,18

Для изучения интенсивности воздействия цунами по результатам моделирования построено распределение числа Фруда (рис. 7):

$$U/\sqrt{gD}, \tag{4}$$

где U – скорость распространения цунами, g – гравитационная постоянная, D – полная глубина ($\eta+H$).

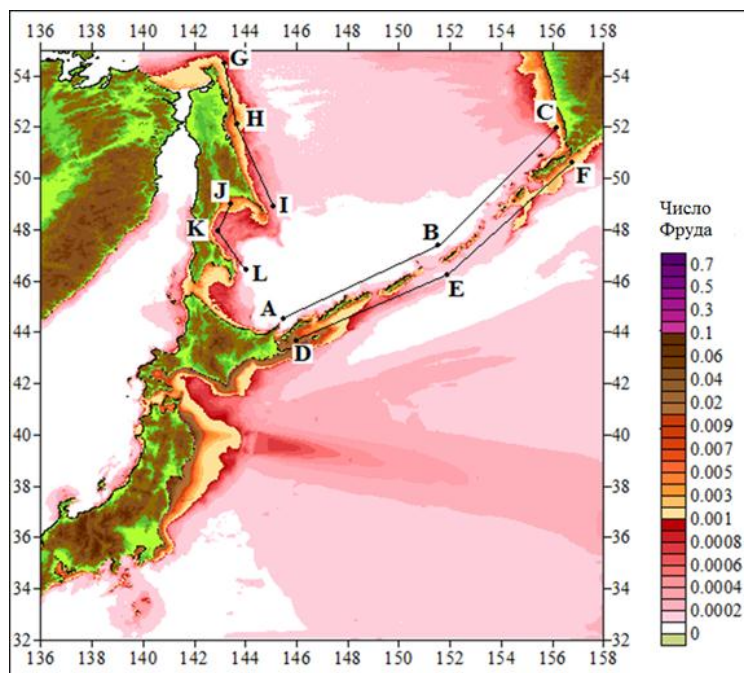


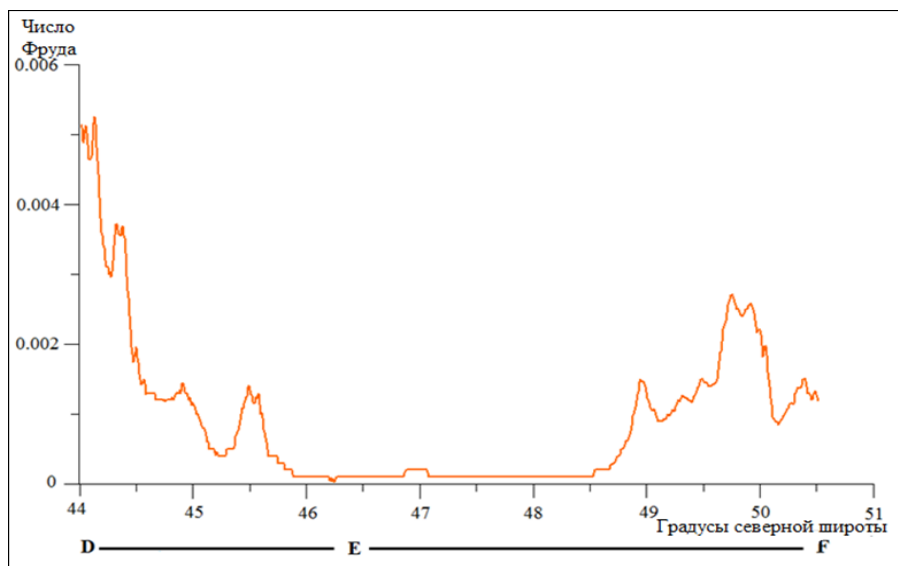
Рис. 7. Интенсивность цунами

Из анализа следует, что наибольшие значения интенсивности воздействия цунами

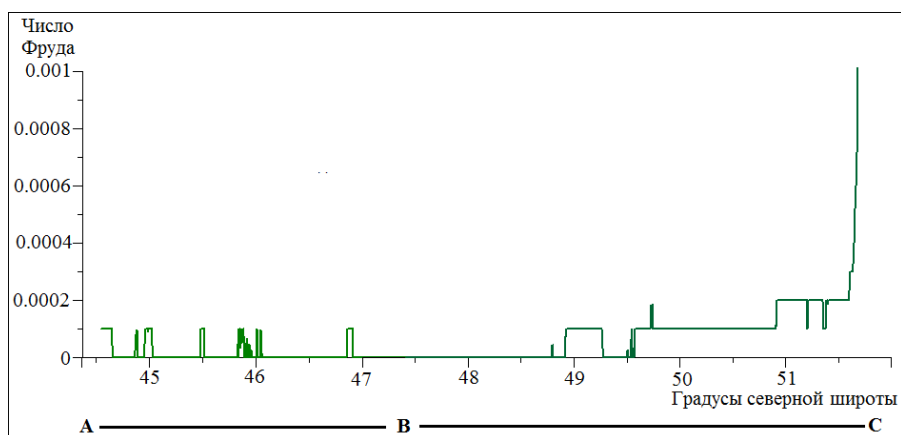
приурочены к мелководью, а также к району расположения эпицентров землетрясения, где большое влияние оказывает скорость распространения цунами. По результатам моделирования построены графики интенсивности цунами по линиям профилей.

Из графиков интенсивности воздействия по линиям профилей *D-E-F* (рис. 8, *a*), расположенных с Тихоокеанской стороны Курильских островов видно, что наибольшая интенсивность цунами наблюдается в прибрежных районах больших островов Кунашир, Итуруп, Уруп (южные Курильские острова) и Онекотан, Пармушир, Шумшу (северные Курильские острова). В районе центральных Курильских островов, где расположены наиболее широкие и глубокие проливы и небольшие острова, интенсивность воздействия цунами падает.

Построены графики интенсивности воздействия по линиям профилей *A-B-C* (рис. 8, *б*), расположенных с Охотоморской стороны Курильских островов. Интенсивность цунами после прохождения Курильских островов очень низкая. Однако наблюдается значительное усиление в районе полуострова Камчатка, где глубины моря на линии профиля значительно уменьшаются по сравнению с остальной частью.



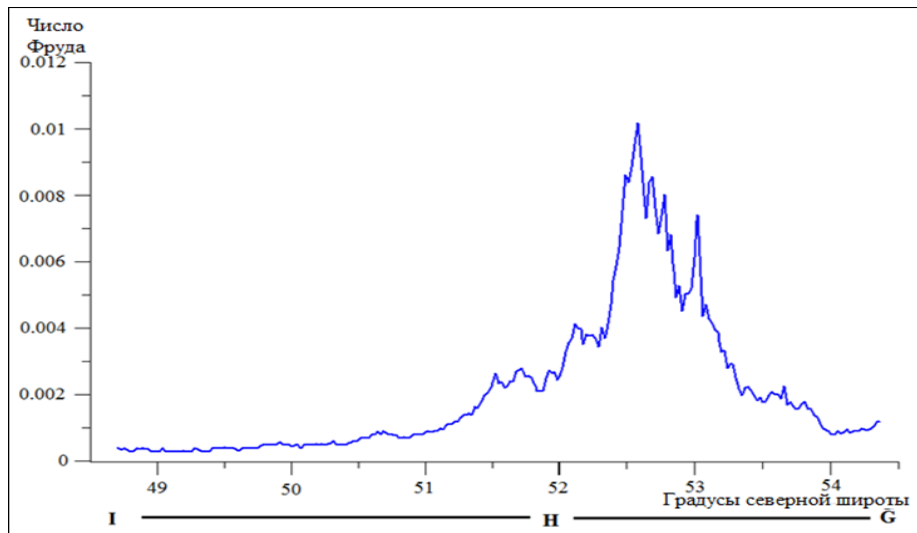
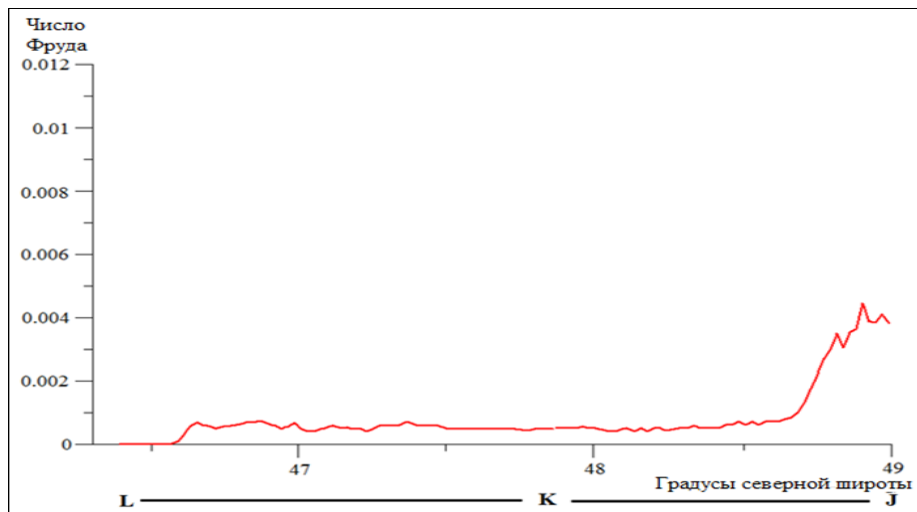
a)



б)

Рис. 8. Интенсивность цунами:
a – по линиям профилей *D-E-F*
 с Тихоокеанской стороны Курильских островов; *б* – по линиям профилей
A-B-C, расположенных со стороны Охотского моря

Из графиков интенсивности воздействия цунами по линиям профилей $I-H-G$ (рис. 9, *a*), расположенных в северо-восточной части о. Сахалин, видно, что наибольшие значения интенсивности цунами наблюдаются на небольших глубинах около о. Сахалин, где линия профиля ($H-G$) расположена наиболее близко к острову. Графики интенсивности воздействия по линиям профилей $L-K-J$ (рис. 9, *б*) расположены в юго-восточной части о. Сахалин. Вдоль линии профиля $K-L$ интенсивность цунами изменяется слабо, но она увеличивается в мелководном заливе Терпения.

*a)**б)***Рис. 9. Интенсивность цунами:**

a — по линиям профилей $I-H-G$ в северо-восточной части о. Сахалин;

б — по линиям профилей $L-K-J$ в юго-восточной части о. Сахалин

Для анализа энергии цунами в районе проливов Курильских островов по результатам численного моделирования построены совмещенные спектры уровня моря в районе крупного пролива Фриза, расположенного в центральной части Курильских островов (рис. 10). Результат представлен для мелкой сетки с шагом 0,007 градуса. Компьютерные мареографы располагались к югу от пролива, в проливе Фриза и к северу от него на некотором удалении от островов. На спектре уровня моря от мареографа, расположенного к северу от пролива

(Охотское море), наблюдается понижение энергии. Это может быть связано с потерей энергии при проходе цунами через проливы Курильских островов [6].

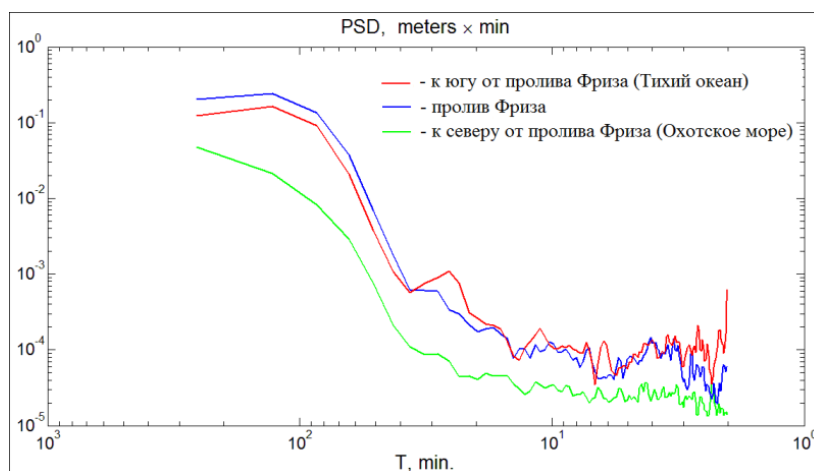


Рис. 10. Спектры колебаний уровня моря в районе пролива Фриза

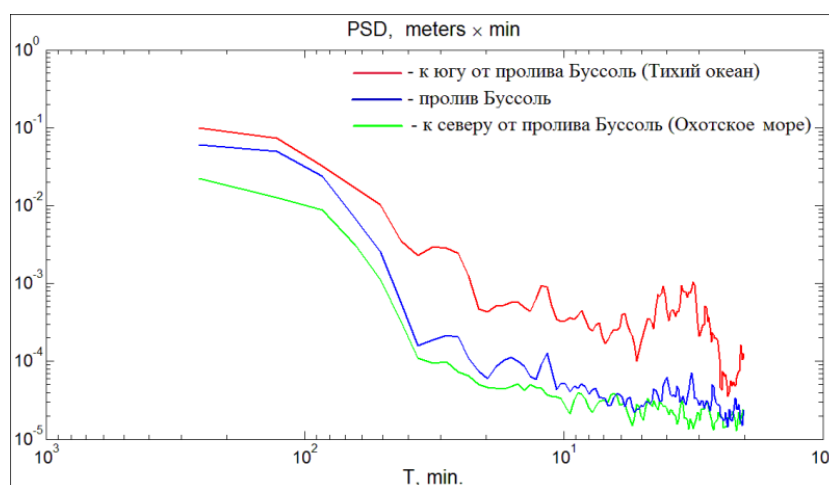


Рис. 11. Спектры колебаний уровня моря в районе пролива Буссоль

На рис. 11 по результатам численного моделирования представлены совмещенные спектры уровня моря в районе пролива Буссоль, расположенного в центральной части Курильских островов. Результат представлен для мелкой сетки с шагом 0,007 градуса. Из графика видно, что снижение энергии волн цунами наблюдается также в проливе Буссоль и в Охотском море.

Выводы

Проведено численное моделирование Японского цунами, произошедшего 11 марта 2011 года. Исследование проводилось с использованием вложенных сеток. Проведена оценка интенсивности воздействия цунами в районе Курильских островов и о. Сахалин. Построены спектры уровня моря в районе крупных проливов Фриза и Буссоль. Проанализировано распределение максимальных амплитуд волн цунами в северо-западной части Тихого океана.

Исходя из результатов численного исследования, можно сделать вывод, что Курильские острова с их достаточно узкими и неглубокими проливами являются естественной преградой на пути распространения цунами в Охотское море. Происходит отражение около 80 % энергии цунами от Курильской гряды, и волны слабо проходят в Охотское море.

Представленные результаты поисковой научно-исследовательской работы получены в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России на 2009–2013 годы» (соглашение № 14.В37.21.0642), при поддержке стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым СП-1935.2012.5, а также грантов РФФИ 11-05-00216-а, [13-05-97037](#) и гранта ДВО 13-III-B-07-050.

Библиографический список

1. **Зайцев, А.И.** Цунами на Сахалине 2 августа 2007 года: мареографные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // Тихоокеанская геология. 2009. Т. 28. № 5. С. 30–35.
2. **Зайцев, А.И.** Моделирование воздействия удаленного цунами на Дальневосточное побережье России / А.И. Зайцев, И.С. Костенко, А.Г. Чернов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева 2010. № 3(82). С. 34–39.
3. **Левин, Б.В.** Физика волн цунами и родственных явлений / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус, 2005. – 360 с.
4. **Соловьев, С.Л., Го Ч.Н.** Каталог цунами на западном побережье Тихого океана. Москва: Наука, 1974. – 308 с.
5. **Шокин, Ю.И.** Вычислительный эксперимент в проблеме цунами / Ю.И. Шокин [и др.] Новосибирск: Наука, 1988. – 168 с.
6. **Lobkovsky, L.I., Mazova R.Kh., Kisel'man B. A., and Morozova A.O.** Numerical Simulation and Spectral Analysis of the November 15, 2006. Tsunami in the Kurile–Kamchatka Region Oceanology. 2010. Vol. 50. No. 4. P. 449–458.
7. **Sung Bum Yoon, Chae Ho Lim, and Junwoo Choi.** Dispersion-Correction Finite Difference Model for Simulation of Transoceanic Tsunamis// Terr. Atmos. Ocean. Sci. Vol. 18. No. 1. P. 31-53.
8. **Yalciner, A.C.** Suppasri A., Mas E., Kalligeris N., Necmioglu O., Imamura F., Ozer C., Zaytsev A., Ozel N.M., Synolakis C. Field survey on the coastal impacts of march 11, 2011 great east Japan tsunami (в печати).

Дата поступления
в редакцию 15.05.2013

I.S. Kostenko¹, A.I. Zaitsev^{1,2}, A. Yachenir³, A.V. Rybin², D.C. Yarkin²

MANIFESTATION OF 2011'TH TOHOKU TSUNAMI NEAR KURIL ISLANDS AND SAKHALIN ISLAND

Special design Bureau for automation of marine researches DO RAS. Yuzhno-Sakhalinsk¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²,
Technical university of Central Asia, Ankara, Turkey³

Purpose: To study of the propagation of tsunami waves near the Kuril Islands and the Sea of Okhotsk.

Design/methodology/approach: the computational experiments were carried out using the software NAMI DANCE. Numerical modeling of distribution of the 11'th March, 2011'th Japan Tsunami with use nested grids for detailed studying of features distribution of tsunami waves and their penetration into the Okhotsk Sea through passages of the Kuril Islands straits. Was done analysis of the assessment of intensity of influence of a tsunami near the Kuril Islands and Sakhalin Island. Sea level gauge spectrum near large passages of the Frieze and Bussol are presented. Distribution of the maximum amplitudes of waves of a tsunami in northwest part of the Pacific Ocean is analysed.

Findings: a numerical simulation of the Japan tsunami March 11, 2011 using nested grids for detailed study of the propagation of tsunami waves and their penetration into the Sea of Okhotsk through the straits of the Kuril Islands. Was analysed distribution of the maximum amplitudes of the tsunami waves in the north-western part of the Pacific Ocean.

Originality/value: The analysis of the intensity of the tsunami in the Kuril Islands and Sakhalin. To analyze the energy tsunami in the straits area Kuril Islands on the results of numerical simulations are built aligned spectra of sea level in the areas of large spills Vries and Bussol.

Key words: modeling of tsunami distribution, tsunami intensity, Froude's number.

УДК 551.465

Р.Х. Мазова, Б.А. Кисельман, Н.Н. Осипенко, Е.А. Колчина

АНАЛИЗ СПЕКТРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЧЕРНОМОРСКИХ ЦУНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: В рамках нелинейных уравнений мелкой воды проведено численное моделирование как исторических, так и возможных сильных цунами от модельных сейсмических очагов с различной локализацией в акватории Черноморского бассейна. Локализация и форма сейсмических очагов выбиралась с учетом наиболее сейсмоактивных зон черноморской впадины, используя геологические и геодинамические данные региона. Сейсмический очаг рассматривался в рамках кинематической клавишной модели очага землетрясения.

Научный вклад: Проведен численный и спектральный анализ волнового поля цунами.

Результат: Используя результаты расчетов генерации и распространения волн цунами в акватории Черного моря, был проведен спектральный анализ и получены спектральные характеристики волн цунами в Черном море как для исторических землетрясений, так и для гипотетических сильных подводных землетрясений. Амплитудные спектры мареограмм во всех точках были рассчитаны с помощью дискретного преобразования Фурье. Для ряда пунктов построены и проанализированы wavelet спектрограммы.

Новизна: результаты анализа могут быть использованы при проведении строительных работ в береговой и шельфовых зонах российского побережья Черного моря, а также важность таких расчетов связана, в частности, с проблемой эксплуатации морского участка газопровода Россия-Турция (проект «Голубой поток»), соединяющий территории этих стран по дну Черного моря, который должен функционировать в условиях повышенной сейсмичности и оползневой опасности российского и турецкого склонов Черного моря.

Ключевые слова: очаг землетрясения, клавишная модель очага, волны цунами, численное моделирование, спектральный анализ.

Введение

Особенностью цунамигенных землетрясений является тот фактор, что, как правило, землетрясение происходит там, где долгое время не было событий, даже умеренной силы – в так называемых «сейсмических брешах». Для региона Черного моря этот период составляет 40–100 лет [1, 2]. В связи с этим, нами был выбран ряд областей акватории Черного моря, где долгое время не наблюдались сейсмические события. Мы будем рассматривать расположение очагов землетрясений как на границе Туапсинского прогиба, так и в наиболее сейсмоактивных районах вдоль всего черноморского побережья [3–5]. Принципиальное отличие исследования, проводимого в данной работе, связано с возбуждения волн как процесса, протяженного во времени. Рассматривается генерация волн цунами кинематическим очагом в рамках клавишной модели очага землетрясения [6, 7]. Как отмечается в работе [8], имеющиеся в настоящее время численные модели цунами принимают во внимание только геометрические характеристики очага – пространственное распределение остаточных смещений дна. Как отмечено в работе [9] «... важным для прогноза волн является то обстоятельство, что их амплитудные характеристики существенно зависят от вида сейсмоактивной подвижки, формы очага цунами и распределения остаточных смещений дна. Эти вопросы для землетрясений Черноморской впадины изучены недостаточно».

В отличие от поршневой модели (мгновенной подвижки), клавишная модель (кинематическая и динамическая модели) позволяют при одной и той же магнитуде землетрясения получить различный характер направленности волн цунами, что дает принципиально разное распределение высот волн вдоль побережья, в зависимости от сценария развития сейсмического процесса в очаге землетрясения. Известно, что смещение коры в сейсмическом очаге имеет

сложный характер, например, сдвиг со взбросом или сбросом. Однако, как правило, для расчетов генерации поверхностной волны эти движения пересчитываются на вертикальное смещение дна вверх и вниз, что дает возможность адекватного моделирования прошедшего события в рамках клавишной модели очага землетрясения.

Нужно отметить, что в силу несжимаемости жидкости, при «поршневой» подвижке в очаге, смещение воды на поверхности будет точно повторять смещение дна в сейсмическом очаге. В силу этого, формирование очага цунами будет происходить за время смещения дна в очаге землетрясения, в данном случае – время движения блоков. Размеры радиуса R очага цунами, найденные через магнитуду землетрясения [10], позволяют задать ориентировочные размеры блоков, из которых состоит сейсмический очаг, а смещение волновой поверхности над сейсмическим очагом, полученным по формулам связи высоты смещения и магнитуды землетрясения [10], позволяет рассчитать высоту подъема блоков в сейсмическом очаге. Были проведены расчеты от гипотетических сейсмических очагов, локализованных в наиболее сейсмоактивных районах Черного моря, где происходили сильные исторические землетрясения, и в местах активных разломов Крымского и Кавказского побережий Черного моря. Границы сейсмогенных блоков определяются системой региональных разломов [5]. Всего было проведено около 40 вариантов расчета для разных значений магнитуд землетрясения.

Необходимо отметить, что исследованию цунамигенных землетрясений в Черноморском бассейне посвящено много работ. Наиболее полно, на взгляд авторов, многие аспекты данной тематики отражены в работах [11–20].

Численное моделирование и спектральный анализ

Используя результаты полученных расчетов генерации и распространения волн цунами в акватории Черного моря [21, 22], был проведен одномерный и двумерный (wavelet) спектральный анализ и получены спектральные характеристики волн цунами в Черном море как для исторических событий, так и для возможных сильных подводных землетрясений. Амплитудные спектры мареограмм во всех точках были рассчитаны с помощью дискретного преобразования Фурье, где спектральная плотность сигнала

$$X(j\omega) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp(-j\omega n),$$

$x(n)$ – сигнал дискретного времени; N – число отсчетов в сигнале; $\omega = 2\pi f T$ – нормированная круговая частота; f – частота в Герцах (Гц); T – интервал дискретизации в сек.

На графиках изображены модули спектральных плотностей в децибелах (дБ):

$$L(\omega) = 20 \lg(|X(j\omega)|).$$

Энергия сигнала запишется следующим образом:

$$E_x = \sum_{n=0}^{N-1} x^2(n).$$

Моделирование исторического землетрясения 12 июля 1966 г.

На рис. 1 – рис. 5 приведены результаты расчетов исторического землетрясения, вызвавшего небольшие волны цунами 12.07.1966 г., и спектральный анализ волнового поля, полученного при данном расчете. Магнитуда землетрясения $M=5,8$, максимальный подъем блоков 12 см. На рис. 1, а приведена локализация очага землетрясения, на рис. 1, б – положение волнового фронта через 12 мин после начала землетрясения, на рис. 1, в – гистограмма распределения высот волн на 10-метровой изобате вдоль российского побережья.

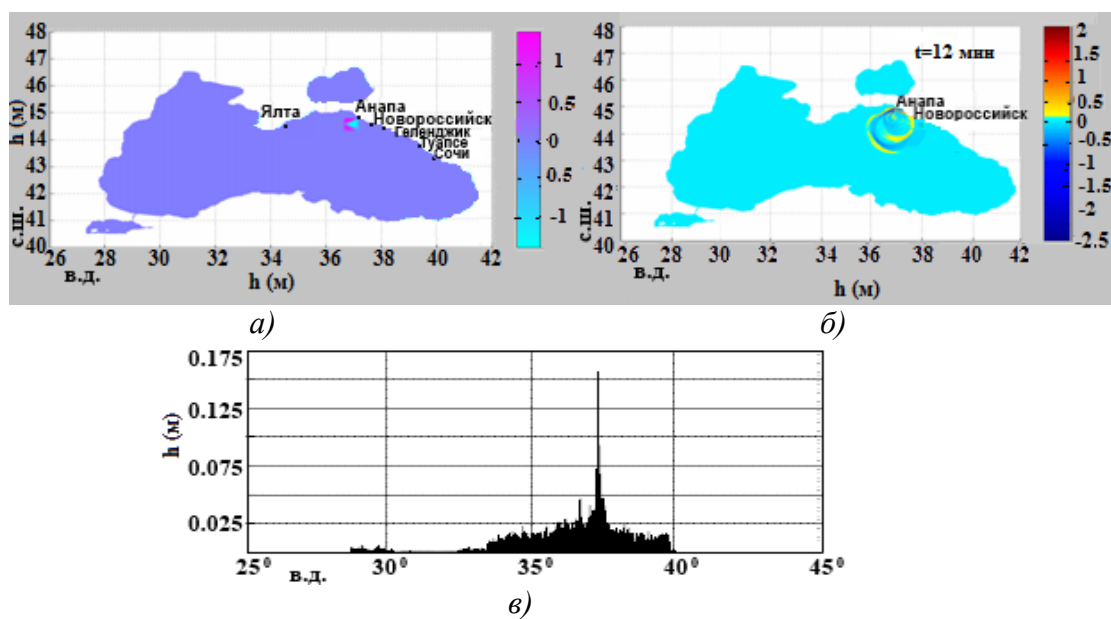


Рис. 1. Землетрясение 12.07.1966 г. с $M=5.8$:

а – локализация сейсмического очага; *б* – положение фронта волны через 12 мин после начала землетрясения; *в* – одномерная гистограмма для максимальных высот волн на 10-метровой изобате

На рис. 2, *а* приведена мареограмма для мористой точки, расположенной около г. Анапа также на 10-метровой изобате. Поскольку очаг землетрясения локализован в районе г. Анапа, то хорошо видно, что волна очень быстро достигает мареографа, высоты волн не превышают 8 см. На рис. 2, *б* представлен амплитудный спектр для мареограммы около города Анапа.

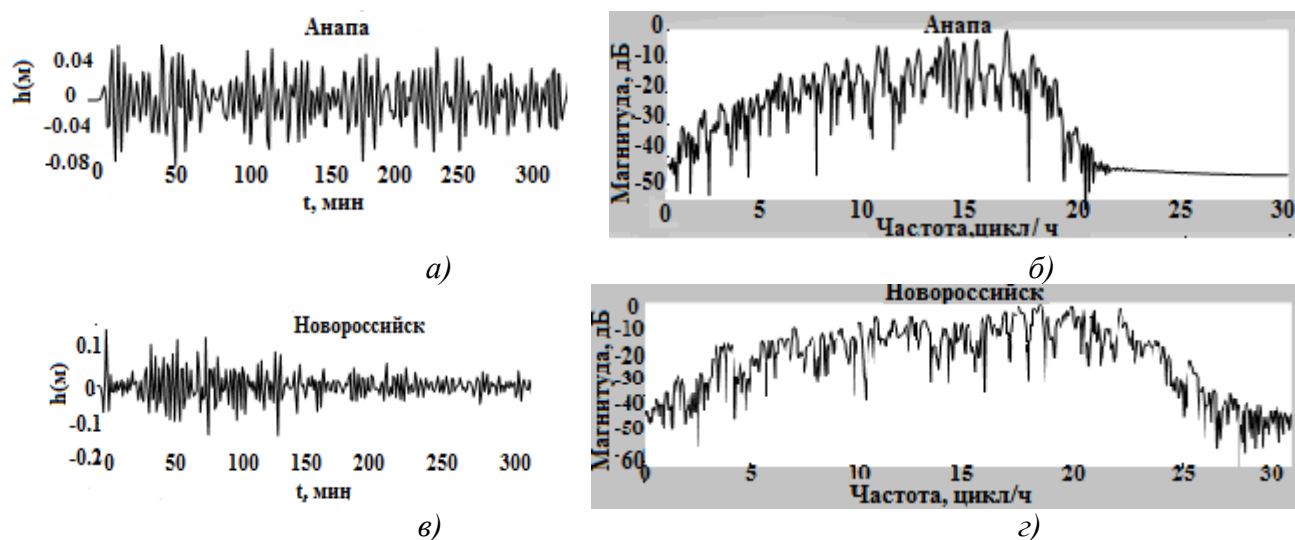


Рис. 2. Мареограмма и спектрограмма для мористой точки:

а, б – около г. Анапы;
в, г – около г. Новороссийска

Можно видеть, что на интервале, соответствующем длинным волнам (до 10 цикл/час; волновые периоды до 6 мин), зависимость почти линейно нарастает, для средних и более высоких частот (более 17 цикл/ч – периоды менее 4 мин) спектральные амплитуды уменьшаются по квадратичному закону. Если сравнить спектр этого сигнала со спектром волнового поля для мористой точки, расположенной около г. Новороссийск (рис. 2, *в, г*), (рассматривая первый сигнал, как входной),

то хорошо видно (рис. 3), что наибольшую энергию сигнал имеет в высокочастотной области, от 17 до 25 цикл/ч. В тоже время на спектре можно видеть, что пики для Анапы (черная линия) преобладают на низких частотах (до 3 цикл/ч). Оценка энергии сигнала для г. Анапы и г. Новороссийска дает отличие почти в два раза: $E_{\text{Анапа}} = 0.0456$; $E_{\text{Новороссийск}} = 0.0943$.

Нужно отметить, что волна подошла к г. Новороссийску несколько раньше, чем к г. Анапа, что связано со спецификой задания очага землетрясения: очаг был рассмотрен многоблочный с разнонаправленной реализацией движений блоков в очаге. Так, часть очага, ориентированная к городу Анапа, сдвигалась вниз, а блок в части очага, ориентированной к г. Новороссийск, сдвигался вверх. Мареограмма для мористой точки, расположенной рядом с г. Сочи приведена на рис. 4, а. Анализ спектральных характеристик волновых полей для городов Сочи и Анапы (см. рис. 2, а) приведен на рис. 4. Хорошо видно, что волна до г. Сочи доходит через 40 мин после начала сейсмического процесса в очаге землетрясения. Наибольший размах колебаний около г. Сочи составляет около 2 см. Сравнение амплитудных спектров г. Сочи (рис. 4, серая линия точками) и г. Анапы (рис. 4, черная линия) показывает, что волна, дошедшая до г. Сочи, существенно теряет свою энергию, особенно в диапазоне низких частот от 2,5 до 10 циклов/ч. На интервале частот от 4 до 5 циклов/ч (что соответствует периодам волн от 15 до 12 мин) существенное ослабление сигнала.

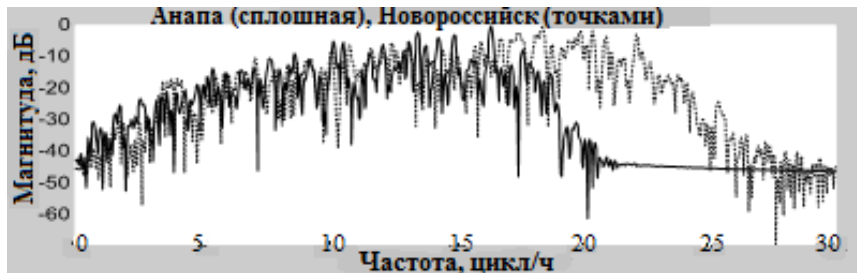


Рис. 3. Сравнение спектральных амплитуд для мористых точек вблизи г.Анапы (сплошная черная линия) и г. Новороссийск(серая линия точками)

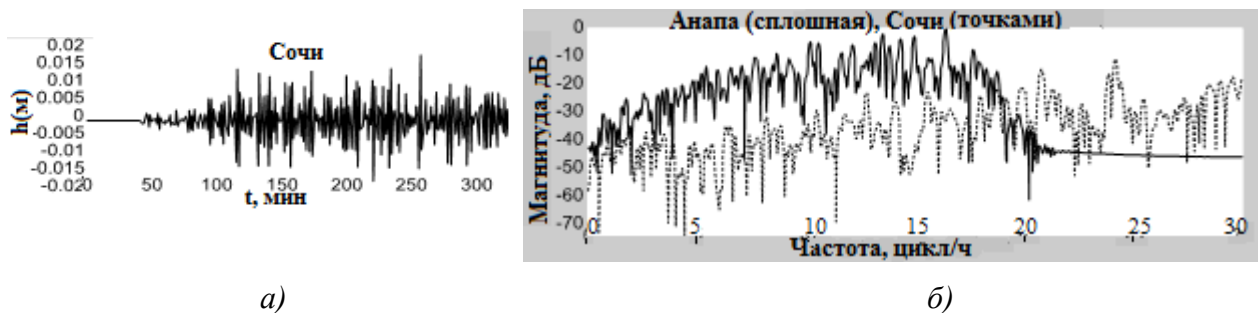


Рис. 4. Сравнение спектральных амплитуд:

а – для мористой точки около г. Сочи;

б – для городов Анапа (черная линия) и Сочи (серая линия точками)

Были рассмотрены также спектральные характеристики к западу от г. Анапа для г. Ялты. На рис. 5 приведены мареограмма (рис. 5, а) и спектральные характеристики для мористой точки, расположенной на 10-метровой изобате рядом с этим городом. Здесь приведено сравнение полученного спектра со спектром в мористой точке около г. Анапа (рис. 5, б). Хорошо видно, что волна доходит до Ялты примерно за 35-40 мин. Размах колебаний амплитуды на мареографной записи составляет 1 см. Волна существенно потеряла свою энергию, по сравнению с начальной (спектр сигнала для г. Анапа). Хорошо видно, что энергия подошедшего к Ялте сигнала равномерно распределена по всем частотам.

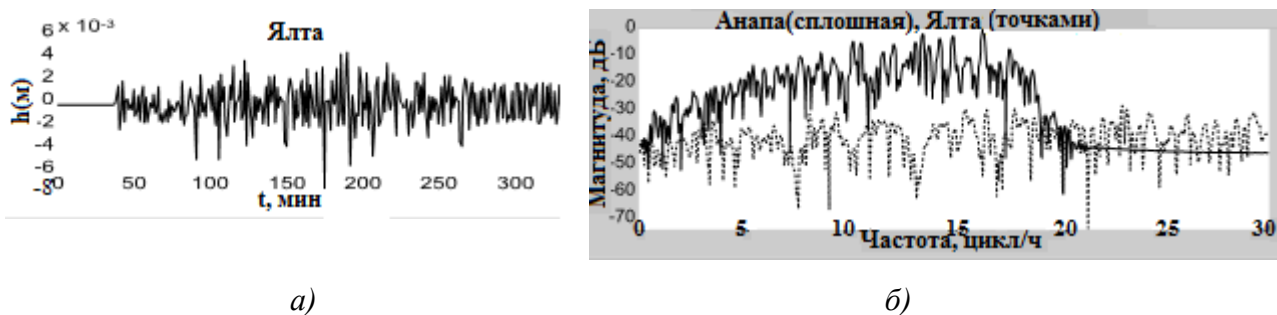


Рис. 5. Мареограмма и сравнение амплитудных характеристик:

a – для г. Ялта; b – для городов Анапа (черная линия) и Ялта (серая линия точками)

Интересно сравнить энергию волн для городов Ялта и Сочи. На рис. 6 приведено сравнение спектральных амплитуд этих волн. Оценка энергии сигналов дает: $E_{\text{Сочи}} = 2.8644 \cdot 10^{-3}$; $E_{\text{Ялта}} = 2.4329 \cdot 10^{-4}$, т.е. отличие энергии подошедших волн почти на порядок.

Для ряда городов был проведен двумерный спектральный анализ (wavelet-анализ) и построены wavelet-спектрограммы. Так, wavelet-спектрограммы для городов Анапа и Новороссийск приведены на рис. 7 a , b .

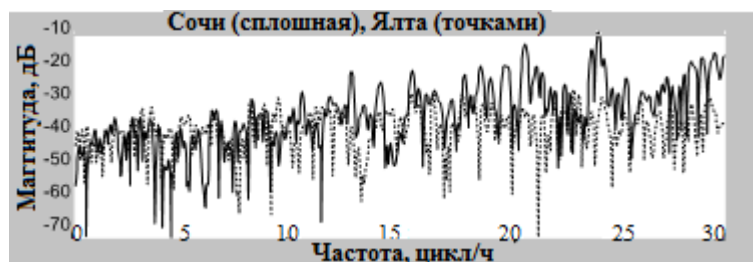


Рис. 6. Сравнение спектральных амплитуд для мористых точек около городов Ялта (серая линия точками) и Сочи (черная линия)

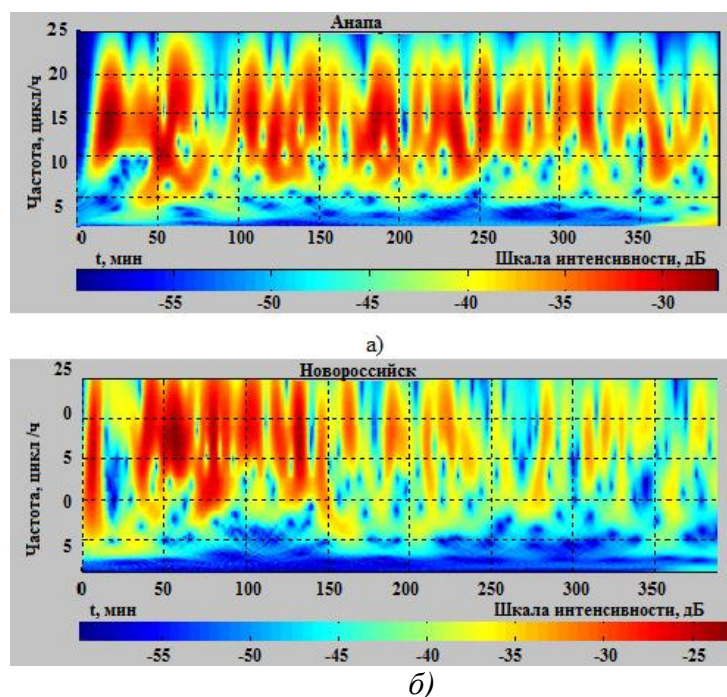


Рис. 7. Wavelet - спектрограммы для двух мористых точек:

a – г. Анапа; b – г. Новороссийск

По горизонтальной оси отложено время расчета (400 мин), по вертикальной оси – частота в цикл/час, а шкала интенсивности показывает энергию сигнала в дБ. Хорошо видно, что для Анапы энергия сигнала распределена по времени более равномерно для всего времени расчета, чем для Новороссийска. Так, для Анапы наибольшая интенсивность соответствует диапазону от 11 до 17 цикл/ч (периоды волн от 5,4 до 3,5 мин) в первые 25 мин мареографной записи. Для Новороссийска наибольшая интенсивность соответствует диапазону с 14 до 23 циклов/ч во временной интервал от 50 до 70 мин.

Численное моделирование опасности катастрофических землетрясений и цунами для северо-запада российского побережья Черного моря

Было проведено численное моделирование возможных катастрофических землетрясений, генерирующих сильные волны цунами, от трех гипотетических очагов, расположенных в местах локализации исторических землетрясений (рис. 8).

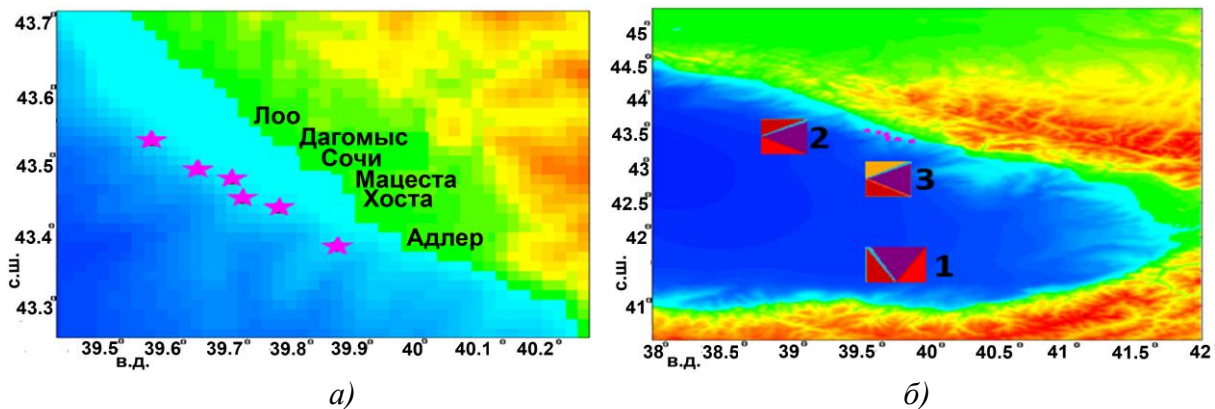


Рис. 8. Расположения:

а – пункты мареографов; *б* – очагов рассматриваемых землетрясений

На рис. 9 – рис. 11 приведены результаты расчетов для трех сценариев, соответствующих положению сейсмических очагов на рис. 10, *б* с магнитудой $M=7$ для 1-го и 2-го сценариев и магнитудой $M = 7,5$ для 3-го сценария. Максимальный подъем блоков в очаге землетрясения для 1-го и 2-го сценариев составляет 1,23 м и для 3-го сценария – 2,5 м [22].

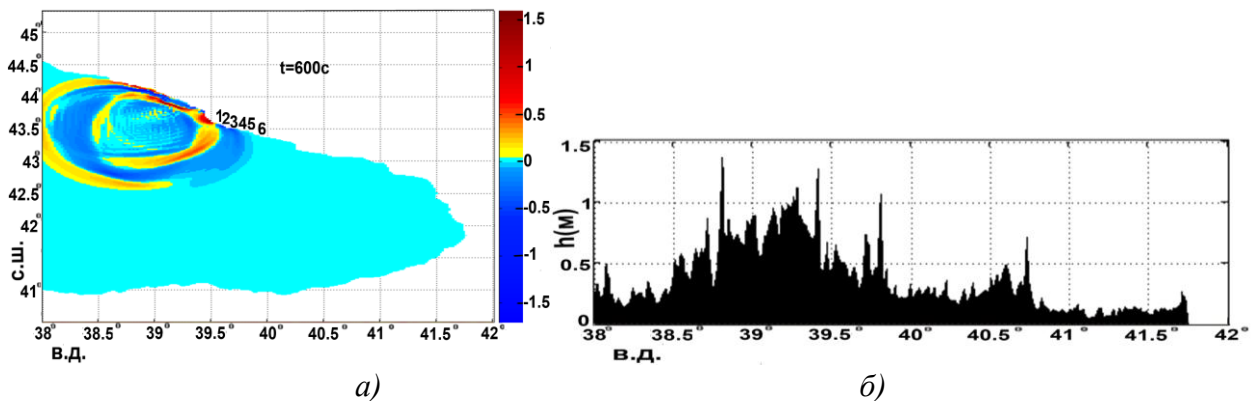


Рис. 9. Сценарий 1:

а – положение волновых фронтов в момент времени $t = 400$ с;
б – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

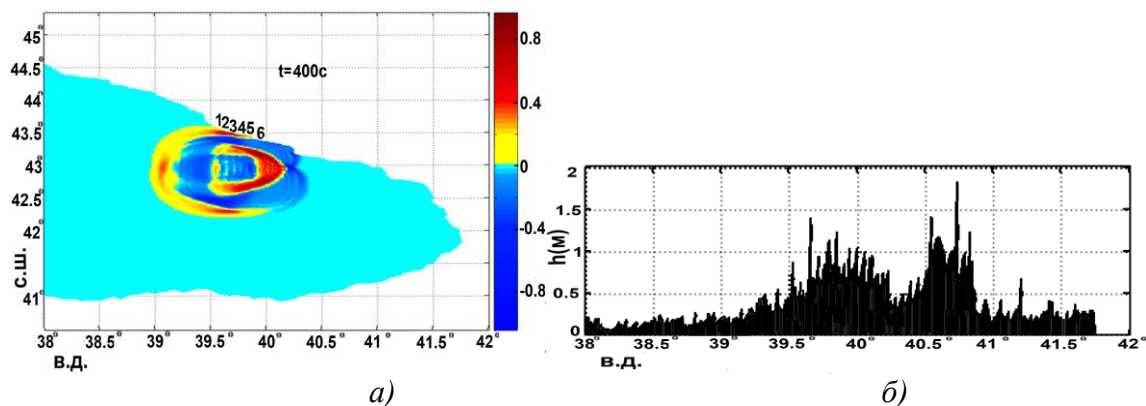


Рис. 10. Сценарий 2:

a – положение волновых фронтов в момент времени $t = 400$ с;
б – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

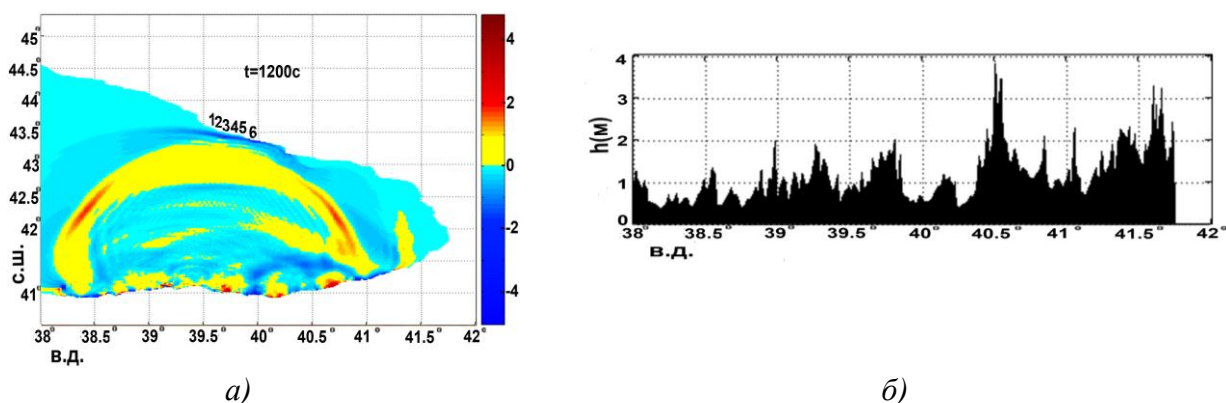


Рис. 11. Сценарий 3:

a – положение волновых фронтов в момент времени $t = 1300$ с;
б – гистограмма распределения высот волн вдоль береговой зоны на 4-метровой изобате

В зависимости от расположения сейсмического очага для сценариев 1 и 2, приход первой волны к пункту записи составляет от 5 до 22 мин, для сценария 3 это время составляет 76 мин. Анализ спектральных характеристик расчетных мареограмм с виртуальных мареографов для мористых точек перед пунктами, приведенных на рис. 8, *a* (Дагомыс, Сочи, Мацеста, Хоста, Адлер), представлен на рис. 12, *a-д*. На рисунках приведены амплитудные спектры сигналов для трех сценариев, соответствующих трем локализациям сейсмического очага (рис. 8, *б*). Сглаживание амплитудных спектров проводилось их обработкой с помощью фильтра нижних частот. Расчет проводился до 20 ц/ч, так как энергия на этом интервале еще достаточно значительная. Сплошной линией отмечен спектр для расчета от очага (1), расположенного на юго-востоке Черного моря, рядом с турецким побережьем (где с эпицентром на суше 26 декабря 1939 г. произошло разрушительное землетрясение с магнитудой $M=8$) – первый сценарий. Пунктирная линия соответствует второму сценарию (очаг 2), а штрих-пунктир – третьему (очаг 3), расположения которых также соответствуют историческим землетрясениям (например [13, 14]). Для всех рисунков хорошо видно, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 ц/ч), энергия двух сигналов (сценарий 1 и 3) значительна. Существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне 2–6 ц/ч, что соответствует 30- и 10-минутным волнам. Причем от 4 до 4,5 ц/ч для сценария 3 (очаг 3) энергия сигнала достигает до 50 дБ. Расположение очага слева от Сочи (очаг 2) дает в этом диапазоне энергию только до 25 дБ. На рис. 12, *a, б* приведены амплитудные спектры сигналов для г. Дагомыс и г. Сочи.

Хорошо видно, что картины почти одинаковы, ввиду близости расположения пунктов побережья и отсутствия береговых особенностей (пологие склоны, отсутствие заливов и т.д.).

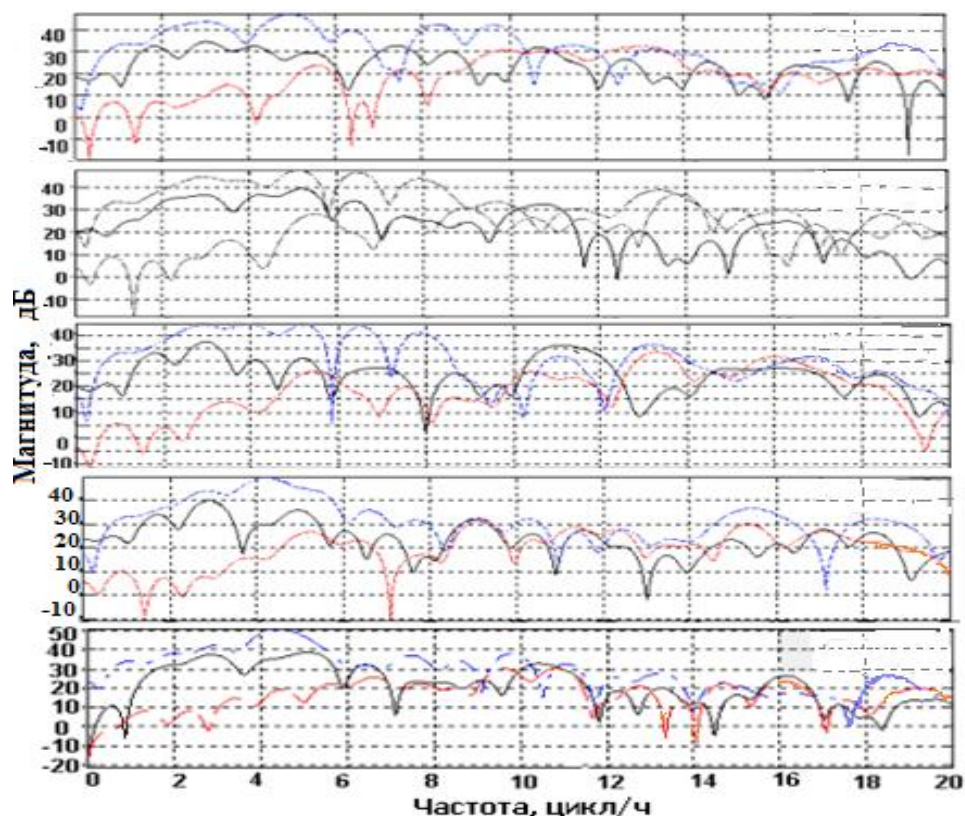


Рис. 12. Амплитудные спектры волновых полей соответствующих мареограммам, полученным в мористых точках перед пунктами:

a – Дагомыс; *б* – Сочи; *в* – Мацеста; *з* – Хоста; *д* – Адлер для трех сценариев расчета, соответствующих трем локализациям сейсмического очагов (рис. 8, б). Сплошной линией отмечен спектр для расчета от очага (1), пунктирная линия соответствует сценарию (2); штрих-пунктир (3)

Однако, по сравнению с Сочи, для Дагомыса доля энергии на интервале 2–4 ц/ч для сценария 1 (от дальнего очага) уменьшилась. Интересно, что для сценария 2 (очаг 2) энергия выросла и ее максимальное значение составляет 23 дБ в интервале 4,6–6 ц/ч. Для Сочи основную энергию (с 40 до 50 дБ) принесут волны с частотами 2 до 5,5 ц/ч (с 30–12 мин длительностями) от очагов, расположенных справа от Сочи (очаг 3) и дальнеполевого очага (1). От очага, расположенного слева от г. Сочи (очаг 2), основную энергию (27 дБ) принесут 10–13 мин. волны (4,5–6 ц/ч). Нужно отметить, что для Дагомыса, Хосты и Сочи для частоты 1,5 ц/ч, соответствующей длинным 40-минутным волнам существует значительная потеря энергии до -5 - -10 дБ. Для Мацесты значительная доля энергии третьего сигнала (штрих-пунктирная линия) лежит в диапазоне 2,3–4,8, 6–6,5 и 6,7–7 ц/ч, что значительно выше, чем в других рассмотренных пунктах.

Энергия двух других сигналов в этих диапазонах остается практически без изменений, по сравнению с другими пунктами. Для г. Хосты энергия сигнала от очага 3 (штрих-пунктирная линия) почти не изменилась, наибольшая энергия для дальнего очага 1 лежит в интервале 2,2–2,7 ц/ч, что соответствует периодам волн порядка 25 мин. Для сценария 2 (пунктирная линия) энергия сигнала на данном интервале (до 8 ц/ч) осталась почти без изменений. Для г. Адлера хорошо видно, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 ц/ч), энергия двух сигналов (сценарий 2 и 3) значительна. Существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне 2–6 ц/ч, что соответствует 30- и 10-минутным волнам. Причем от 4 до 4,5 ц/ч для сценария 2 (очаг 2), энергия сигнала доходит до 50 дБ.

Численное моделирование возможных катастрофических цунами в акватории Черного моря для побережья Турции

Проведено исследование виртуального цунамигенного землетрясения с магнитудой 7,3. Выбраны 6 виртуальных сейсмических очагов (I–VI) (рис. 13). Будем рассматривать цунамиопасность ряда участков турецкого побережья, для чего следует проанализировать данные с виртуальных мареографов в пп. 29, 24 и 15. Для турецкого побережья очаги I, II, III являются ближнеполевыми, а очаги IV, V, VI – дальнеполевыми.

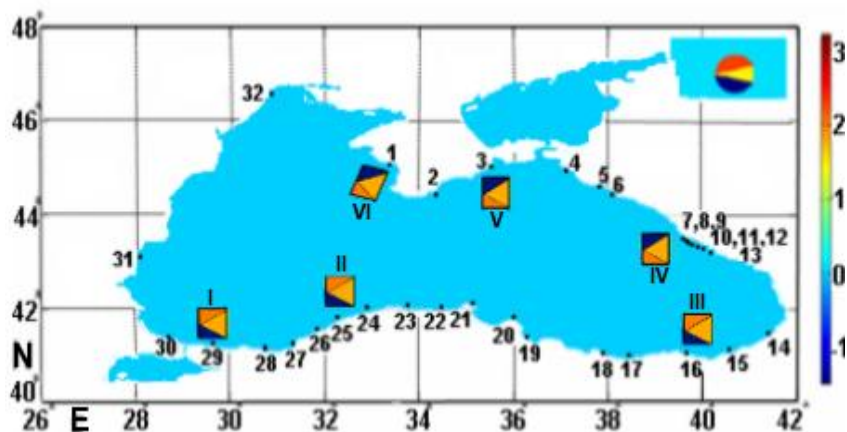


Рис. 13. Расчетная акватория Черного моря; 1-VI – локализация виртуальных сейсмических источников; 1-32 – расположение виртуальных мареографов

Максимальный подъем блоков в сейсмических источниках 1,75 м. Рассматриваются волновые поля от очагов I и VI для п. 29; от очагов II и V для п. 24 и от очагов III и V для п. 15. Для исключения нелинейных эффектов при проведении численного моделирования генерации и распространения волн от ближнеполевых очагов I, II и III, расчет проводится от эллиптического блочного очага (см. вставку на рис. 13). На основе результатов проведенных расчетов, был выполнен wavelet-анализ для некоторых пунктов, расположенных около турецкого побережья. На рис. 14 – рис. 16 приведены мареограммы и спектрограммы волновых полей от ближнеполевых очагов I, II и III, которые были построены по данным мареографов, расположенных в пп. 29, 24 и 15.

Хорошо видно, что для всех очагов характерна концентрация волновой энергии в низкочастотном интервале от 3 до 8 цикл/ч, что соответствует волновому периоду от 20 до 8 мин. Можно видеть, что для источника I (рис. 13) волновая энергия с интенсивностью до 20 дБ сосредоточена в двух областях: в низкочастотном интервале от 1 до 2 цикл/час (с длительностью 60-30 мин.), в промежутке времени от 20 до 80 мин, и в интервале от 4 до 8 цикл/час (с длительностью 15–8 мин) на временном интервале от 10 до 40 мин.

Затем практически вся энергия перетекает в более высокочастотную область. Низкочастотная составляющая с существенно меньшей энергией от 3 до 10 дБ присутствует и в других временных интервалах. Для источника II (рис. 13) основную энергию (до 10 дБ) приносят волны с частотами от 2 до 5 цикл/ч, что соответствует длинным волнам от 12 до 30 мин, а затем, как и в первом случае, практически вся энергия перетекает в более высокочастотную область. Для источника III (рис. 13) хорошо видно, что волновая энергия с интенсивностью до 8 дБ сосредоточена в двух областях: в низкочастотном интервале от 3 до 10 цикл/ч (с длительностью 20–6 мин) на временных интервалах от 10 до 49 мин и от 50 до 70 мин. На интервале до 30 мин, как в случае 1 и 2, хорошо видны высокочастотные составляющие с интенсивностью до 7 дБ, что может соответствовать переотражениям волн в шельфовой зоне.

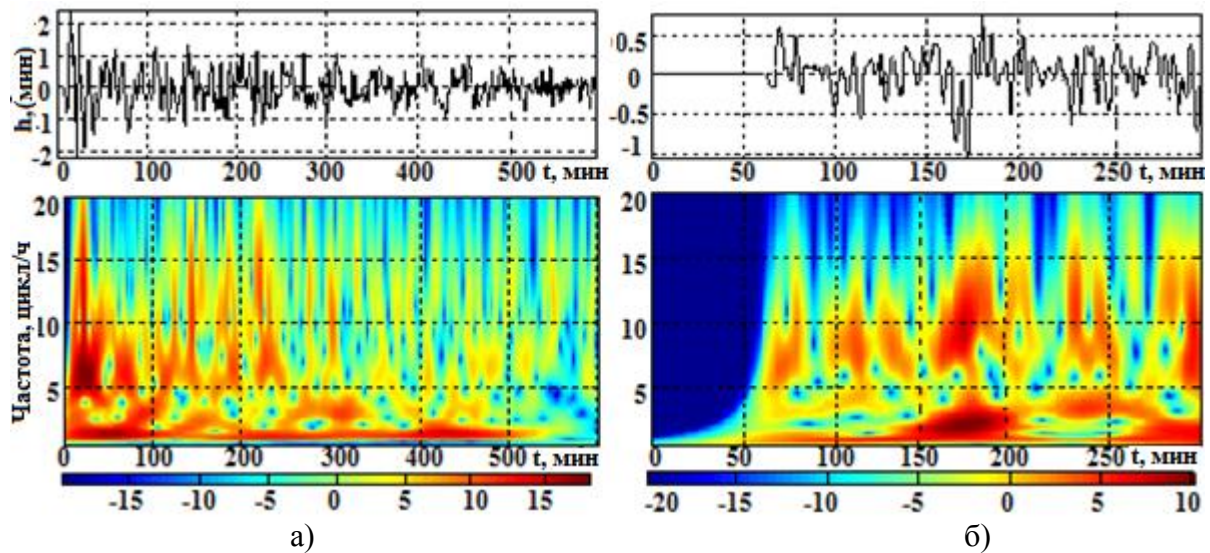


Рис. 14. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п.29:
a – от ближнеполевого очага I; *б* – от дальнеполевого очага VI

Таким образом, можно видеть, что в интервале частот, соответствующем процессу цунами (до 8 цикл/ч), волновая энергия, пришедшая от ближнеполевых источников (I, II, III), достигает 20 дБ. Хорошо видно, что наибольшая энергия для дальнеполевого очага VI (рис. 14, б) лежит в интервале 1–3 цикл/ч, что соответствует периодам волн порядка 60–20 мин, с интенсивностью до 10 дБ. Для сценария 2 (рис. 15, б) существенная доля энергии сосредоточена в диапазоне от 2 до 3 цикл/ч (30–20 мин волны) в интервалах от 40 до 80 мин и от 220 до 270 мин. Однако она значительно меньше, чем в первом случае (до 3–4 дБ).

Для сценария 3 (рис. 16, б) наибольшая, но очень незначительная энергия, сосредоточена в низкочастотном диапазоне от 1 до 3 ц/ч в интервале от 150 до 200 мин (60 – 15 мин длительность волн).

Таким образом, хорошо видно, что низкочастотная составляющая, соответствующая процессу цунами, присутствует также и для дальнеполевых источников V, VI. Однако интенсивность от них существенно меньше, чем для источников ближнеполевых источников I, II и III.

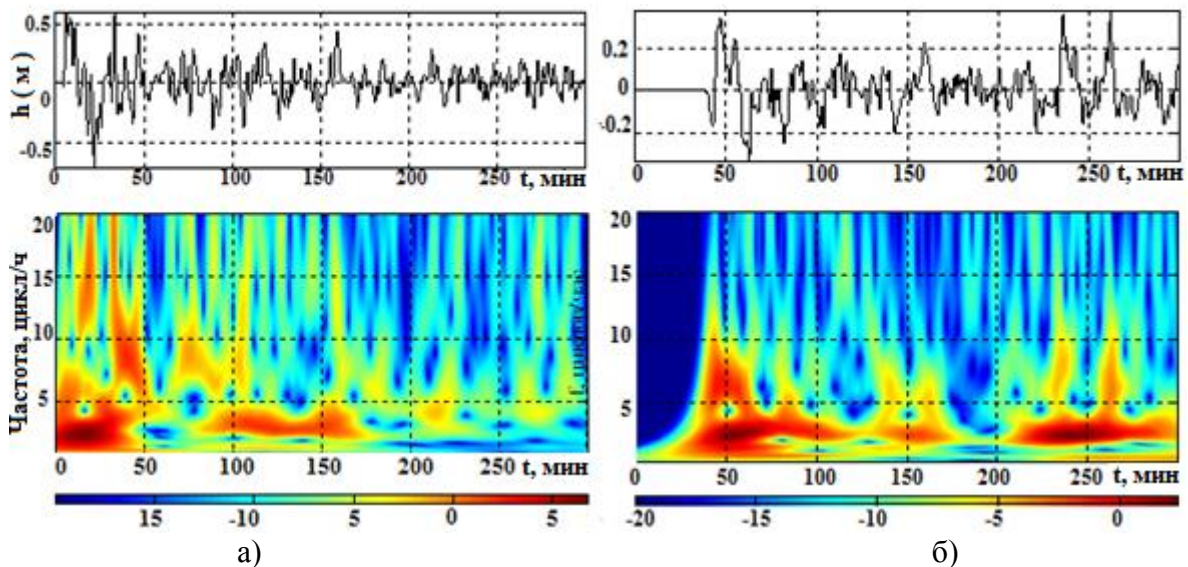


Рис. 15. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п. 24:
a – от ближнеполевого очага II; *б* – от дальнеполевого очага V

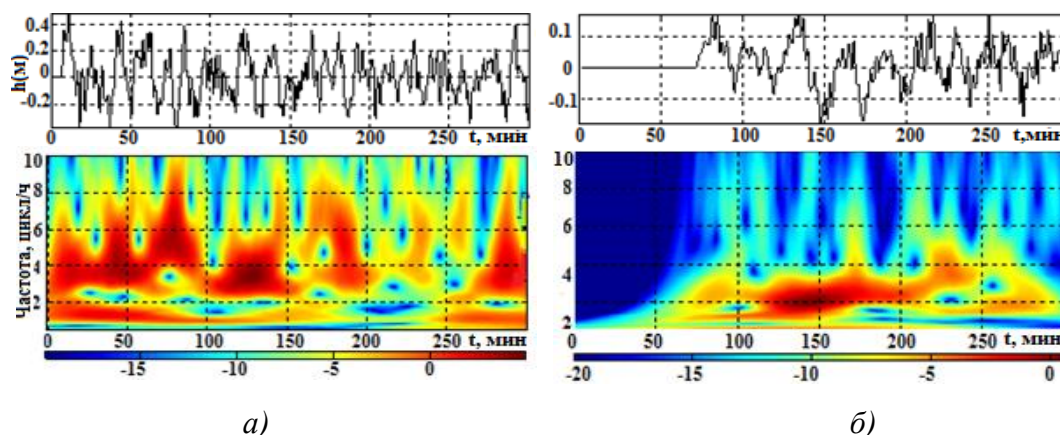


Рис. 16. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п.15:
a – от ближнеполевого очага III; *б* – от дальнеполевого очага V

Численное моделирование возможных катастрофических цунами для западного побережья Черного моря

Хорошо известно, что западная половина Черного моря экранирована от восточной части подводным хребтом, и при этом, как отмечено в работе [25]: «Источники цунами в восточной половине моря почти не передают волновую энергию в его западную часть. И, наоборот, волны, возбужденные в западной части моря, являются сравнительно слабыми в его восточной половине».

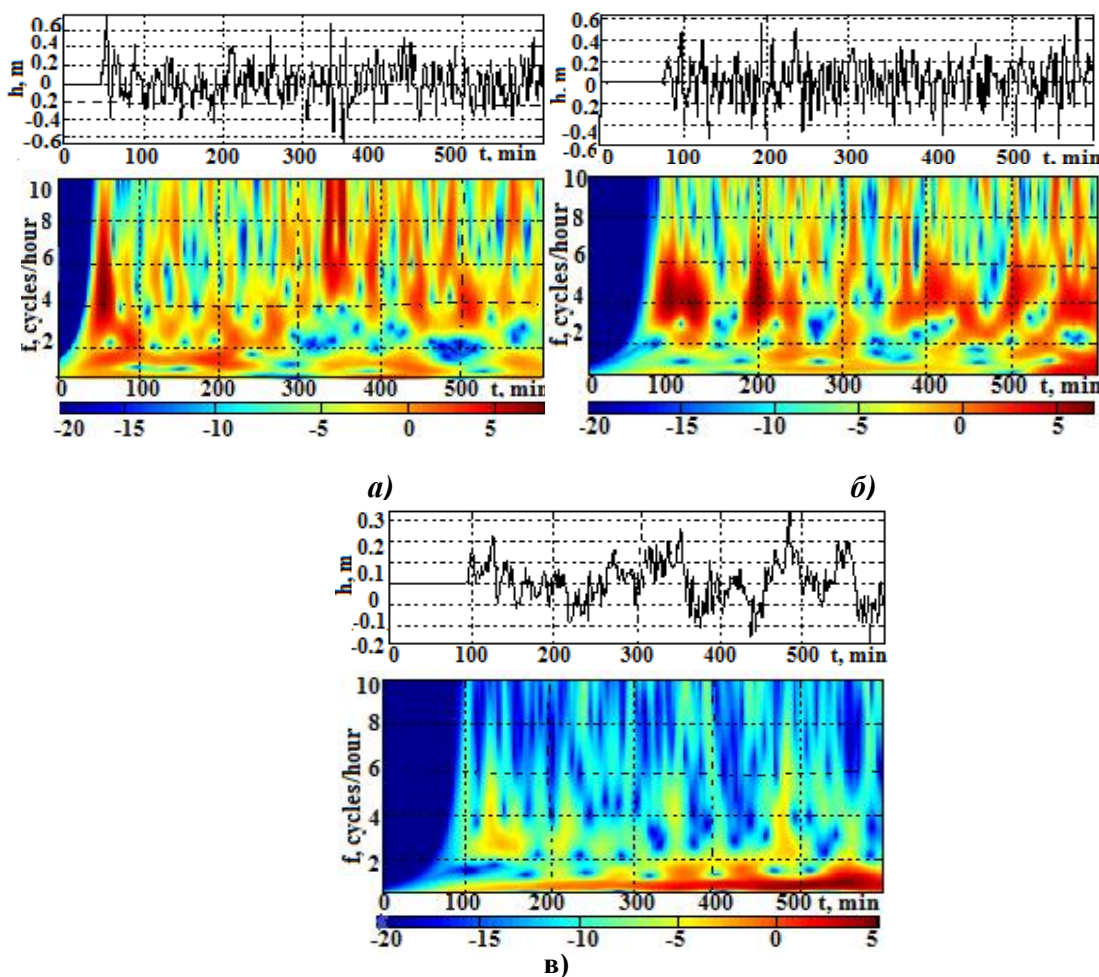


Рис. 17. Мареограммы и wavelet -спектрограммы для п. 31 (г. Варна) от сейсмических очагов:
a – от среднеполевого очага I; *б* – от дальнеполевого очага II; *в* – от дальнеполевого очага VI

В этой работе проанализированы волновые поля вблизи городов Варна и Одесса от дальнеполевых сейсмических очагов I, II и VI. Так, для виртуального мареографа, расположенного в мористой точке около г. Варна на 4-метровой изобате (п. 31), мареограммы и соответствующие им спектрограммы представлены на рис. 17.

От очага I: Наибольшая амплитуда волн на 4-метровой изобате составляет 70 см. Волна доходит до мареографа за 40 мин. На спектрограмме хорошо видно, что есть два мощных выброса на интервалах от 30 до 70 мин в диапазоне от 3,5 до 8 цикл/ч (волны, длительностью 17-8 мин) до 10 дБ и на интервале 340-360 мин с 4 до 10 цикл/ч, т.е. для 15-, 6-минутных волн, с энергией до 8 дБ. Т.е. наиболее интенсивными являются волны с длительностью в интервале 6-17 мин, что хорошо соответствует процессу цунами. Также на спектрограмме можно видеть три области низкочастотных составляющих более слабой интенсивности до 5 дБ с частотами от 1 до 2 цикл/ч на интервалах от 20 до 100 мин, от 170 до 240 мин и от 400 до 480 мин большая доля энергии сосредоточена в высокочастотной области от 6 до 10 дБ.

От очага II: Наибольшая амплитуда волн на 4-метровой изобате составляет 55 см, однако, амплитуда первой волны не больше 20 см. В силу расположения очагов, волна приходит к пункту на 40 мин позже, чем от очага I. Как видно из спектрограммы, основная энергия локализована в двух областях: на интервале от 80 до 140 мин и 180 – 220 мин. В первом случае энергия сосредоточена, в основном, от 2,2 до 6 цикл/ч, т.е. наибольшую энергию до 7 дБ несут 25-10 мин волны. Есть также несколько областей меньшей интенсивности до 3 дБ для диапазона 3-6 цикл/ч, т.е. для 20-10 мин волн. Картина для высокочастотных составляющих сходна с спектрограммой для очага I, что может указывать на значительные переотражения волн в шельфовой зоне.

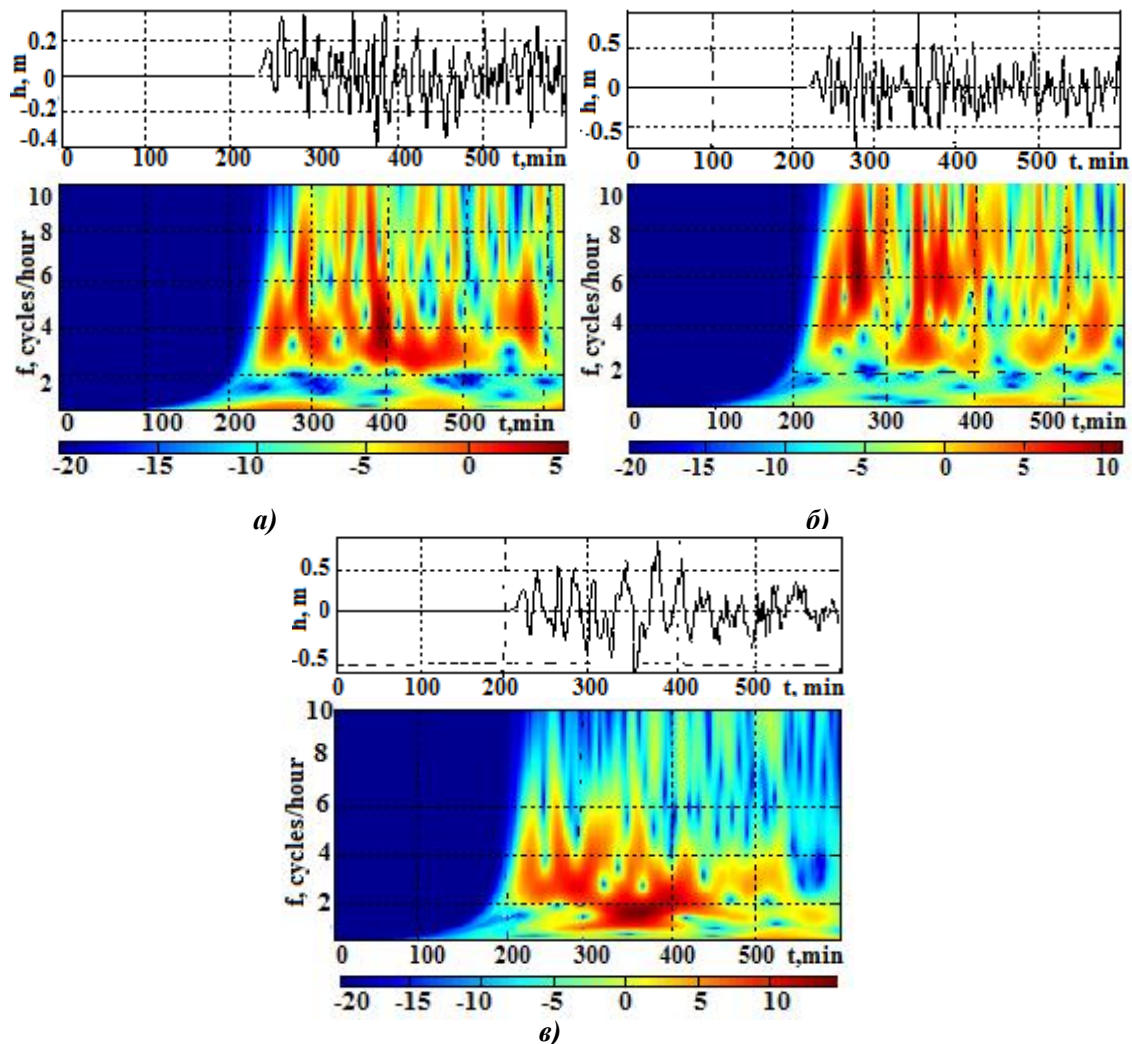


Рис. 18. Мареограммы и wavelet- спектрограммы для п. 32 (г. Одесса) от дальнеполевых очагов: а – от очага I; б – от очага II; в – от очага VI

От очага VI: для данного пункта очаг VI является дальнеполевым очагом. Волна подходит к пункту через 1 ч 40 мин. Наибольшие амплитуды волн на 4-метровой изобате составляют 35 см, однако, максимальную амплитуду имеет не первая волна. Наибольшая энергия волн сосредоточена в диапазоне до 1 до 2 цикл/ч от 300 до 600 мин, т.е. для 30-60-минутных волн. Наибольшая энергия до 5 дБ от 450 до 580 мин. Высокочастотные компоненты практически отсутствуют.

Из данного анализа хорошо видно, что даже для сильного землетрясения черноморское побережье Болгарии не будет подвергаться значительной опасности, длинноволновые волновые компоненты не концентрируют значительную энергию, что, возможно, связано с сильной волновой рефракцией. Этот вывод хорошо согласуется с выводами работ [26, 27].

Для анализа северо-западной части черноморского побережья, была выбрана мористая точка, расположенная около г. Одесса, (п. 32). Мареограммы волновых полей от трех виртуальных сейсмических источников и соответствующие им спектрограммы приведены на рис. 18.

От очага I: очаг дальнеполевой, максимальные амплитуды волн до 40 см. Вся энергия до 5 дБ сосредоточена в области 370-400 мин в вытянутой области от 2,5 до 5,7 цикл/ч, что соответствует волнам длительностью от 10 до 24 мин. Области меньшей интенсивности практически равномерно распределены на интервале 220-500 мин. При 280 мин, 350 и 370 мин в интервале 2-10 цикл/ч интенсивность волн порядка 3 дБ.

От очага II: наибольшая энергия сосредоточена в интервале 280-300 мин до 14 дБ от 5 до 8 дБ, т.е. у волн с длительностью от 5 до 7,5 мин. Меньшая интенсивность до 8 дБ наблюдается в интервале от 230 до 320 мин и от 350 до 430 мин. Энергия равномерно распределена по всем частотам от 2 до 10 цикл/ч.

От очага VI: наибольшая энергия сосредоточена в интервале 340-400 мин до 20 дБ для частот с 1 до 2 цикл/ч, что соответствует длительностям 30-60 мин. Интервалы с меньшей интенсивностью в областях с 220 до 320 мин и с 370 по 450 в интервале 2-4 цикл/ч, включающих некоторые локализованные области нулевой интенсивности.

Таким образом, даже для сильного землетрясения с магнитудой 7,3 пункты, расположенные на западном побережье Черного моря, не будут подвергаться значительной опасности, длинноволновые волновые компоненты не будут иметь значительной энергии для больших разрушений на берегу.

Выводы

Полученные значения максимальных высот волн непосредственно связаны с выбором сценария реализации землетрясения в виртуальных сейсмических очагах: в тех случаях, когда первая вертикальная подвижка вниз в очаге ориентирована в сторону побережья. Такая реализация землетрясения приводит к появлению отрицательного фронта волны (волны понижения), направленного к побережью. Как показано в работах [20, 21], в этом случае возможно существенное усиление волны, выходящей на шельф.

Кроме того, пересчет с изобаты на сухой берег приводит к значительному подрастанию высоты волны. В связи с этим, приведенные в работе значения расчетных высот волн от модельных сейсмических очагов на 4- и 10-метровой изобате можно считать нижней оценкой при определении высот наката волн на берег. Проведенный спектральный анализ показал, что наибольшая волновая энергия в основном будет сосредоточена в низкочастотной составляющей спектра, что соответствует периодам волн порядка 12-30 мин. Наиболее опасными при этом являются ближнеполевые сейсмические источники, при которых наибольшая интенсивность волновой энергии может достигать 50 дБ.

Анализ результатов численного моделирования показал, что при сильных землетрясениях с магнитудой $M > 7$ как для дальне-, так и для ближнеполевых очагов, наиболее цунамиопасными является российское северо-восточное побережье Черного моря, побережье

Украины в районе Ялты, юго-западное побережье Турции. Однако спектральный анализ показал, что энергия подошедшей волны и локализация эпицентра землетрясения не коррелированы.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 12-05-00808).

Библиографический список

1. **Соловьева, О.Н.** Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // *Океанология*. 2004. №44. С. 679-685.
2. **Никонов, А.А.** Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // *Изв. РАН. Физика Земли*. 1997. №. 33. С. 72-87.
3. **Казьмин, В.Г.** Современная кинематика микроплит в Черноморском-Южно-Каспийском регионе / В.Г. Казьмин, Л.И. Лобковский, Б.Г. Пустовитенко // *Океанология*. 2004. № 44. С. 600-610.
4. **Соловьева, О.Н.** Сейсмичность и цунами северо-восточной части Черного моря / О.Н. Соловьева, И.П. Кузин // *Океанология*. 2005. №45. С. 826-833.
5. **Чебаненко, И.И.** Схема глубинных разломов на участках Крымского и Кавказского побережий Черного моря / И.И. Чебаненко [и др.] // *Геол. журн.* 2003. № 1. С. 54-58.
6. **Лобковский, Л.И.** Клавишная модель сильных землетрясений в островных дугах и активных континентальных окраинах / Л.И. Лобковский, Б.В. Баранов // *Доклады АН СССР*. 1984. № 275. С. 843-847.
7. **Лобковский, Л.И.** Моделирование цунами в Охотском море на базе клавишной модели субдукции / Л.И. Лобковский [и др.] // в кн.: *Фундаментальные исследования морей и океанов*; под ред. акад. Н.П. Лаверов. – М.: Наука, 2006. Ч. 1. С. 292-303.
8. **Левин, Б.В.** Физика цунами / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: Янус - К, 2005. – 360 с.
9. **Доценко, С.Ф.** Численное моделирование распространения волн цунами в открытой части Черного моря / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журн.* 1995. № 1. С. 67–80.
10. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
11. **Фомичева, Л.А.** Цунами в Черном море / Л.А. Фомичева, А.Б. Рабинович, А.Н. Демидов // *Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР*. Т. IV. Черное море. Вып.1. Гидрометеорологические исследования. – СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 352–354.
12. Pelinovsky E.N., Preliminary estimates of tsunami danger for the northern part of the Black Sea // *Phys.Chem.Earth*. 24A (1999) Pp. 75-178.
13. **Доценко, С.Ф.** Цунами 1927 г. в Черном море: данные наблюдений, численное моделирование / С.Ф. Доценко, А.В. Коновалов // *Морской гидрофизический журнал*. 1995. № 6. С. 3-16.
14. **Доценко, С.Ф.** Черноморские цунами // *Изв. РАН. Физика атмосферы и океана*. 1994. №30. С. 513-519.
15. **Доценко, С.Ф.** Связь интенсивности цунами в Черном море с магнитудой подводного землетрясения // *Морской гидрофизический журнал*. 1999. №5. С. 12-22.
16. **Доценко, С.Ф.** Оценки параметров волн цунами вдоль южного побережья Крымского полуострова // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. №3. С. 3-10.
17. **Доценко, С.Ф.** Оценки распространения цунами в северо-западной части Черного моря // *Морской гидрофизический журнал*. 2005. № 6. С 46–53.
18. **Доценко, С.Ф.** Характеристики черноморских цунами по данным измерений / С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. №1. С. 22-31.
19. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // *Изв.АИН РФ, ПММ*. 2002. № 3. С. 27-34.
20. **Доценко, С.Ф.** Спектры черноморских цунами / С.Ф. Доценко, А.В. Ингеров // *Морской гидрофизический журнал*. 2007. № 5. С. 21-30.
21. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Л.: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
22. **Pelinovsky E.N., Mazova R.Kh.** // *Natural Hazards*. 1992. V. 6. Pp. 227-249.

23. **Доценко, С.Ф.** Излучение длинных волн из сейсмоактивных зон Черного моря // Морской гидрофизический журнал. 1995. № 5. С. 3–9.
24. **Ranguelov, B.** Tsunami Hazard Research in the Black Sea. // in: Proc. 2nd Int. Conf. SEE-2, 15-17 May, 1995, Tehran. V. 1. Pp. 241-244.
25. **Ranguelov, B.** Possible tsunami deposits discovered on the Bulgarian Black Sea coast and some implications // in: Submarine Landslides and Tsunamis Kluwer Acad.Publ. 2003. Pp. 237-242.

*Дата поступления
в редакцию 15.05.2013*

R.Kh. Mazova, B.A. Kiselman, N.N. Osipenko, E.A. Kolchina

ANALYSIS OF SPECTRAL CHARACTERISTICS OF BLACK SEA TSUNAMI

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

Purpose: In frames of nonlinear shallow water equations the nonlinear simulation of both historical and possible strong tsunami from model underwater seismic sources with various location in Black Sea basin. The location and shape of seismic sources was selected with taking into account the most seismoactive zones of Black Sea depression, using geological and geodynamical data of region. Seismic source was considered in frames of kinematical keyboard model of earthquake source.

Approach: Numerical and spectral analysis of computed tsunami wave field was performed.

Findings: With using of results of numerical simulation of generation and propagation of tsunami waves in Black Sea basin it was performed spectral analysis and there were obtained spectral characteristics of Black Sea tsunami waves for both historical and hypothetical strong underwater earthquakes. Amplitude spectra of virtual tide-gauge records in all points were computed with using of discrete Fourier transformation. For a number of points there were constructed and analyzed the wavelet spectrograms.

Originality: The results of analysis can be used under construction works in coastal and shelf zones of Russian coast of Black Sea. As well, the importance of such computations is connected, in particular, with problem of exploitation of sea part of gas pipe-line Russia-Turkey ("Blue Stream" project), connecting territories of these countries on the Black Sea bottom, which should operate under conditions of higher seismicity and landslide danger of Russian and Turkish slopes of the Black sea.

Key words: earthquake source, keyboard model of tsunamigenic earthquake, tsunami waves, numerical simulation, spectral analysis.

УДК 519.63, 536.46

Л.Ю. Катаева^{1,2}, С.А. Тарнаева¹, И.В.Кольчик¹

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЙ В РЕЗУЛЬТАТЕ РАЗГЕРМЕТИЗАЦИИ ЦИСТЕРНЫ С ЯДОВИТЫМИ ХИМИЧЕСКИМИ ВЕЩЕСТВАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский филиал МИИТ, г. Москва²

Излагаются результаты численного моделирования динамики термика, образующегося в результате разгерметизации железнодорожной цистерны с испаряющимися ядовитыми веществами на местности заданной геометрии под воздействием внешнего поля скоростей. Проведены анализ полученных результатов и их сопоставление с известными экспериментальными и теоретическими данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, подстилающая поверхность, численное моделирование, рельеф, термик, ядовитые вещества.

Введение

Эксплуатация сложных технических систем, к которым относится железнодорожный транспорт, происходит в условиях динамического взаимодействия с окружающей средой. Техногенные катастрофы, случающиеся на железнодорожном транспорте, как и природные катастрофы, часто инициируют последовательную цепь взаимосвязанных катастрофических явлений. Такие катастрофы называются синергетическими (от греч. *synergetikos* – согласованно действующие). Поскольку выработка проектного ресурса основных фондов, в том числе и на железнодорожном транспорте, в Российской Федерации приближается к критической величине 50-80%, то опасность синергетических бедствий в РФ, вызванных техногенными катастрофами, неуклонно возрастает [1]. Потери от техногенных аварий и катастроф (взрывы, пожары, разрушения, выбросы радиоактивных и отравляющих веществ, крушения и др.) и природных катаклизмов (землетрясения, ураганы, сели, обвалы, оползни, наводнения и др.) ежегодно возрастают на 10-30%. Суммарная величина ежегодного материального ущерба от природных катастроф в РФ, как показывают экспертные оценки, составляет не менее 22–27 млрд долл. США.

Особенностью моделирования катастроф как природных, так и техногенных является то, что, как правило, механизм явления и исходные данные, используемые для математического моделирования, известны со значительной погрешностью. Поэтому в данной работе используются простые математические модели, которые получаются путем упрощения более точных, но в то же время более сложных математических моделей. Например, для прогноза лесной пожарной опасности в данной работе используется общая математическая модель лесных пожаров [2], которая значительно упрощается с помощью физически содержательных допущений.

Постановка задачи и особенности численного моделирования динамики лесного пожара

Предположим, что в результате аварии произошла разгерметизация железнодорожной цистерны с испаряющимися ядовитыми веществами. Под разгерметизацией будем подразумевать образование трещины или разрыв контейнера. Если в контейнере образовалась трещина, то в результате взаимодействия с окружающей средой внутри контейнера в ядовитом

веществе начинает образовываться каверна, а в окружающую среду попадают газообразные и дисперсные продукты химических реакций, т.е. образуется термик содержащий:

- 1) газообразные компоненты;
- 2) пары воды;
- 3) ядовитые вещества в жидко-капельном состоянии;
- 4) кислород;
- 5) азот;
- 6), 7) два вида дисперсных частицы ядовитого вещества.

Основной силой, влияющей на движение термика, считается подъемная сила. Перемещение термика происходит настолько медленно, что давление внутри термика остается равным давлению окружающей среды P_e и в то же время настолько быстро, что остальные характеристики – температура, плотность – не успевают выравняться с их значениями в окружающей среде. Температура и плотность одинаковы во всех точках термика и меняются только с течением времени, т.е. термик моделируется материальной точкой переменной массы. Коэффициент вовлечения берут обратно пропорциональным радиусу термика, равным $(0.6/R_T)$, где R_T – радиус термика.

Математическая модель данной задачи [1, 2] включает в себя две системы уравнений: для каверны и для термика. Математическая модель для разгерметизации контейнера включает в себя уравнение термохимического разрушения границы раздела сред внутри образовавшейся полости (каверны) после разгерметизации, уравнений выражающих законы сохранения массы отдельных компонентов в дифференциальной форме, уравнение сохранения энергии, уравнение состояния идеального газа, а также алгебраических выражений

$$\rho_s \frac{dr}{dt} = (1-\varphi)R_w + \varphi R_{1w}, \quad r(0) = r_H, \quad (1)$$

$$\frac{dm_j}{dt} = S_6 v_i R_{1w} + I_i S_0 + c_i Q_j + f_i R_w, \quad j=1,2,3, \quad m_i(0) = m_{iH}, \quad i=1, \dots, 6, \quad (2)$$

$$mc_p \frac{dT}{dt} = V \frac{dP}{dt} + Q_j c_p T - I_T S_0 + S_6 q_1 R_{1w} - q_w (1-\varphi)(S - S_0) R_w, \quad T(0) = T_H, \quad (3)$$

$$P = \frac{\rho_\Gamma RT}{M}, \quad (4)$$

$$m = \sum_{\alpha=1}^6 m_\alpha, \quad p_\alpha = P x_\alpha, \quad x_\alpha = \frac{c_{\alpha\Gamma}}{M_\alpha \sum_{\alpha=1}^5 c_{\alpha\Gamma} / M_\alpha}, \quad \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_{\alpha\Gamma}}{M_\alpha}, \quad c_{\alpha\Gamma} = \frac{m_\alpha}{\sum_{i=1}^5 m_i}, \quad \alpha = 1, 2, \dots, 5. \quad (5)$$

Для контроля точности расчетов использовалось для объема каверны интегральное уравнение, а для массы выброса вредных веществ – дифференциальное:

$$V = V_H + \frac{1}{3\rho_s} (6\sqrt{\pi})^{2/3} \int_0^t [(1-\varphi)R_w + \varphi R_{1w}] dt. \quad (6)$$

$$\frac{dm}{dt} = (S - S_0)(1-\varphi)R_w + Q_j, \quad j=1,2,3, \quad m(0)=m_H, \quad (7)$$

здесь ρ_s – плотность кристаллического ядовитого вещества; r – радиус сферической каверны внутри контейнера в любой момент времени; t – время, R_w – массовая скорость гетерогенного процесса, $\text{кг/м}^2\text{с}$; V_w – линейная скорость термохимического и механического разрушения кристаллического вещества; k_s – коэффициент механического диспергирования; Cp_s – удельная теплоемкость кристаллического реагирующего вещества; $m_\alpha = \rho_\alpha V$ – масса химических компонентов внутри каверны; V – объем каверны; $S - S_0$ – площадь внутренней поверхности каверны; S_0 – площадь выходного отверстия каверны; I_α ($\alpha=1, 2, \dots, 6$) – скорость поступления (исчезновения) α – компонента в каверну в результате процессов диффузии; $c_\alpha = \rho_\alpha / \rho$ – массовая концентрация α – компонента в каверне; ρ_α – парциальная плотность α – компонен-

та в каверне; $\rho = \sum_{\alpha=1}^7 m_{\alpha} / V$ – плотность газодисперсной смеси в каверне; $c_{\alpha T}$ – массовая концентрация газов в каверне; $x_{\alpha T}$ – молекулярная концентрация газов; p_{α} – парциальное давление α -компонента в каверне; P – общее давление газов в каверне; M_{α} – моли (граммолекулы газов); M – средневзвешенное значение моля смеси газов в каверне; n_6 и n_7 – число частиц соответствующих веществ; ρ_{06} и ρ_{07} – истинные плотности частиц; S_6 – площадь поверхности всех частиц; S_7 – площадь поверхности всех частиц дисперсированного вещества; I_T – плотность теплового потока на границе, разделяющей газ в каверне с окружающей средой; V_0 – объем каверны в контейнере в начальный момент времени; Q_j – скорости истечения (втекания) газодисперсной смеси из каверны через отверстие в стенке контейнера; d_0 – диаметр отверстия; $P, \rho_{\Gamma} = \sum_{\alpha=1}^5 m_{\alpha} / V$ – давление и плотность смеси газов в каверне; P_e, ρ_e – давление и плотность смеси газов в окружающей среде; $\gamma = c_p / c_v$ – отношение удельных теплоемкостей газа в каверне при постоянном объеме и давлении; H – энтальпия газа в каверне; h_{α} – удельная энтальпия газа в каверне; $\nu_{\alpha} (\alpha = 2, 3, 6)$ – удельные стехиометрические коэффициенты химической реакции; индекс «н» приписывается начальным данным.

Кроме того, считалось, что выполняется равенство $Q_{je} = 0$ при $P = P_e$, где P – давление в каверне, а P_e – внешнее атмосферное давление, а тепло и массообмен с окружающей средой осуществляется только в результате процессов теплопроводности и диффузии.

Если начальное давление в каверне превышает атмосферное P_e , то газ из нее вытекает. Существует режим дозвукового вытекания газа из каверны, для которого имеет место следующее выражение для секундного расхода массы $Q_1 = F_1(\rho, P, P_e), P_e < P < P_{*1}$.

Следует отметить, что при некоторых давлениях P в каверне скорость истечения может стать равной критической скорости звука $a_{3\theta}$, секунднй расход $Q = Q_{*}$ газа сравняется

с критическим значением $Q_{*} = F_1(\rho, a_{*}), a_{3\theta} = a \sqrt{\frac{2}{\gamma + 1}}, \rho_{*} = \rho \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{1}{\gamma - 1}}$, где $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ – отношение теплоемкостей; a, ρ – скорость звука и плотность газа в каверне.

Наряду с режимом дозвукового и звукового истечения, имеет место режим дозвукового втекания газа в каверну со скоростью, в предположении втекании только чистого воздуха $Q_2 = F_2(\rho_e, P, P_e), P_e > P$. Если давление в каверне P значительно меньше P_e , то величина Q_2 может достигнуть своего критического значения. Здесь $\rho_e = 1.4$ – отношение теплоемкостей для воздуха, $a_e = \sqrt{2\gamma RT_e / M_e}$ – плотность и скорость звука в воздухе, окружающем контейнер; M_e – молярная масса воздуха; R – универсальная газовая постоянная.

Опишем подробно модель для распространения в атмосфере образующегося ядовитого облака. Выброс веществ, образующихся в каверне, может носить пульсирующий характер, поэтому в приземном слое атмосферы может быть несколько термик, которые можно объединить в один “эффективный” термик, центр массы которого определяется с использованием координат и масс каждого термика: $\vec{r}_{\text{эф}} = \frac{\sum m_e^{(i)} \vec{r}_i}{M_{\text{эф}}}, M_{\text{эф}} = \sum_{i=1}^{N_T} m_e^{(i)}$, где $\vec{r}_i, m_e^{(i)}$ – радиус-вектор центра масс и масса i -го термика; $\vec{r}_{\text{эф}}, M_{\text{эф}}$ – радиус-вектор центра масс и масса суммарного («эффективного») термика).

Уравнения сохранения массы газообразных веществ имеют вид

$$\frac{dm_{ie}}{dt} = \alpha_{Bi} |v| m_{ie} - I_i S_0 - c_i Q_j - \nu_i S_{6e} R_{1w}, m_i(0) = m_{ie}, i = 1, 6.$$

где $I_i S_0 + c_i Q_j$ – массовые скорости выброса соответствующих веществ в атмосферу из контейнера в результате конвекции и диффузии; v_i – стехиометрические коэффициенты; R_{1w} – массовая скорость реакции гидролиза в термике; S_{6e} – суммарная поверхность частиц, на которых имеет место реакция; αB – коэффициент вовлечения воздуха в термик; $I_i S_0 + c_i Q_j$ – массовая скорость выброса веществ из каверны; $|v|$ – модуль скорости движения термика в атмосфере; α_B – коэффициент вовлечения газообразных веществ в термик; h_n – высота расположения отверстия, через которое происходит выброс вредных веществ в атмосферу; z – вертикальная координата центра масс термика; $v_{z6} = \frac{18g\mu}{\rho_6^{(0)}d_6}$ – вертикальная скорость оседания (седментации) частиц по Стоксу; g – ускорение силы тяжести; d_6 – диаметр частиц; $\rho_6^{(0)}$ – истинная плотность частиц.

Будем использовать уравнение для общей массы всех компонентов двухфазного термика. Помимо m_α , необходимо определить выражения для текущего $V_I(t)$ и начального V_{1n} объемов. Для малых значений времени предполагается, что термик имеет форму шара, объем которого определяется по формулам

$$V_1 = \frac{4}{3}\pi r^3, r(t) = \left(\frac{3m_e}{4\pi\rho_e}\right)^{1/3}, V_1 = \frac{m_e}{\rho_e},$$

где $r(t)$ – радиус шара-термика; ρ – плотность газа и дисперсных частиц в термике.

Для определения плотности газодисперсной смеси ρ целесообразно использовать уравнение состояния по формуле Клапейрона-Менделеева и принцип аддитивности:

$$\rho_\Gamma = \frac{P_e M}{RT_1}, \frac{1}{M} = \sum_{\alpha=1}^5 \frac{c_{\alpha\Gamma}}{M_\alpha}, c_\alpha = \frac{m_\alpha}{m_\Gamma}, \rho_e = \rho_{\Gamma e} + \rho_{6e},$$

где M – молекулярная масса смеси газов; $c_{\alpha\Gamma}$ – массовая концентрация каждого компонента газовой фазы; R – универсальная газовая постоянная, $\rho_6 = \frac{m_6}{V_1}$ – плотность дисперсных частиц в облаке; $P = P_e(z)$ – атмосферное давление, которое считается известным из метеоданных.

Закон сохранения энергии

$$C_p \frac{dT_1}{dt} = \frac{1}{m_e} \left[q_1 S_{6e} R_{1w} - C_{pe} (T - T_1) S_0 Q + C_p (T_e - T_1) \frac{dm_e}{dt} \right] - g v_z \frac{T_1}{T_e}, T_1(0) = T_{1n}.$$

где v_z – проекция скорости движения центра масс термика на ось z ,

$C_{pe} = \sum_{\alpha=1}^N C_{p\alpha} c_{\alpha e}, c_{\alpha e} = \frac{m_{\alpha e}}{m}$ – массовая концентрация α – компонента в термике; S_{6e} – общая поверхность частиц; T_{1n} – начальная температура термика.

В последнем уравнении первый член в квадратной скобке представляет приток тепловой энергии вследствие экзотермической гетерогенной реакции на частицах, второй – характеризует приток энергии из каверны, наконец, последний член в квадратной скобке характеризует приток (отток) энергии вследствие разбавления вещества термика при его растворении в окружающей среде.

Результаты численного моделирования динамики облака ядовитых веществ и их анализ

Следует отметить, что данная система уравнений решалась с использованием модификации метода Кранка-Николсона. В данной работе представлены расчеты для одного из типов веществ, однако методика и разработанный программный продукт позволяют делать расчеты и для других химических веществ при условии, что известны скорости химических реакций.

Рассмотрим результаты расчетов при начальном давлении в каверне, совпадающим с давлением окружающей среды. В этом случае нет перетока массы из каверны в атмосферу, обусловленного движением газа, но тепло- и массообмен, благодаря теплопроводности и диффузии, компонентов имеет место. Начальные значения масс компонентов в первой серии расчетов, начального радиуса каверны r_n и радиуса отверстия в каверне a не варьировались и использовались следующие величины: $m_{1н}= 0$ кг, $m_{2н}=0.02 V_{Нрe}$ кг, $m_{3н}= 0$ кг, $m_{4н}= 0.23 V_{Нрe}$ кг, $m_{5н}= 0.75 V_{Нрe}$ кг, $m_{6н}=0$, $\rho_e =1,29$ кг/м³, $rH=0.05$ м, $a=0.02$ м, $V_H = \frac{4}{3}\pi r_H^3 - \frac{\pi}{3}r_H^2(1-\cos\alpha)^2(3r_H - r_H(1-\cos\alpha))$, $\alpha = \arcsin\left(\frac{a}{r_H}\right)$.

Предполагаем, что начальная температура в каверне также совпадала с температурой окружающей среды T_e , которая принимала следующее значение: $T_e=209^\circ\text{K}$, $T_e=309^\circ\text{K}$ и $T_e=800^\circ\text{K}$.

Из анализа кривых (рис. 1) следует, что установление температуры происходит как для зимних погодных условий ($T_e= -218^\circ\text{K}$, т.е. -55°C), так и для летних погодных условий ($T_e=318^\circ\text{K}$), а также в условиях пожара, когда в окружающей среде температура достигает 800°K . Время установления составляет несколько миллисекунд, причем с ростом T_e время установления растет. Малость значений этой величины объясняется ограниченностью выражения для скорости химической реакции и свойствами рассматриваемого химического вещества. Величина R_{1w} не зависит от температуры и поэтому описывает только диффузионный режим гетерогенной реакции. Любопытным является тот факт, что в условиях пожара температура внутри каверны растет, что может быть объяснено притоком тепла от реакции. Результаты расчетов показали, что приток тепла в результате реакций может спровоцировать повторное загрязнение в результате взрыва.

Из рис. 2 видно, что при температуре окружающей среды 800 К кривая для m_2 практически сливается с осью ординат, и в итоге величины m_2 и m_3 принимают стационарные значения, причем значение m_3 малы, что обусловливается малостью начальной массы паров воды в каверне. На рис. 3 и рис. 4 даны графики $m_4(t)$, $m_5(t)$ для различных температур.

Расчеты показали, что при пожаре может иметь место бурный рост массы газообразного ядовитого вещества, что обусловлено взрывным характером рассматриваемого процесса.

Представляют интерес результаты расчетов движения облака, образовавшегося при выбросе газообразных и дисперсных продуктов химических реакций. При расчете скорость ветра в атмосфере полагалось $z_0=0.1$ м; $v_1=2$ м/с (кривые 1) и $v_1=3.2$ м/с (кривые 2), что соответствует всем рисункам данного подраздела.

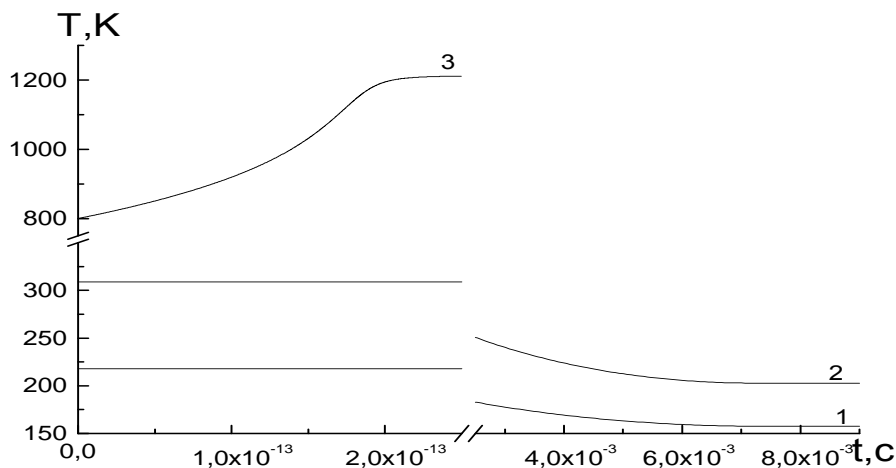


Рис. 1. Изменение температуры в каверне от температуры окружающей среды: кривая 1 соответствует температуре окружающей среды 218K ; 2 - при температуре окружающей среды 309K ; 3 - при температуре окружающей среды 800K

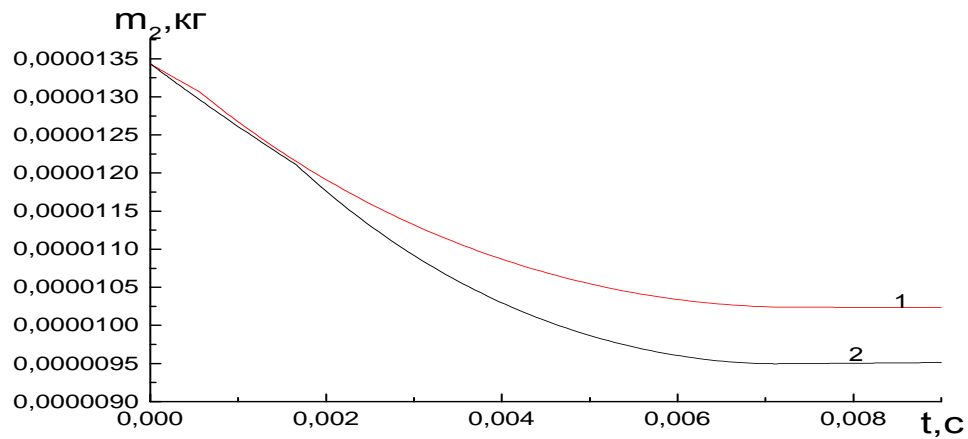


Рис. 2. Изменение массы паров воды в каверне при различных значениях окружающей среды:
 1 - при температуре 218 К; 2 - при температуре 309 К

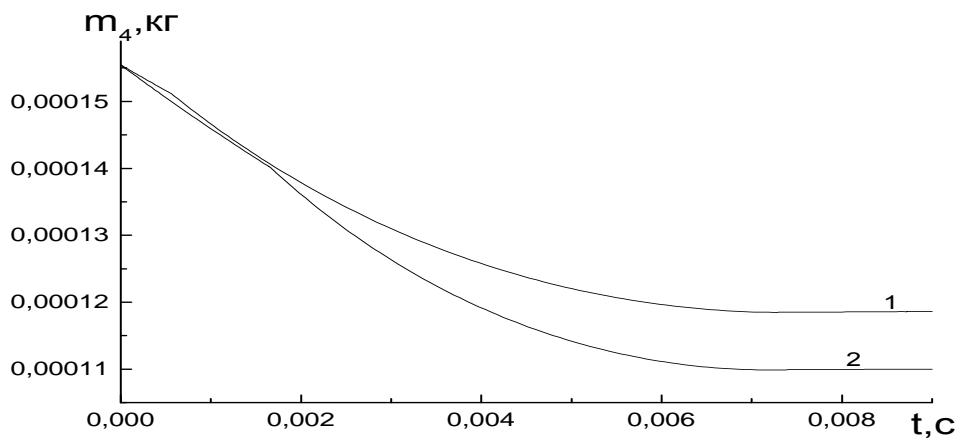


Рис. 3. Изменение массы кислорода в каверне при различных значениях окружающей среды:
 1 - при температуре 218 К; 2 - при температуре 309 К

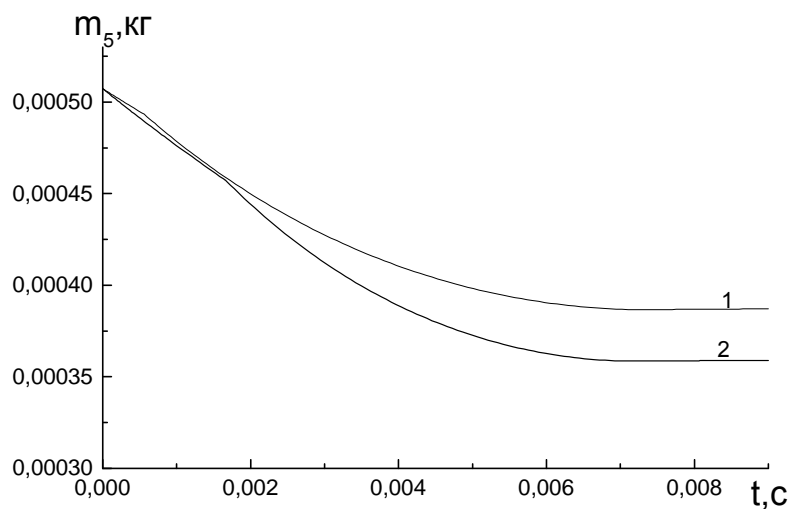


Рис. 4. Изменение массы азота в каверне при различных значениях окружающей среды:
 1 - при температуре 218 К; 2 - при температуре 309 К

Использовались следующие значения параметров, определяющих решение задачи: $r_0=0.05$ м, радиус отверстия в каверне $a=0.02$ м, $P_e=101360$ Па, $q_{1w}=599,4 \cdot 10^3$ Дж/кг, $q_{1w}=15,179 \cdot 10$ Дж/кг, $\mu_e=17,3$ кг/м·с, $\varphi=0.01$, $\theta=350$, $\Omega=1.157 \cdot 10^{-5}$ с⁻¹, высота расположения отверстия из каверны $h^*=1,65$ м.

Рис. 5 общая (суммарная) масса термика в зависимости от времени: при ($v_1=2$ м/с (кривая 1) и при ($v_1=3.2$ м/с (кривая 2). Видно, что общая масса термика растет с ростом времени вследствие вовлечения в термик компонентов воздуха. Однако значения скорости ветра практически не влияют на изменение массы термика, что согласуется с априорными физическими соображениями.

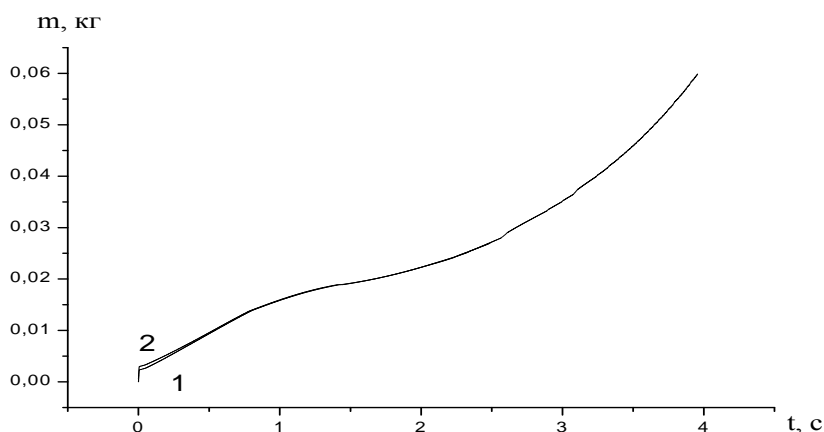


Рис. 5. Изменение суммарной масса термика в зависимости от времени:

1 – $v_1=2$ м/с; 2 – $v_1=3.2$ м/с

Таким образом, знание траектории полета позволяет определить территорию, зараженную вредными веществами после аварии. Проектируя траекторию полета термика на эту поверхность земли и, учитывая текущий радиус облака вредных веществ, найдем площадь зоны заражения вредными веществами в любой момент времени.

Следует отметить, что в данной работе рассматривались вещества с большой плотностью, сосредоточенные в термике, именно этот факт определял малость высоты его подъема и характеризовал параметры его полета.

Таким образом, было получено, что термик, скорее, течет вблизи подстилающей поверхности, чем летит. Эта особенность полета облака рассматриваемых вредных веществ усиливает негативные экологические последствия, возникающие при разгерметизации контейнеров с такими ядовитыми веществами.

Библиографический список

1. Новая парадигма развития России (комплексные проблемы исследования проблем устойчивого развития) / под ред. В.А. Коптюга, В.М.Матросова, В.К.Левашова. – М.: «Академия», Иркутск: РИЦ ГП «Облформпечать», 2000.
2. Катаева, Л.Ю. Исследование влияния окружающей среды и слоя инверсии на параметры движения односкоростного, однотемпературного и однофазного термика / Л.Ю. Катаева, Е.М. Алексеев // Сопряженные задачи механики и экологии: сб. избранные доклады международной конференции. – Томск, 2000. С. 175-189.
3. Гришин, А.М. Отчет о НИР по х/д №306/1 / А.М. Гришин [и др.] // Математическое моделирование негативных экологических последствий аварий при хранении отвалного гексафторида урана на открытой площадке СХК. Кн.1. Номер госрегистрации У82674. Томск. 1999.

4. **Гришин, А.М.** Отчет о НИР по х/д №306/1 / А.М. Гришин [и др.] // Математическое моделирование негативных экологических последствий аварий при хранении отвального гексафторида урана на открытой площадке СХК. Кн. 2. Номер госрегистрации У82674. Томск. 1999.
5. **Холл, Дж.** Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений / Дж. Холл, Дж. Уайт. – М.: Мир, 1979.
6. **Катаева, Л.Ю.** О прогнозе безопасных расстояний от фронта лесного пожара // Пожары в лесу и на объектах лесохимического комплекса: возникновение, тушение и экологические последствия: мат. международной конференции. – Томск: ТГУ, 1999. С. 78-84.
7. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование распространения вредных примесей в атмосфере при разгерметизации контейнеров с гексафторидом урана / А.М. Гришин [и др.] // Сопряженные задачи механики и экологии: сб. тезисов международной конференции. Томск, 2000. С. 85-87.
8. **Гришин, А.М.** Исследование процесса образования и распространения выброса вредных веществ в атмосфере при разгерметизации контейнеров / А.М. Гришин [и др.] // Четвертый Сибирский конгресс по прикладной и индустриальной математике. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 2000.

*Дата поступления
в редакцию 15.05.2013*

L.Yu. Kataeva, S.A. Tarnaeva, I.V.Kolchik

FEATURES OF RADIATION OF FOREST FIRES

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

Purpose: Numerical modeling of the dynamics buoyant thermal formed as a result of leaks from the rail tank evaporating toxic substances in the terrain given geometry under external velocity field. The analysis of the results and their comparison with known experimental and theoretical data.

Design/methodology/approach: The approach based on numeric solution of equations of motion of a reactive body of variable mass.

Findings: High density substances contained in a buoyant thermal cause it to flow over the surface of the ground

Research limitations/implications: Given calculations are relevant for buoyant thermal containing heavy particulates.

Originality/value : Developed a method evaluation of pollution as a result of leaks on the basis of solving this problem.

Key words: underlying surface, numerical modeling, terrain, thermals, toxic substances.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.3.01:681.327.1

Е.В. Бритвина¹, В.В. Крылов¹, Ю.А. Мальков²

АЛГОРИТМ МАКСИМИЗАЦИИ РЕЛЕВАНТНОСТИ, ИСПОЛЬЗУЮЩИЙ ГРАФОВЫЕ МОДЕЛИ ДАННЫХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Институт прикладной физики РАН²

Предлагается алгоритм поиска максимально релевантного элемента из конечного множества ответов по заданному конечному множеству запросов и заданной функции релевантности, имеющий существенно низкую вычислительную сложность, чем полный перебор. Для этого используется предварительное формирование на множестве ответов координатной системы, индуцированной функцией релевантности, и после на этой основе графа метризованного тесного мира. Проведенное численное моделирование подтвердило предложенный эвристический алгоритм. Целевым приложением метода является таргетирование рекламных сообщений в телекоммуникационных системах с установлением соединения.

Ключевые слова: релевантность, поиск информации, дискретная оптимизация графовая модель данных, графы тесного мира.

Введение

Термин “релевантность” имеет много определений и в общем смысле наиболее близок по значению к термину “адекватность” [1]. Для информационных систем релевантность обычно связывается с семантическим соответствием поисковых запросов и найденных документов. В задачах управления релевантность характеризует меру соответствия управляющих сигналов целям управления. [2]. Проблема максимизации релевантности возникает в значительном числе задач проектирования компьютерных систем обработки информации.

В настоящей работе мы рассматриваем задачу максимизации релевантности с позиций дискретной оптимизации [3] и полагаем, что все семантические аспекты отражены в способе вычисления функционала, значение которого и отождествляется с оценкой релевантности. При такой постановке задачи ее решение становится пригодным для использования при проектировании широкого круга систем, где требуется найти наилучшее реагирование на каждый из входных наборов данных без учета их темпоральной компоненты.

Основной целевой задачей, которая привела к разработке изложенного далее алгоритма, явилась задача гладкого встраивания в процесс установления соединения в мультимедийных телекоммуникационных системах дополнительных информационных сообщений [4], специфицированных для каждого из вызывающих абонентов.

Процедура выбора сообщений в соответствии с профилем каждого из абонентов рассматривается как задача выбора релевантного мультимедиа-сообщения из доступной базы данных таких сообщений. Наличие значительного числа обслуживаемых абонентов и малый интервал времени, доступный для встраивания сообщения, требуют чрезвычайно производительных алгоритмов максимизации релевантности с неограниченными возможностями масштабирования. Эти требования существенно ограничивают возможность применения известных алгоритмов и вызвали необходимость новой разработки.

Постановка задачи

Пусть задано два конечных множества:

- $X = \{x_i\}_{i=1}^N$, имеющее семантический смысл запросов некоторой предметной области;
- $Y = \{y_j\}_{j=1}^M$, имеющее семантический смысл ответов на запросы в этой же предметной области.

Определено отношение $X \circledast Y$ называемое отношением релевантности, такое, что каждому элементу из множества запросов соответствует подмножество так называемых релевантных ответов из множества

$$\forall x_i \in X \Rightarrow Y_i \subseteq Y.$$

Отношение может быть задано некоторой матрицей из N строк, соответствующих всем возможным запросам, и M столбцов, соответствующих всем возможным ответам.

$$\begin{matrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2M} \\ r_{31} & r_{32} & \dots & r_{3M}. \end{matrix}$$

Если значения элементов матрицы релевантности равны либо 0 либо 1, то речь идет о том, что задано булева релевантность, то есть для любой пары запрос-ответ о их релевантности можно утверждать только «да» или «нет».

Более сложный случай определяется возможностью оценивать уровень релевантности. В этом случае можно ввести функцию релевантности rel :

$$X \times Y \rightarrow [0,1]: 0 \leq rel(x_i, y_j) \leq 1.$$

Эта функция аналогична используемой обычно функции “похожести” – similarity, используемой в тех случаях, когда запрос и ответ рассматриваются как элементы одного и того же множества. В таких случаях можно считать это множество наделенным структурой метрического пространства или близкого к такому. Для решения задач поиска в метрических пространствах создан целый ряд мощных инструментов, основанных на различных математических свойствах таких пространств. [5]. Целью данной статьи является решение задачи поиска для случая, когда множества запросов и ответов затруднительно представить элементами одного и того же метрического пространства.

Однако введение матрицы релевантности делает постановку задачи весьма близкой, поскольку позволяет абстрагироваться от природы строк и столбцов этой матрицы и рассматривать ее как матрицу некоторой метрической природы.

Заметим сразу, что для этой матрицы не выполняются многие свойства, характерные для метрических матриц (или матриц похожести), например матрица неквадратная, диагональные элементы необязательно равны нулю (единице, как для матриц похожести).

Тем не менее, решение задачи поиска может быть сведено к отысканию для каждой строки максимальных элементов, и тем самым идентификации номеров тех столбцов, соответствующие которым ответы наилучшим образом соответствуют запросу, относящемуся к данной строке.

Здесь может быть предложен очевидный алгоритм сортировки элементов для каждой строки с сохранением идентификатора столбца. Такой алгоритм может быть применен, если мощность множеств N и M не очень велика. Однако на практике, число возможных запросов и ответов оказывается весьма значительным.

Известно, что вычислительная сложность устойчивой сортировки массива из M чисел оценивается как $O(M^2)$ для большинства алгоритмов или в лучшем случае как $O(M \log M)$ [6].

Для каждого запроса потребуется исполнить алгоритм с сложностью, равной произведению сложности алгоритма сортировки на сложность алгоритма вычисления значения функции релевантности для всех вариантов ответа. Если обозначить сложность вычисления

значения функции релевантности μ , то оценка общей сложности может быть дана следующим образом:

$$C_i = \mu \cdot M \cdot O(M \log M) = \mu O(M^2 \log M).$$

Дополнительной сложностью для реализации практически интересного алгоритма является необходимость поддержки динамического пополнения множеств ответов и запросов. В этом случае результаты предыдущей сортировки не смогут быть использованы для последующих идентичных запросов, что не позволит кэшировать результаты.

В этом случае требуется построение другого эффективного алгоритма. Для снижения вычислительной сложности можно также ограничиться нахождением только одного элемента с максимальным значением функции релевантности. В этом случае нет необходимости упорядочения всех возможных ответов, а искать только один. В этом случае задача переходит в категорию задач дискретной оптимизации. Сведем задачу максимизации релевантности к задаче дискретного программирования. Иногда вместо задачи на максимум выгоднее рассматривать задачу минимизации. С этой целью будем рассматривать вместо функции релевантности связанную с ней функцию расстояния релевантности:

$$d: X \rightarrow R; d(x_i, y_j) = -\ln(\text{rel}(x_i, y_j))$$

$$d(x, y): X \times Y \rightarrow [0, \infty)$$

Задача: найти алгоритм отыскания максимально релевантной точки

$$y_* \in Y; d(x_*, y_*) = \min_{y \in Y} d(x_*, y)$$

В изложенной постановке задача относится к классу трудноразрешимых задач дискретной оптимизации [3]. Точные методы для высокоразмерных задач в этом случае приводят к недопустимо большому числу вычислений, поэтому далее обсуждаются эвристические приближенные алгоритмы.

Решение задачи релевантности методом локальной дискретной оптимизации со случайным поиском на графах

Основной идеей этого раздела является попытка свести задачу на поиск релевантного ответа из Y на запрос из X при известной функции релевантности $\text{rel}(\cdot, \cdot)$ к нескольким задачам локального поиска на множестве Y . В основу метода положим оснащение этого множества графом со специальными свойствами, известными как MSW (MetriZedSmallWorld) для поиска локального минимума [7].

Классический подход применения метода локальной оптимизации сводится к наделению множества Y любой произвольной метрикой, назначением начальной точки и радиуса окрестности локального поиска. Алгоритм поиска минимума в этом случае сводится к поиску локального минимума в выбранной окрестности и перехода к новой начальной точке, в качестве которой назначается найденная на предыдущем локальном шаге точка минимума.

Как показано в [8,9], если на дискретном множестве существует функция расстояния, то на нем может быть построен граф, обладающий свойствами тесного мира (MSW граф). То есть расстояние между любыми вершинами такого графа в среднем оценивается логарифмической величиной от размера графа, числа его вершин. При этом существует простой алгоритм жадного поиска, приводящий в среднем за логарифмическое число шагов к отысканию ближайших соседей для любого вновь выбранного элемента y_0 из множества (поглощающего)

$$\bar{Y} \supset Y,$$

наделенного той же функцией расстояния. Выбрав произвольно начальную точку из Y , можно найти в Y ближайших соседей для y_0 , совершив логарифмически связанное с размером Y число локальных поисков.

Сведем задачу поиска элемента из множества ответов Y релевантного заданному запросу из X к задаче поиска на MSW графе.

Пусть заданы элемент и MSW граф $x_* \in X$ на Y . Задана также вычислимая функция расстояния релевантности между X и Y :

$$d(x, y): X \times Y \rightarrow [0, \infty)$$

Задача: найти алгоритм отыскания максимально релевантной точки

$$y_* \in Y; d(x_*, y_*) = \min_{y \in Y} d(x_*, y).$$

Основная идея алгоритма может быть представлена следующим образом. Сначала назначим случайным образом точку y_0 в Y – одну из вершин графа MSW, построенного на Y .

Найдем расстояние релевантности между этой точкой и x_* .

$$d(x_*, y_0) = d_0$$

Рассмотрим все вершины графа, являющиеся соседями y_0 , и найдем расстояния релевантности до них. Выберем ту вершину, расстояние релевантности до которой от x_* минимально. Сравним это расстояние с значением d_0 : если найденное расстояние меньше, то выбираем новую соответствующую ему вершину за новую начальную точку поиска и повторяем поиск максимально релевантной точки среди ее соседей, если нет, то выбираем точку y_0 в качестве решения задачи – возвращаем как максимально релевантную запросу x_* в данном цикле поиска. После этого выбирается другая случайная точка y_0 в Y , и процесс поиска повторяется. Число случайных поисков может быть выбрано заранее или определяться адаптивно в зависимости от разброса найденных. Среди всех найденных точек локального минимума выбираются те, которые имели минимальное расстояние релевантности, и это подмножество объявляется решением. В большинстве случаев такое подмножество состоит из единственного элемента и в этом случае найденное решение строго соответствует поставленной задаче.

Запишем алгоритм формально в виде программного псевдокода:

Greedy_Search(q: object, y_{enter_point}: object)

```

1 ycurr ← yenter_point;
2 dmin ← d(x, ycurr); vnext ← NIL;
3 foreach yfriend ∈ ycurr.getFriends() do
4 if dfr ← d(x, yfriend) < dmin then
5   dmin ← dfr;
6   ynext ← yfriend;
7 if ynext = NIL then return ycurr;
8 else return Greedy_Search(x, ynext);
```

В приведенном подходе остается неизвестным и принципиально важным вопрос о построении MSW-графа на множестве Y . Очевидно, что поскольку на этом множестве не задана функция метрики, то мы можем назначить ее произвольно. Но также очевидно, что от ее выбора будет сильно зависеть эффективность работы алгоритма. Мы предлагаем здесь выбрать в качестве функции метрики некоторую функцию внутреннего расстояния на Y , индуцированного расстоянием релевантности.

Построение функции внутреннего расстояния, индуцированного расстоянием релевантности

Основная идея подхода состоит в том, что в множестве X некоторым образом выбирается подмножество из M “представительных” элементов, далее называемый базисом в X . Обозначим это подмножество

$$X_B = \{x_{B1}, x_{B2}, \dots, x_{BM}\}$$

определим для каждой точки из Y расстояния релевантности

$$y_k \in Y, d(y_k, x_{Bi}) = d_{ki}, \forall i = 1, M$$

Назовем полученный для каждого k набор чисел координатами элемента y_i в системе координат X_B . Таким образом, на множестве Y индуцируется координатная сетка размерности M . Теперь определим функцию внутреннего расстояния на Y с помощью этой координатной системы, задавая ее значения следующим образом

$$d_y(y_i, y_j) = \sqrt{\sum_{k=1}^M (d_{ik} - d_{jk})^2}$$

Такая функция удовлетворяет всем основным аксиомам расстояния, поскольку дает нулевое значение для совпадающих точек в Y и положительна для несовпадающих. Мы не будем давать здесь анализ выполнения неравенства треугольника для индуцированной функции расстояния, поскольку это не является существенным для дальнейшего, однако заметим, что при правильном выборе множества X_B введенная функция расстояния удовлетворит всем аксиомам метрики.

Именно введенная таким образом индуцированная исходным отношением релевантности функция расстояния будет использоваться для построения необходимого для эффективного поиска решений графа MSW. На рис. 1 приведена иллюстрация построения координатного пространства и графа на нем.

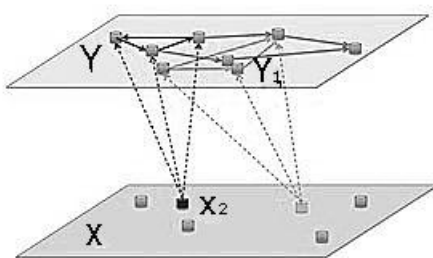


Рис. 1. Построение координатного пространства на Y

Обсудим теперь выбор множества X_B . Очевидно, что с вычислительной точки зрения следует выбирать базис в X минимально возможной мощности. Однако, если число элементов базиса мало, то индуцированная им координатная сетка на Y будет плохо различать элементы, в том смысле, что координаты всех их окажутся весьма близкими и порождаемая топология на Y окажется весьма слабой для построения качественных решений с помощью графа MSW. Число соседей в графе окажется значительным, что приведет к катастрофическому росту вычислительных затрат из-за трудностей нахождения глобального экстремума. В силу весьма слабых предположений о структуре множеств X и Y , а также матрицы релевантности, нахождение регулярных методов выбора базиса представляется маловероятным.

Предлагаемый подход основывается на теоретико-системном предположении, что оптимальный базис должен обеспечивать достаточный уровень “разнообразия” координат элементов Y , который может быть измерен с помощью значения энтропии системы точек, соответствующих этим элементам в индуцированном координатном пространстве. Выбор базиса тогда может осуществляться итеративным образом, начиная с случайного выбора X_B при достаточно малом размере M , вычисления координат для всех элементов Y и оценки энтропии полученной системы точек. Далее базис X_B расширяется, увеличивается значение M , вычисляется энтропия системы точек в новом базисе и сравнивается с предыдущим значением. Правило остановки может быть сформулировано как достижение точки с малым приращением энтропии, подобно тому, как это делают в задачах на адаптацию по минимуму оценки

ошибки. Вычисление энтропии для множества Y с индуцированным внутренним расстоянием производится по формуле

$$H_B(Y) = - \sum p_i \log p_i$$

где вероятности оцениваются относительным числом точек из Y , попадающих в общую окрестность для каждой из них. Для этого вычисления используется любая из известных программ расчета энтропии системы M -мерных векторов, например [10].

Приведенная процедура выбора базиса X_B является весьма громоздкой, хотя и позволяет найти достаточно хорошую систему координат в Y . На практике оказывается возможным получать неплохие результаты при просто случайном выборе M элементов из X , где M следует выбирать большим или равным внутренней размерности X . Далее проиллюстрируем методику выбора базиса и результаты построения MSW-графа на Y на примере.

Пример построения системы релевантного выбора на основе предложенного алгоритма

В качестве задачи релевантного выбора рассмотрим подбор релевантного аудиофайла по параметрам исходящего вызова для использования в системе подобной предложенной авторами в патенте [4]. В упрощенной постановке рассмотрим множество X как набор двоичных векторов длиной 11, каждый бит которого определяет наличие в исходящем звонке одного из 11 признаков – так называемый фингерпринт вызова.

Таким образом, множество запросов содержит потенциально 2^{11} различающихся элементов. Для обозначения каждого из них можно использовать их нумерацию, т.е. идентифицировать целым числом от 1 до 2048. Пусть для воспроизведения имеется 1024 аудиофайлов образующих множество Y , каждый из которых мы будем обозначать просто целым числом от 1 до 1024 или представлять 10-мерным двоичным вектором. Для нахождения значения функции расстояния релевантности между элементами множеств X и Y будем использовать тестовую функцию

$$d(x_k, y_n) = |k^2 - 2kn + n^2 - 146k - 146n + 5328|$$

Отметим, что для такой функции существует набор целых значений k и n , для которых расстояние обращается в нуль, и этот факт будет использован при тестировании алгоритма.

$$\begin{aligned} k &= 73t^2 + 145t + 72 \\ n &= 73t^2 - t; t = 0, 1, 2, \dots \end{aligned}$$

На рис. 2 показан типичный фрагмент графика такой функции расстояния в непрерывных координатах.

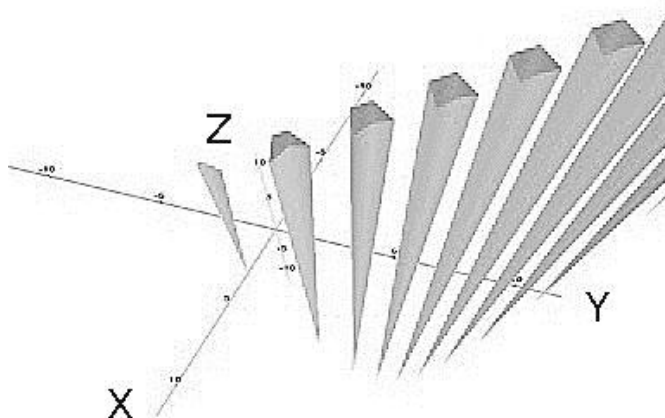


Рис. 2. График функции расстояния релевантности в непрерывных координатах
Выберем из множества X базис

$$x_{Bi} = 2^i; i = 0, 1, 2$$

Найдем координаты точек из Y по этому трехмерному базису

$$y_n^i = |2^{2i} - 2^{i+1}n + n^2 - 146 \cdot 2^i - 146n + 5328| \quad i = 1, \dots, 12; n = 1, \dots, 1024$$

Например, для первой получаем

$$y_1 = (5036, 4891, 4607).$$

Располагая координатами точек в Y можно построить MSW-граф. Фрагмент этого графа изображен на рис. 3.

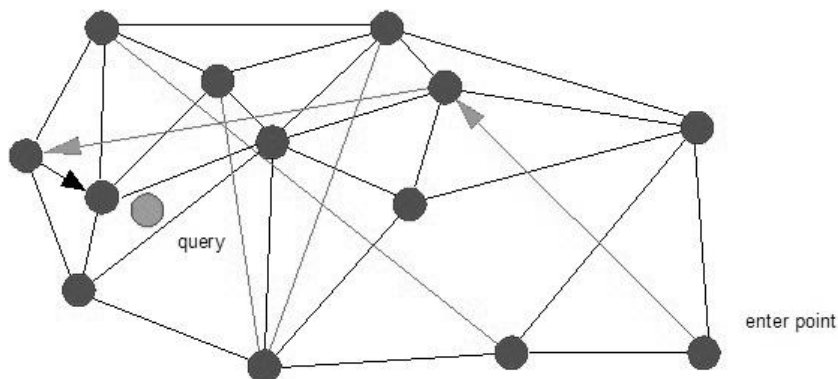


Рис. 3. Фрагмент MSW графа для примера

С помощью программы Metrized Small World Prototype (<http://www.meralabs.com/en/downloads/>) было произведено нахождение максимально релевантных точек в Y для нескольких заданных запросов из X . Напомним, что для такого поиска потребовалось количество вычислений функции расстояния существенно меньше размера Y . При этом часть запросов была взята с заведомо единичной релевантностью. В табл. 1 приведены результаты экспериментов.

Таблица 1

Нахождение максимально релевантных точек в Y для нескольких заданных запросов из X

#X	10	122	290	402	654	1164	1820
#Y1	137	6	654	818	290	654	1022
#Y2	138	7	653	817	291	655	1022
#Y3	136	5	655	819	289	653	1021
#Y4	139	8	652	822	292	656	1020
$d(x, y1)$	5	96	0	264	0	0	227200
$d(x, y2)$	104	281	581	421	873	1165	227200
$d(x, y3)$	112	475	583	951	875	1167	228943
$d(x, y4)$	215	656	1160	3024	1744	2328	230688

Как следует из анализа табл. 1, алгоритм находит четыре кандидата на роль максимально релевантного ответа, среди которых всегда находится точное значение, обеспечивающее нулевое значение функции расстояния релевантности, если такой ответ существует. Как видно, при достижении последнего элемента из множества ответов значения расстояния перестают меняться, и для всех остальных запросов при заданной функции расстояния максимально релевантным считается последний по счету ответ.

Для сравнения полностью аналогичный эксперимент был проведен для иного выбора базиса. Если взять в качестве базиса единственную точку с номером 1, т.е. формировать одномерное пространство Y , то результаты будут выглядеть следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Нахождение максимально релевантных точек в Y для запросов из X .

#X	10	122	290	402	654	1164
#Y1	149	6	654	818	290	654
#Y2	150	7	653	817	291	655
#Y3	151	5	655	819	289	653
#Y4	152	8	652	822	292	656
d(x,y1)	1435	96	0	264	0	0
d(x,y2)	1568	281	581	421	873	1165
d(x,y3)	1703	475	583	951	875	1167
d(x,y4)	1840	656	1160	3024	1744	2326

Некоторые ответы при таком примитивном выборе базиса находятся хуже, однако все опорные решения, для которых значение функции расстояния равно нулю оказываются определенными верно. На этом примере было проведено несколько подобных вычислительных экспериментов. В экспериментах изучалось влияние выбора базиса и его размерности на полноту найденных решений. Обнаружилось, что случайный выбор элементов из X всегда дает лучшие результаты, чем регулярный. Для данного примера существенное увеличение размерности слабо влияет на результат, что свидетельствует о низкой внутренней размерности задачи (близкой к единице).

Выводы

В работе представлен весьма эффективный метод поиска максимально релевантных элементов для произвольных метрических отношений между парой конечных множеств, что представляет актуальную задачу для многих приложений, связанных, например, с рекомендациями и рекламным таргетированием. Основной идеей метода является выделение в множестве запросов некоторого базисного подмножества и наделение множества ответов координатной системой, которая строится путем ассоциации расстояний релевантности до каждого из элементов базиса с проекциями точек из множества ответов.

Далее полученное координатное пространство рассматривается как евклидово и на нем строится граф метризованного тесного мира. С помощью этого графа удастся сократить вычислительную сложность поиска релевантного элемента в Y в пределе до логарифмической (при большом размере Y).

Проведенные численные эксперименты подтвердили эффективность предложенного в статье эвристического метода. С точки зрения теории дискретной оптимизации в работе удалось построить эффективный метод оснащения множества поиска топологией (системой окрестностей для каждой точки) для решения задачи нахождения элемента, минимизирующего заданную двухместную функцию. В качестве направления будущей работы представляет интерес получить более строгое обоснование для выбора базисного подмножества в X , используя алгебраическую структуру матрицы расстояний релевантности, поскольку ее столбцы являются координатами каждого из элементов Y .

Библиографический список

1. **Передерий, В.И.** Математические модели и алгоритмы принятия релевантных решений / В.И. Передерий, А.П. Еременко. 2008. №2(22).
2. **Ковалев, М.М.** Дискретная оптимизация. Целочисленное программирование / М.М. Ковалев. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 192 с.
3. Пат. на изобретение RU 2461879 - Способ доставки целевой рекламы и/или информации абоненту посредством инфокоммуникативных сетей и система для его осуществления / Пономарев, Д.М., Крылов В.В., Бритвина Е.В.

4. **Pavel Zezula**, Similarity Search: The Metric Space Approach, 2005, New York, NY 10013,USA: Springer. – 220 pp.
5. **Savage, J.E.**, Models of Computation. Exploring the Power of Computing Addison-Pub., 1998. – 672 pp.
6. **Krylov, V.V.**, Logvinov A.A., Ponomarenko A.A., Ponomarev D.M. „Single-attribute Distributed Metrized Small World Data Structure, IEEE, 2009 Eighth IEEE/ACIS International Conference on Computer and Information Science / 1-3 june 2009/ Shanghai, China.
7. **Krylov, V.V.**, Logvinov A.A., Ponomarenko A.A. Malkov Y.A., Metrized Small World Approach for Nearest Neighbor Search SYRCoSE, 12-13, Ekaterinburg, May, 2011.
8. **Krylov, V.V.**, Logvinov A.A., Ponomarenko A.A. Malkov, Scalable Distributed Algorithm for Approximate Nearest Neighbor Search Problem in High Dimensional General Metric Spaces, Similarity Search and Applications, 5th International Conference, SISAP-2012, Toronto, ON, Canada, August, 2012, Proceedings.
9. **Y. Hu**, Y. Wang, D. Li, S. Havlin, and Z. Di, Physical Review Letters, Possible Origin of Efficient Navigation in Small Worlds, 106, 108701 (2011).

*Дата поступления
в редакцию 06.052013*

E.V. Britvina¹, V.V. Krylov¹, U.A. Malkov²

RELEVANCE MAXIMIZING ALGORITHM BASED ON GRAPH DATA MODEL

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences²

The article describes an algorithm for finding the most relevant element in a finite set of answers. The search is performed on a finite set of queries and with a given relevancy function which has significantly lower computational complexity than exhaustive search. To achieve the performance goal we created a relevance function induced coordinate system on the set of answers and, subsequently, created a metrized small world graph on its basis. The computer simulations we performed confirmed the validity of the proposed heuristic algorithm. The planned application of this method is the creation of a targeted advertisement system for telecommunication systems with connection path establishment.

Key words: graph data model based, relevance maximizing algorithm.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

ГЕНЕРАТОР АБСОЛЮТНО СЛУЧАЙНЫХ ПОЛИГОНОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева

Тема работы: разработка алгоритма построения полигона со случайными длинами и направлениями ребер.**Цель работы:** пополнение библиотеки моделей и алгоритмов компьютерной графики.**Метод решения:** Имитация броуновского движения по замкнутой цепочке случайных не пересекающихся отрезков.**Оригинальность:** Способность алгоритма генерировать лабиринтные полигоны.**Выводы:** В работе получен алгоритм построения полигонов абсолютно непредсказуемой формы.*Ключевые слова:* отрезок, полигон, вершина, случайное число.

В компьютерной графике для отладки различных тестов и алгоритмов используются разнообразные графические объекты, из которых особенно востребованы полигоны (многоугольники). Данные плоские фигуры определяются координатами вершин в порядке их соединения и могут быть созданы как вручную, так и алгоритмически, как детерминированно, так и случайно. Последний способ генерирования полигонов особенно ценен, поскольку он позволяет автоматически без утомительного ручного ввода вершин быстро получить множество разных форм, пройти в совокупности по всем критичным ветвям тестируемого алгоритма и провести статистическую обработку результатов тестирования.

В [1] рассмотрено несколько алгоритмов генерирования полигонов как выпуклых (функции *conv_poly*, *cover2* и *rcpoly*), так и невыпуклых (функции *poly_points* и *rpoly*). В последнем алгоритме вершины полигона создаются методом вращения луча на один оборот вокруг заданной, возможно, случайно, точки **T** на случайные углы и откладывания вдоль него отрезков случайной длины. Все случайные числа генерируются в заданных интервалах. За одно обращение функция *rpoly* возвращает случайный так называемый *звездный* полигон $P = p_1 p_2 \dots p_n p_1$, имеющий ядро *K*, из всех точек которого напрямую видны все вершины (рис. 1, а). У каждого выпуклого полигона ядро не только существует, но и совпадает с полигоном, однако, произвольный невыпуклый полигон может и не иметь ядра (рис. 1, б), и он не способен сгенерироваться алгоритмом *rpoly*. Совершенно очевидно отсутствие ядер у лабиринтных полигонов (рис. 1, в).

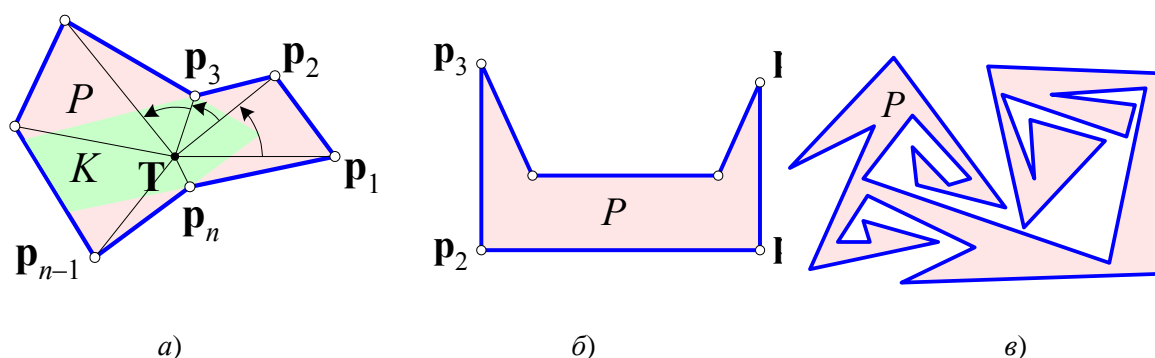


Рис. 1. Типы невыпуклых полигонов:
а – звездный; б – безъядерный; в – лабиринтный

В данной работе рассматривается алгоритм построения *абсолютно* случайного полигона методом, имитирующим процесс дискретного броуновского движения на плоскости в

случайных направлениях со случайными длинами шагов. Полилиния такого хаотического блуждания должна удовлетворять двум условиям:

- 1) ее несмежные отрезки не должны пересекаться либо касаться друг друга;
- 2) на последнем шаге ломаная линия должна замкнуться в полигон с совпадающими крайними вершинами $\mathbf{p}_1 = \mathbf{p}_{n+1}$.

Задача оценки взаимного расположения двух отрезков ab и cd по координатам их концевых точек \mathbf{a} , \mathbf{b} , \mathbf{c} и \mathbf{d} изучается в [1]. Вводится скалярная функция векторных аргументов

$$f(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{p}) = |\mathbf{p} - \mathbf{a} \quad \mathbf{b} - \mathbf{a}|, \quad (1)$$

возвращающая определитель квадратной матрицы, составленной из двух столбцовых векторов $\mathbf{p} - \mathbf{a}$ и $\mathbf{b} - \mathbf{a}$. Если точка \mathbf{p} лежит на прямой, проходящей через точки \mathbf{a} и \mathbf{b} , то определитель матрицы с линейно-зависимыми столбцами равен нулю. Для всех точек \mathbf{p} , лежащих справа от направляющего вектора прямой $\mathbf{b} - \mathbf{a}$, функция (1) возвращает положительные числа, а для всех левых точек — отрицательные. Следующий тест взаимного расположения отрезков ab и cd :

$$\text{segm_test}(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}, \mathbf{d}) = (f(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}) \cdot f(\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{d}) \leq 0) \wedge (f(\mathbf{c}, \mathbf{d}, \mathbf{a}) \cdot f(\mathbf{c}, \mathbf{d}, \mathbf{b}) \leq 0) \quad (2)$$

возвращает решение системы двух неравенств, проверяющих расположение концов каждого отрезка не по одну сторону от прямой, несущей другой отрезок. Функция segm_test возвращает 1 при пересечении либо касании отрезков и 0 — в противном случае.

Абсолютно случайный полигон как выпуклый, так и невыпуклый, как с ядром, так и без ядра, с произвольными углами между ребрами и направлением обхода строится методом имитации процесса шагания по плоскости в случайных направлениях без пересечения пройденного пути и возвратом в исходную точку. Блок-схема функции $\text{arpoly}(\mathbf{T}, a, b, m, M)$, реализующей этот процесс, приведена на рис. 2.

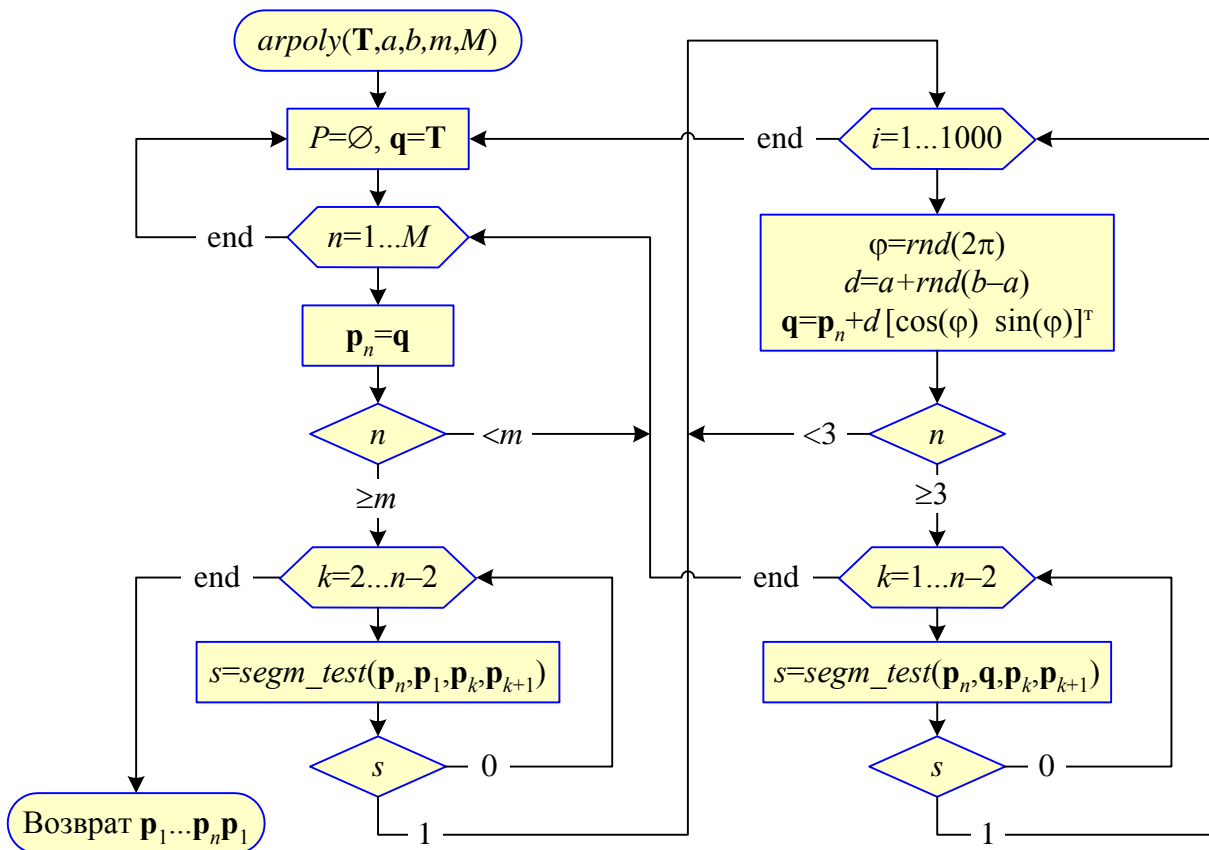


Рис. 2. Блок-схема алгоритма

Первый векторный аргумент \mathbf{T} задает расположение начальной вершины полигона \mathbf{p}_1 (может быть задана детерминированно либо случайно), следующая пара аргументов a и b определяет диапазон изменения длины шага $d \in (a, b)$, четвертый аргумент $m \geq 3$ задает минимальный номер вершины \mathbf{p}_m , с которой начинается проверка возможности замыкания полилинии ребром $\mathbf{p}_m\mathbf{p}_1$, а пятый аргумент $M \geq m$ ограничивает максимальное число шагов хаотического блуждания для предотвращения его зацикливания в случае невозможности замыкания полилинии из глубин построенного лабиринта.

Главные действия алгоритма происходят в цикле $n=1, M$:

- поиск вершины \mathbf{p}_{n+1} начинаем с откладывания от точки \mathbf{p}_n отрезка случайной длины $d = a + rnd(b - a)$ под случайным углом $\varphi = rnd(2\pi)$. На конце получаем пробную точку

$$\mathbf{q} = \mathbf{p}_n + d[\cos(\varphi) \quad \sin(\varphi)]^T;$$

- при $n \in \{1, 2\}$ запоминаем точки $\mathbf{p}_{n+1} = \mathbf{q}$, в результате чего создается двухсегментная полилиния $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3$;

- при $n \geq 3$ проверяем пересечение отрезка $\mathbf{p}_n\mathbf{q}$ с ранее построенными *несмежными* ребрами $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 \div \mathbf{p}_{n-2}\mathbf{p}_{n-1}$ (рис. 3, а). При первом обнаружении значения $segm_test(\mathbf{p}_n, \mathbf{q}, \mathbf{p}_k, \mathbf{p}_{k+1}) = 1$ повторяем генерацию новой пробной точки \mathbf{q} до тех пор, пока она не станет подходящей для следующей вершины полигона. Во избежание зацикливания ограничим число пробных повторов достаточно большим числом, например, 1000;

- при $n \geq m$ проверяем полилинию $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_n$ на возможность замыкания ребром $\mathbf{p}_n\mathbf{p}_1$, не пересекающимся ни с одним из *несмежных* ребер $\mathbf{p}_2\mathbf{p}_3 \div \mathbf{p}_{n-2}\mathbf{p}_{n-1}$ (рис. 3, б). При возвращении тестом (2) значения $segm_test(\mathbf{p}_n, \mathbf{p}_1, \mathbf{p}_k, \mathbf{p}_{k+1}) = 0$ для всех $k = 2 \dots n - 2$ добавляем к полилинии начальную вершину и возвращаем замкнутый полигон $P = \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_n\mathbf{p}_1$;

- если за все M шагов случайного блуждания полилиния $\mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_M$ не может быть замкнута без самопересечений (рис. 3, в), то заново повторим процесс шагания от точки \mathbf{T} до успешного получения $n \in [m, M]$ -стороннего замкнутого полигона $P = \mathbf{p}_1\mathbf{p}_2 \dots \mathbf{p}_n\mathbf{p}_1$, не забывая предварительно инициализировать пустой список $P = \emptyset$. Такой же повтор следует делать после 1000 неудачных попыток генерации пробных точек.

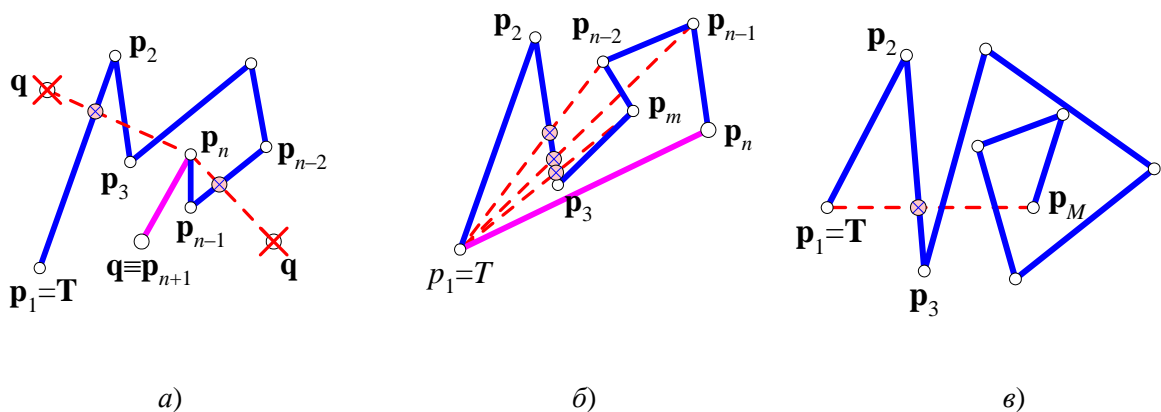


Рис. 3. Типы невыпуклых полигонов

На рис. 4 показан ряд полигонов, сгенерированных алгоритмом $arpoly(\mathbf{T}, 2, 5, m, M)$ с разными значениями m и M . При задании $m = 3$ всегда получаются случайные треугольники.

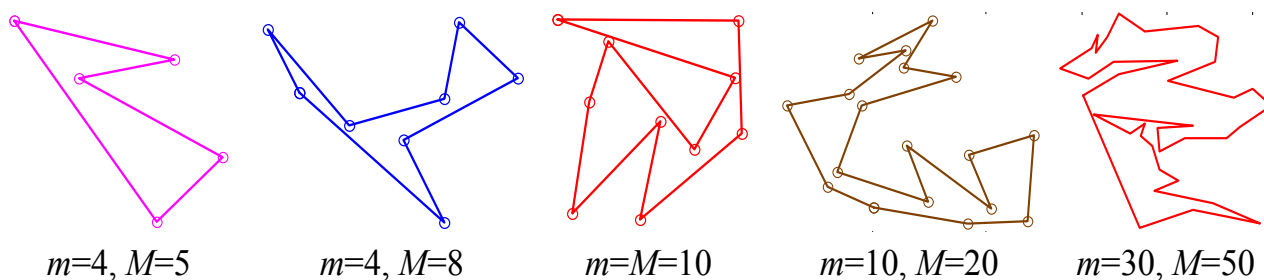


Рис. 4. Результаты работы алгоритма

1. **Никулин, Е.А.** Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: учеб. пособие для вузов / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2005. – 560 с.

Дата поступления
в редакцию 06.05.2013

Е.А. Nikulin

ABSOLUTELY RANDOM POLYGONS GENERATOR

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev

Subject: Development of an algorithm to construct polygons with random edge lengths and orientations.

Purpose: Stocking of computer graphics model and algorithm library.

Methodology: Imitation of Brownian movement along a closed chain of random non-intersecting segments.

Originality/value: Ability of the algorithm to generate maze polygons.

Findings: The work had outcome with an algorithm which constructs polygons of absolutely unpredictable configuration.

Key words: segment, polygon, vertex, random number.

УДК 681.5

Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов

**АНАЛИЗ ВРЕМЕННЫХ РЯДОВ ТЕХНИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ
ПРОМЫШЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В рамках данной статьи рассматривается структура временных рядов, описывающих эксплуатационные параметры промышленных объектов, с точки зрения возможности их прогнозирования. В качестве критериев прогнозируемости временных рядов рассматриваются их стационарность, предсказуемость и нерегулярность.

Ключевые слова: временной ряд, прогнозирование, стационарность, предсказуемость, нерегулярность временных рядов.

Автоматизация процессов мониторинга, контроля работоспособности сложных технологических объектов и прогнозирования их технических состояний является мощным фактором повышения их технико-экономической эффективности и надежности. В настоящее время актуально применение стратегии обслуживания по фактическому состоянию, что требует повышения точности и оперативности получения прогноза параметров объекта.

Функционирование объекта можно описать последовательностью постоянно сменяющихся друг друга технических состояний, каждое из которых представляет собой набор значений параметров объекта в определенный момент времени. Задача прогнозирования технических состояний промышленного объекта при этом будем рассматривать как прогнозирование совокупности процессов изменения его технических параметров, представленных в виде временных рядов.

Известно, что определение закономерностей развития процессов и построение на их основе прогнозной модели – трудноразрешимая задача. Объясняется это тем, что изменения технических параметров обусловлены влиянием целого ряда внешних факторов, каждый из которых вносит свой вклад в картину развития процесса. Существует большое количество методов прогнозирования, основанных на математической экстраполяции, корреляционном анализе, использовании экспертных систем, а также комбинирующих известные методы. При этом выбор метода прогнозирования, его трудоемкость и эффективность применения в большой степени зависит от вида временного ряда, описывающего исследуемый процесс. В связи с этим, на практике, при разработке моделей и автоматизации методов прогнозирования, необходимо выполнить исследования в области структуры прогнозируемых процессов.

Временной ряд $Y = \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\}$, описывающий изменение технического параметра, может быть представлен как комбинация двух различных по своей природе компонент, каждая из которых вносит в процесс анализа временного ряда определенные особенности. Часть временного ряда, определяющая основные закономерности его развития, значимые при решении задачи прогнозирования, называется детерминированной компонентой. Другая часть временного ряда, описывающая случайные отклонения исследуемого процесса, носит название случайной компоненты.

При использовании аддитивной модели временного ряда соотношение детерминированной и случайной компонент описывается в виде суммы $y_n = d_n + e_n$, где d_n – n -й элемент детерминированной компоненты, e_n – n -й элемент случайной компоненты. В матричной форме это выражение записывается в виде $Y = D + E$, где D , E – временные ряды, описывающие детерминированную и случайную компоненты исходного ряда Y .

Аддитивная модель позволяет сделать ряд предположений относительно свойств компонент временного ряда и облегчить процесс его декомпозиции.

Детерминированная компонента несет сведения о процессе изменения технического параметра во времени и является информационной основой при построении прогностических моделей. Она включает в себя эволюционную и квазипериодическую составляющие $d_n = tr_n + p_n$, где tr_n , p_n – элементы рядов, описывающих эволюционную и квазипериодическую составляющие соответственно.

Эволюционная составляющая выражает общую направленность изменения показателей процесса. В теории анализа временных рядов носителем эволюционной составляющей является тренд – кривая различной степени усреднения ряда, описывающая общий закон его развития. По степени сложности тренды можно разделять на два вида [1].

К первому можно отнести тренды, которые описываются элементарными математическими функциями, при этом общий вид аппроксимирующей функции может быть определен визуально. Простые тренды описывают нестационарные, слабо изменяющиеся процессы с высокой степенью инерционности. Их прогнозирование не составляет сложности, здесь хорошо работают известные прогностические модели.

Ко второму виду относятся тренды, аппроксимация которых одиночными элементарными математическими функциями невозможна. Выделение таких трендов на основе значений временного ряда и подбор аппроксимирующей функции являются сложной задачей, требующей дополнительной информации о логической структуре, взаимосвязях компонент исследуемого процесса и влиянии внешних факторов. Следует отметить, что эволюционная составляющая в большинстве случаев характеризует необратимые процессы старения и износа составных частей промышленного объекта и используется для построения долгосрочных прогнозов.

Квазипериодическая составляющая представляет собой часть временного ряда, обусловленную флуктуациями внешних воздействий. Она может иметь вид периодического процесса, а также процесса, не являющегося периодичным в масштабах некоторой выборки. Квазипериодическая составляющая является переходным звеном между случайной компонентой и эволюционной составляющей. Она не может быть отнесена к случайной компоненте, так как отдельные измерения, входящие в ее состав, не являются независимыми. Она так же не может быть отнесена к эволюционной составляющей, так как описывает процесс изменения с точки зрения кратковременных и непостоянных воздействий.

Как показывает практика, нерегулярная квазипериодическая составляющая является частью временного ряда, который имеет сложный нелинейный закон развития. Поиск модели, описывающей периодическую составляющую ряда, объясняется тем, что учет периодической составляющей в прогнозной модели оправдан при кратковременном прогнозировании процессов изменения технических параметров. Это дает возможность поиска закономерностей его развития во времени и построения прогностических моделей, позволяющих с заданной точностью делать кратковременный прогноз.

Случайная компонента не несет информации о развитии исследуемого процесса и представляет собой случайные отклонения значений временного ряда от детерминированной компоненты. По своему происхождению случайную составляющую можно разделить на две группы: измерительные и внутренние шумы.

Измерительные шумы являются результатом неточного измерения наблюдаемых величин. Причиной их появления могут быть как внешние регулярные воздействия, так и случайные процессы. Если результат воздействия первых можно компенсировать, внося в прогнозную модель определенные поправки, то результат случайных процессов устранить можно только частично. Внутренние шумы – это отражение свойств, присущих самому исследуемому объекту. Как и в случае с внешними шумами, компенсировать их можно лишь частично, используя методы статистического сглаживания. Наличие в исследуемом процессе внутренних шумов, что присуще процессам реальных объектов, значительно осложняет процесс его анализа и затрудняет построение прогностической модели.

При построении прогностических моделей случайная компонента как не несущая по-

лезной информации о закономерностях развития может использоваться, преимущественно, для оценки возможных отклонений фактических значений анализируемого объекта от прогнозных. При решении этой задачи статистические свойства нерегулярной составляющей будут использоваться как критерии достоверности разделения процесса на его составляющие. Как показывает практика, наиболее достоверным является разделение, в основу которого положено предположение о том, что случайная компонента обладает свойствами гауссовского белого шума.

Рассмотрим вопросы анализа стационарности, предсказуемости и нерегулярности временных рядов.

1. *Оценка стационарности временных рядов технических параметров.* Стационарность временных рядов является одним из основных критериев, позволяющих использовать большинство регрессионных методов прогнозирования, и определяет независимость их статистических параметров от выборки. Среди временных рядов, описывающих изменения технических параметров промышленных объектов, присутствуют как стационарные, так и нестационарные процессы. Для стационарных процессов характерен тренд в виде горизонтальной прямой, относительно которой происходят флуктуации процесса. Различают стационарность в широком и узком смысле [2].

Большинство процессов, описывающих технические параметры, являются стационарными в широком смысле, так как они удовлетворяют условию неизменности математического ожидания от объема и расположения выборки во временном ряду и зависимостью автокорреляционной функции только от разности моментов времени, т.е. $E(y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m)) = \text{const}, \rho_y(t, \tau) = \rho_y(\tau - t)$. Ряд Y является стационарным в узком смысле, если совместное распределение вероятности m наблюдений $y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m) \in Y$ совпадает с распределением вероятности m наблюдений $y(t_1 + \tau), y(t_2 + \tau), \dots, y(t_m + \tau) \in Y$ и не зависит при этом от τ и m : $F(y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_m)) = F(y(t_1 + \tau), y(t_2 + \tau), \dots, y(t_m + \tau))$.

Если рассматривать дискретный процесс изменения технического параметра, то стационарность в широком смысле подразумевает наличие флуктуаций процесса вокруг определенного уровня. При этом нестабильность процессов, описывающих изменение технического параметра во времени, может быть вызвана специфической природой развития процесса, дрейфом технических параметров, вызванным процессами старения и износа составных элементов промышленного объекта или возникновением внештатных ситуаций.

Рассмотрим временной ряд, описывающий параметры промышленных объектов со сложной нестационарной природой развития. На рис. 1 изображены графики, описывающие изменение температуры обмотки и тока статора промышленного электродвигателя в предаварийной ситуации.

В данном случае причиной роста дрейфа температуры являлся рост тока статора и выход его за пределы допустимых значений. Проведем анализ каждого из временных рядов с точки зрения их стационарности.

Проверку гипотезы о стационарности данного процесса будем производить на основе критерия Фишера [3]. Для этого разделим весь временной ряд $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_n\}$ на две равные части $Y = \{y_1, y_2, \dots, y_{n/2}\}$ и $Y = \{y_{\frac{n}{2}+1}, y_{\frac{n}{2}+2}, \dots, y_n\}$. Вычислим для каждой из частей соответственно математические ожидания E_1, E_2 и дисперсии D_1, D_2 :

$$E_1 = \frac{2}{n} \sum_{i=1}^{n/2} y_i; \quad D_1 = \frac{1}{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=1}^{n/2} (y_i - E_1)^2; \quad (1)$$

$$E_2 = \frac{2}{n} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n y_i; \quad D_2 = \frac{1}{\frac{n}{2}-1} \sum_{i=\frac{n}{2}+1}^n (y_i - E_2)^2.$$

Критерий Фишера F имеет следующий вид

$$F = \begin{cases} D_1 / D_2; D_1 > D_2 \\ D_2 / D_1; D_2 > D_1 \end{cases} . \quad (2)$$

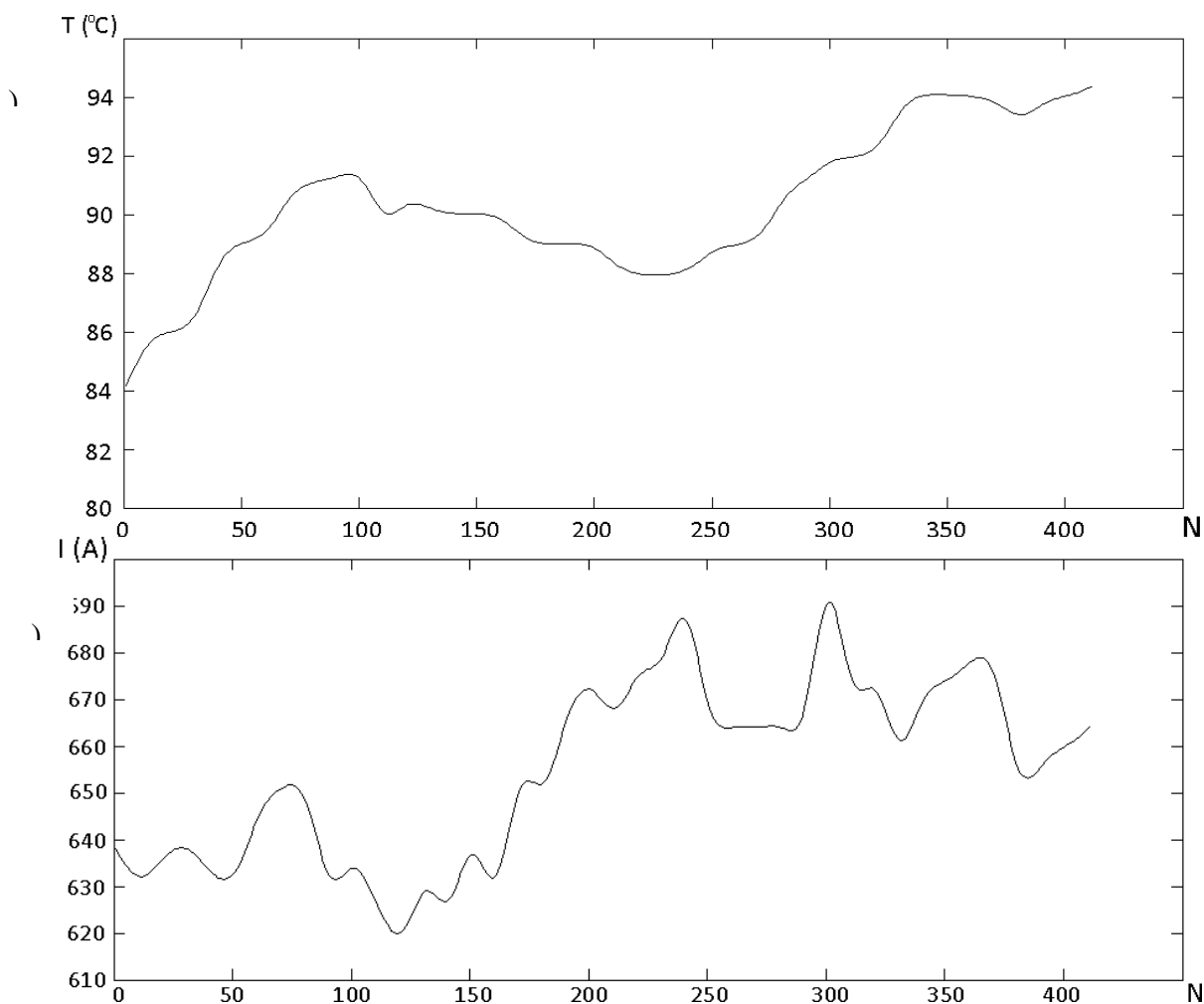


Рис. 1. Дрейф технических параметров электродвигателя:
a – температура меди статора; *b* – ток статора

Для временных рядов, описывающих изменение температуры и тока статора (рис. 1), были вычислены коэффициенты Фишера, которые равны $F_T=3.56$ и $F_I=5.11$ для параметров температуры и тока соответственно. Исходя из табличных данных, коэффициент Фишера для стационарных временных рядов объемом до 1000 отсчетов должен лежать в пределах $F=1.0-1.423$. На основании этого можно сделать вывод, что процессы дрейфа температуры и тока статора не являются стационарными в узком смысле, так как их дисперсии D не постоянны во времени. Для окончательной проверки гипотезы воспользуемся t -критерием Стьюдента [3]:

$$t = \frac{|E_1 - E_2|}{\sigma \cdot \sqrt{\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}}} , \quad (3)$$

где n_1, n_2 – количество элементов, входящих в Y_1 и Y_2 ; σ – среднеквадратичное отклонение разности математических ожиданий:

$$\sigma = \sqrt{\frac{(n_1 - 1)D_1 + (n_2 - 1)D_2}{n_1 + n_2 - 2}}. \quad (4)$$

Коэффициенты Стьюдента временных рядов температуры и тока статора равны соответственно $t_t=3.23$ и $t_t=4.1$, в то время как табличное значение границы стационарности временных рядов равно $t_{et}=2.41$. На основании этого можно сделать вывод, что рассматриваемый процесс является нестационарным по математическому ожиданию.

Оценка стационарности временных рядов, описывающих изменение во времени температуры и тока статора, показывает, что описываемые ими процессы являются нестационарными. Проведенные в результате моделирования исследования на временных рядах со сложными законами развития показали, что большие коэффициенты Стьюдента свидетельствуют о наличии точки смены тенденции в процессе изменения временного ряда и немонотонности его тренда.

2. *Оценка предсказуемости временных рядов технических параметров.* С точки зрения детерминистического подхода непредсказуемость временного ряда интерпретируется как высокая сложность законов его развития, превосходящая возможности применяемых прогностических методов. Если использовать концепцию частичной детерминированности, то любой процесс можно описать аддитивной моделью, содержащей детерминированную и случайную компоненты. Степень детерминированности процесса определяется участием детерминированной компоненты в развитии процесса во времени и пространстве: чем поведение процесса более упорядочено и лучше поддается формализации, тем выше степень участия детерминированной составляющей.

В качестве критерия предсказуемости временного ряда будем использовать оценку максимального периода упреждения его прогноза [4], определяемую равенством автокорреляционной функции определенному пороговому значению β , при котором исследуемый процесс считается независимым по отношению к своей предыстории:

$$\frac{\sum (y(t) - \overline{y(t)}) \cdot (y(t + \tau_{pred}) - \overline{y(t + \tau_{pred})})}{\sqrt{\sum (y(t) - \overline{y(t)})^2 \cdot \sum (y(t + \tau_{pred}) - \overline{y(t + \tau_{pred})})^2}} = \beta. \quad (5)$$

где τ_{pred} – оценка максимального упреждения прогноза; $y(t)$ – элемент прогнозируемого временного ряда.

При условии, что прогнозируемый процесс обладает невысокой нерегулярностью, данный критерий позволяет достаточно точно оценивать границу прогнозного упреждения. Проведенное моделирование показало, что с ростом степени нерегулярности исследуемого процесса точность данного метода падает, давая более пессимистический результат по сравнению сполучаемым реально. Данный критерий способствует автоматизации процесса анализа прогнозируемости временных рядов и получению априорной оценки максимального периода прогнозного упреждения.

Рассмотрим временной ряд, описывающий изменение во времени температуры средней точки статора (рис. 2, а). Для анализа прогнозируемости процесса изменения температуры статора построим и проанализируем автокоррелограмму его временного ряда.

Из приведенного графика видно, что коррелограмма не содержит выбросов и имеет монотонный пологий начальный участок. На основании этого можно утверждать, что временной ряд, описывающий изменение температуры статора, является достаточно инерционным процессом, который может быть спрогнозирован с использованием его предыстории. На основании проведенных исследований, учитывая (5), было найдено пороговое значение автокорреляционной функции $\beta=0.65$ и получена оценка максимального упреждения прогноза, которая составила $\tau_{pred}=26$ отсчетов.

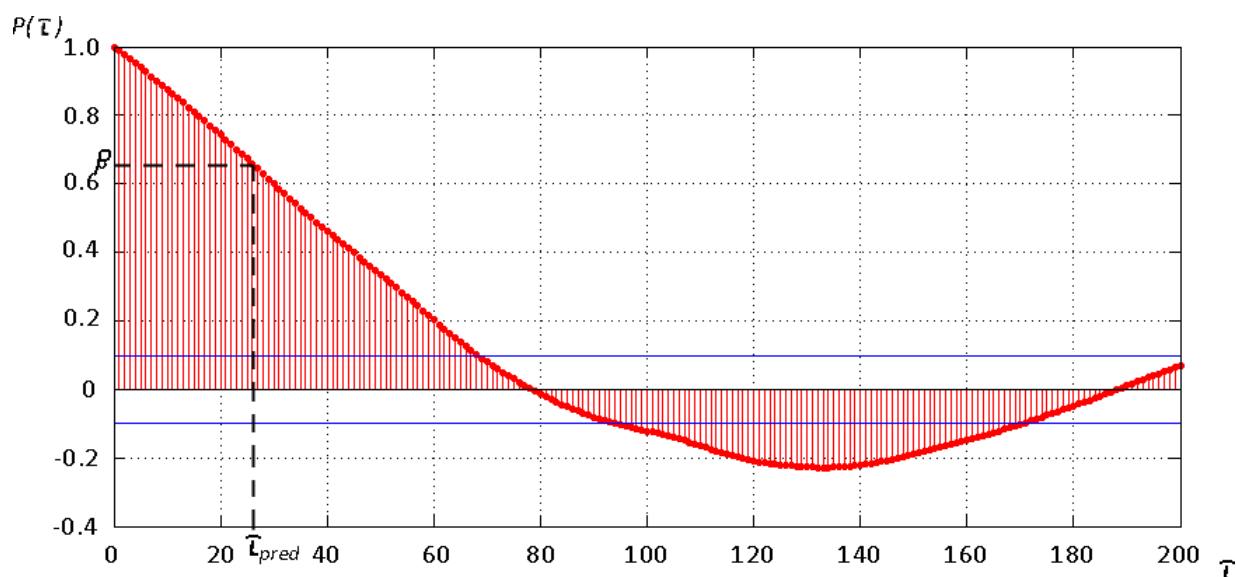


Рис. 2. Автокоррелограмма временного ряда, описывающего изменения температуры статора электродвигателя

Исходя из полученных результатов, можно сделать вывод, что прогнозирование временного ряда, описывающего изменение температуры статора, возможно математическими методами, использующими в качестве основания прогноза предысторию развития процесса.

Коррелограмма временного ряда, описывающего изменение тока статора электродвигателя (рис. 3), представляет собой монотонно убывающую функцию, что свидетельствует о высокой инерционности процесса и возможности эффективного применения моделей инерционного прогнозирования.

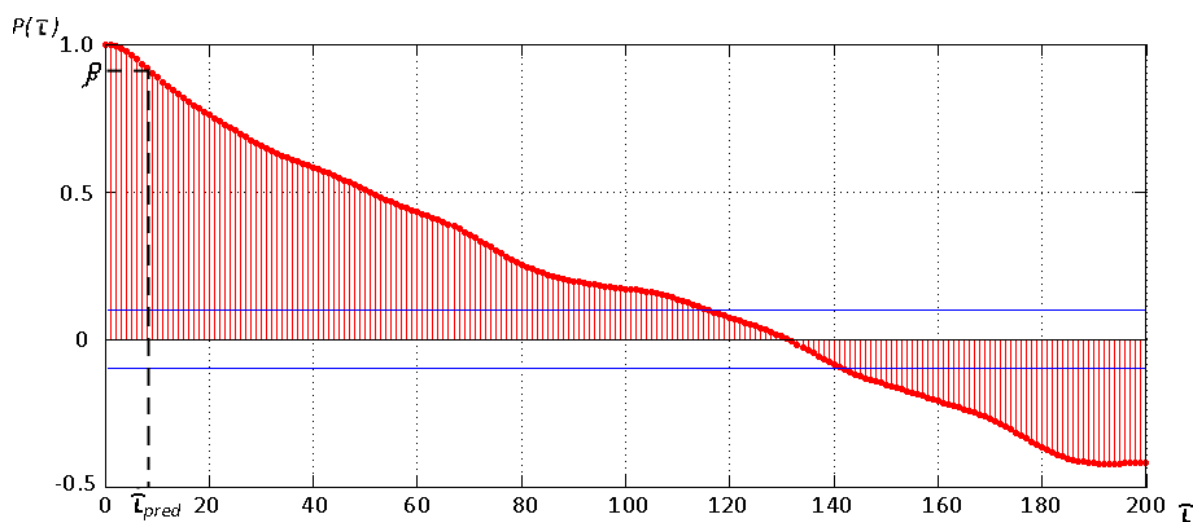


Рис. 3. Автокоррелограмма временного ряда, описывающего изменение тока статора электродвигателя

Коррелограмма временного ряда, описывающего изменение во времени тока статора, не имеет выбросов и монотонна, что свидетельствует о высокой линейной зависимости элементов ряда от их предыстории. Экспериментально было найдено пороговое значение для автокорреляционной функции $\beta=0.93$. Его близкое к единице значение объясняется тем, что колебания тока статора происходят в достаточно узком диапазоне значений и с большим статистическим средним, что накладывает более жесткие требования на точность прогноза и ведет к сокращению упреждения прогноза. Используя найденное пороговое значение, на ос-

новании построенной коррелограммы, была определена оценка максимального прогнозного упреждения для данного временного ряда $\tau_{pred}=8$.

На основании проведенного моделирования и исследования множества временных рядов, описывающих сложные изменения технических параметров во времени, сделан вывод о том, что оценка максимального упреждения прогноза является адекватной и может использоваться для количественной оценки прогнозируемости процесса.

3. *Определение степени нерегулярности временных рядов технических параметров.* Процесс с точки зрения трудоемкости его математического описания и прогнозирования характеризует критерий нерегулярности временного ряда. Нерегулярность временного ряда, в отличие от степени детерминированности, характеризует степень сложности закона его развития и, наряду со степенью детерминированности, описывает гипотетическую степень его прогнозируемости.

В результате анализа подходов и критериев, используемых для оценки степени нерегулярности временного ряда, можно сделать вывод, что наиболее подходящим является коэффициент вариабельности K , предлагаемый в работе [5]:

$$K = \frac{\overline{|\Delta y|}}{\overline{y}}, \quad (6)$$

где \overline{y} – статистическое среднее временного ряда; $\overline{|\Delta y|}$ – средний модуль разности временного ряда, определяемый по формуле

$$|\Delta y| = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |y_{i+1} - y_i|, \quad (7)$$

где y_i – i -й элемент исследуемого временного ряда; N – длина временного ряда.

Коэффициент вариабельности K пропорционален относительной скорости изменения значений временного ряда и может быть использован для классификации временных рядов по характеру их изменения. При этом существуют значения $K=1$ и $K=2$ разбивающие все множество временных рядов на три класса:

- временные ряды с преобладающей детерминированной компонентой (преимущественно регулярные) ($0 < K < 1$);
- временные ряды с высокой степенью нерегулярности (преимущественно случайные) ($1 < K < 2$);
- шумовые последовательности ($K \geq 2$).

Исследования, проведенные в работе [6], показали, что на основании критерия вариабельности можно осуществлять оценку нерегулярности временного ряда и производить их разделение по степени зашумленности.

Библиографический список

1. **Афанасьев, В.Н.** Анализ временных рядов / В.Н. Афанасьев, М.М. Юзбашев. – М.: Финансы и статистика. 2001. – 228 с.
2. **Андерсен, Т.** Статистический анализ временных рядов / Т. Андерсен. – М.: Мир, 1976. – 756 с.
3. **Букреев, В.Г.** Выявление закономерностей во временных рядах в задачах распознавания состояний динамических объектов. / В.Г. Букреев, С.И. Колесникова, А.Е. Янковская. – Томск: изд. Томского политехнического университета. 2010. – 254 с.
4. **Безручко, Б.П.** Математическое моделирование и хаотические временные ряды / Б.П. Безручко, Д.А. Смирнов. – Саратов: ГосУНЦ «Колледж». 2005 – 320 с.
5. **Кликушин, Ю.Н.** Количественная оценка свойств «регулярности-предсказуемости» сигналов. // Радиоэлектроники. ИРЭ РАН. 2000. № 11.

6. Ляхманов, Д.А. Выделение детерминированной компоненты временных рядов методом спектрального анализа / Э.С. Соколова, Д.А. Ляхманов // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. 2011. Часть 1. №5. С. 181–184.

*Дата поступления
в редакцию 06.05.2013*

E.S. Sokolova, D.A. Lyakhmanov

**ANALYSIS OF DYNAMIC SERIES DESCRIBES TECHNICAL PARAMETERS
OF INDUSTRIAL OBJECTS**

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alexeev

Purpose: This paper deals with considering structure of time series, describes operational parameters of industrial objects from the point of view of forecasting ability. Stability, predictability, irregularity is regard as criterions of forecasting ability.

Design/methodology/approach: In this article for predictability estimation use three basic criteria: stationarity, predictability, irregularity. The use of these criteria allows to evaluate the degree of time series predictability.

Findings: It is possible, for example, to apply the results of research in management systems of proactive management.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the forecasting unstable time series of technical parameters.

Originality/value: In this research uses a combination of the three most important criteria for determining the hypothetical predictability of time-series.

Key words: dynamic series, forecasting, stability, predictability, irregularity of time series.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 658.7:656

М.М. Агапов¹, А.Ю. Панов²

ПРИМЕНЕНИЕ МНОЖЕСТВЕННЫХ КРИТЕРИЕВ ПРИ РЕШЕНИИ ЛОГИСТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Государственное казённое учреждение Нижегородской области
«Главное управление автомобильных дорог»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Показано влияние вида и количества критериев на правильность принятия стратегических решений. Исследована возможность минимизации ошибок при решении логистических задач типа Make or Buy.

Ключевые слова: логистика, аутсорсинг, критерий, ошибка принятия решения, удельные затраты.

Решение любой логистической задачи связано с проблемой выбора того или иного варианта действий. Выбор вариантов и определение оптимального относятся к задачам оптимизации, и в этом логистические и оптимизационные задачи близки по своему смыслу. Выбор вариантов (развития событий), как правило, основывается на критериальном подходе, когда выбранный критерий представляет собой некое граничное условие, на основании которого принимается тот или иной вариант. К задачам такого вида относится, например, использование при перевозках собственного транспорта или наемного (задача аутсорсинга), который в последнее время все более востребован при организации перевозок в РФ. Итогом будет принятие соответствующего стратегического решения. Но как не ошибиться, выиграть время и минимизировать риски от принятия таких решений?

Выбор критерия для решения логистических задач осуществляется исходя из его валидности (значимости) для исследуемой задачи и возможности его определения (расчета). В первом случае правильность выбора вида критерия будет характеризоваться его значимостью – способностью максимально характеризовать как сам процесс, так и его последствия. Выбор вида критерия осуществляется, как правило, методом экспертных оценок на основе существующих технических, экономических, финансовых и других показателей, широко известных практикам. Безусловно, при выборе как вида, так и величины критерия можно использовать и авторитарный подход, не подкрепленный какими-либо расчетами или исследованиями, но такой способ решения логистической задачи в данной статье не рассматривается.

В отношении определения величины (параметра) критерия дело обстоит значительно сложнее, так как именно от его значения будет зависеть способ решения логистической задачи и правильность принятия управленческого решения. Определение параметра критерия можно осуществить:

- численными методами на основе моделирования;
- на основе статистической информации;
- экспериментально в ходе реального процесса;
- методом экспертных оценок.

В первых трех случаях, величина критерия будет зависеть от правильности примене-

ния метода расчета и достоверности выборки, в последнем - от профессионализма и количества экспертов.

Предлагаемый в работе способ определения параметров критериев при решении задачи аутсорсинга представляет собой решение оптимизационной задачи, где оптимальная величина критерия является минимумом целевой функцией суммарных удельных затрат при выполнении услуг по перевозке грузов. Безусловным фактом признаем то, что при переходе на аутсорсинг предприятие должно иметь положительную рентабельность, отличную от 0.

Как правило, при решении оптимизационной задачи ограничиваются одним критерием, значение которого равно точке неопределенности (рис. 1). Чаще всего такой подход обусловлен простотой принятия решения и сложностью в определении большего количества критериев.



Рис. 1. Модель принятия решения при наличии точечного критерия

С другой стороны, упрощение приводит к снижению точности, особенно в тех случаях, когда имеющаяся точка неопределенности представляет собой не точку, а критерии из двух точек, формирующих область неопределенности (рис. 2). Наличие области неопределенности предполагает, что область принятия решений А или Б, точнее ее граничные значения, могут иметь вид некоторого теоретического распределения, то есть носят вероятностный характер.

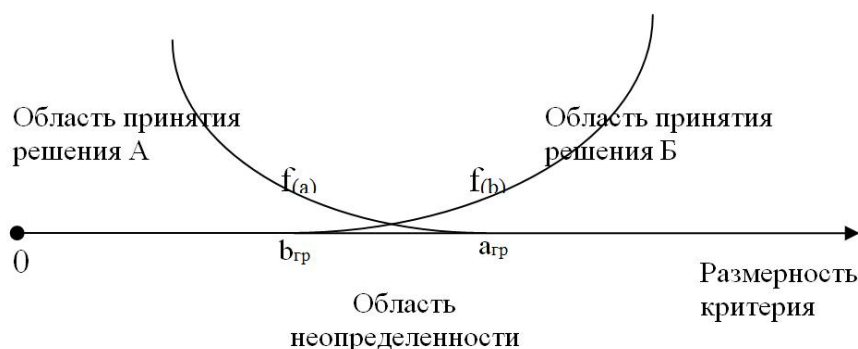


Рис. 2. Модель принятия решения при критериях с областью неопределенности

Наиболее сложным вариантом принятия решения будет случай, когда граничные условия критерия $a_{зп}$ и $b_{зп}$ зеркальны, то есть когда в зоне неопределенности можно принять как решение А, так и Б. Таким образом, находясь в зоне неопределенности, при принятии решения возникает вероятность сделать ошибку. Причем ошибки могут быть две: первая, когда мы принимаем решение А, а на самом деле правильное решение Б, и вторая, когда принимаем решение Б, когда правильным решением является А. На практике это называют ошибкой первого рода «пропуск дефекта» (в нашем случае дополнительные потери) и второго рода «ложная тревога» - недополученная прибыль.

Следовательно, требуется определить такое значение критерия $k_{зп}$, лежащее в области зоны неопределенности $[b_{зп}, a_{зп}]$, при котором риск от ошибок первого и второго

рода был бы минимален. Условие минимума функции риска от ошибок первого и второго рода, согласно [1]

$$\frac{f(k_{zp} / a)}{f(k_{zp} / b)} = \frac{C_1 P(b)}{C_2 P(a)}, \tag{1}$$

где $f(k_{zp} / a)$ - плотность распределения вероятности принятия решения А;
 $f(k_{zp} / b)$ - плотность распределения вероятности принятия решения Б;
 C_1 - недополученная прибыль (ошибка второго рода);
 C_2 - дополнительные потери от неправильного решения (ошибка первого рода);
 $P(a)$ - вероятность принятия решения А;
 $P(b)$ - вероятность принятия решения Б.

Учитывая, что при принятии решения по определению $k_{\bar{a}\bar{b}}$ основой является величины затрат C_1 и C_2 , и сделав ряд допущений, что вероятности ошибок первого и второго рода в зоне неопределенности одинаковы, соотношение (1) может иметь вид

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{C_2}{C_1}. \tag{2}$$

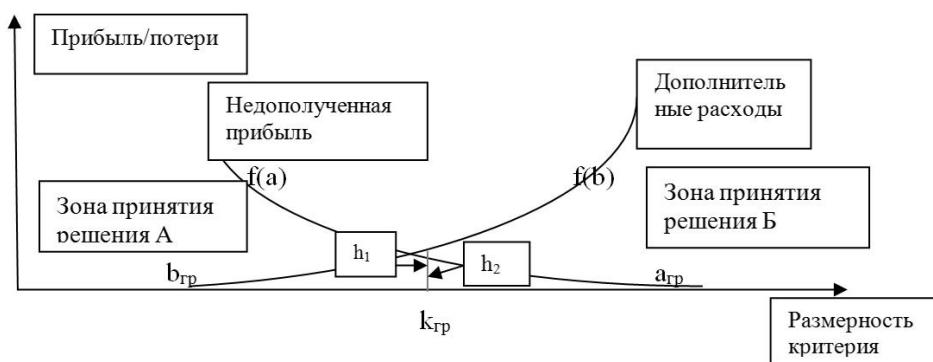


Рис. 3. Модель принятия решения для критерия с минимальным риском

Анализируемая область (рис. 3) представляет собой прямоугольные треугольники с площадями S_1 и S_2 , и катетами $[k_{zp}, a]$, $[b, k_{zp}]$, h_1 и h_2 . При этом граничное значение $k_{\bar{a}\bar{b}}$ можно определить из следующего выражения:

$$S_1 = \frac{1}{2}(a_{zp} - k_{zp})h_1; S_2 = \frac{1}{2}(k_{zp} - b_{zp})h_2; \tag{3}$$

после сокращений и, подставив $h_1 = h_2 \frac{C_2}{C_1}$, имеем

$$(a_{zp} - k_{zp}) \frac{C_1}{C_2} = k_{zp} - b_{zp}, \tag{4}$$

откуда

$$k_{zp} = \frac{(a_{zp} + b_{zp} \frac{C_2}{C_1})}{(1 + \frac{C_2}{C_1})}. \tag{5}$$

На практике довольно проблематично определить истинные значения C_1 и C_2 , по-

этому удобно воспользоваться безразмерной величиной $r = \frac{C_2}{C_1}$, измеряемой любым ненулевым и неотрицательным значением. Например, при $r = 1$, когда потери от ошибок первого и второго рода равны, то величина $k_{зр}$ будет соответствовать середине зоны неопределенности, а при $r = 2$ и более, когда затраты от ошибки, связанной с принятием неправильного решения (например, использование собственного транспорта, когда выгоднее использовать наемный) в два и более раз превышают недополученную прибыль, $k_{зр}$ будет смещаться вправо. Интерпретировать выражение (5) можно следующим образом: при равных вероятностях ошибки первого и второго рода оптимальные значения критерия $k_{зр}$ будут смещаться к границам зоны неопределенности обратно пропорционально соотношению затрат.

Сократить вероятность ошибки от принятия неправильных решений можно за счет использования *двух критериев* при выборе вариантов. В качестве примера [2] рассмотрим критерии, основанные на удельных минимальных затратах и пробеге. Известно, что полные затраты $Z_{пол}$ на организацию перевозки грузов за определенный период складываются из постоянных затрат $Z_{пост}$, не зависящих от объема перевозки и километража и переменных затрат $Z_{пер}$, имеющих тенденцию к росту при увеличении выполняемой работы:

$$Z_{пол} = Z_{пост} + Z_{пер}. \quad (6)$$

Если от фактических величин перейти к их удельным значениям (относительно км пробега или тонно-километровой работы), имеем

$$\frac{Z_{пол}}{l} = \frac{Z_{пост}}{l} + \frac{Z_{пер}}{l}. \quad (7)$$

Обозначив $q(l) = \frac{Z_{пол}}{l}$, $q_{пост} = \frac{Z_{пост}}{l}$, $q_{пер} = \frac{Z_{пер}}{l}$, получим

$$q(l) = q_{пост}(l) + q_{пер}(l). \quad (8)$$

Выражение (6) для наглядности целесообразно представить в виде графика (рис. 4), где кривая $q_{пост}(l)$ имеет тенденцию к снижению по мере увеличения наработки, а $q_{пер}(l)$ будет возрастать. Очевидно, что функция $q(l)$ будет иметь точку минимума q_{min} , которая соответствует минимальному значению целевой функции суммарных удельных затрат и оптимальной величине наработки $l_{опт}$ (выполняемой работы). Полученные в результате расчета величины (минимальные удельные затраты и величина наработки) могут быть критериями при решении задачи выбора логистического партнера или самостоятельной работы. Следует отметить, что величины q_{min} и $l_{опт}$ зависят от конкретных условий транспортной работы и нуждаются в постоянной корректировке. Использование значений критериев для других условий эксплуатации (другие транспортные средства, другие маршруты и т. д.) без проведения аналогичных расчетов некорректно и может стать причиной ошибок.

Если на рис. 4 наложить удельные затраты $a_i(l)$ организации при использовании наемных транспортных компаний (аутсорсинга), то график будет иметь вид (рис. 5), где представлены три возможных варианта соотношения удельных затрат при выполнении транспортной работы своими силами и за счет найма.

Первый и второй варианты описывают ситуацию, когда удельные затраты компании на содержание собственного автопарка и удельные затраты от приобретения услуг на стороне пересекаются: в случае пересечения $q(l)$ и прямой $a_1(l)$ до точки оптимума, а в случае прямой $a_2(l)$ после точки оптимума. При этом аутсорсинг будет выгоднее в случаях, когда

ординаты $a_1(l)$ и $a_2(l)$ меньше чем $q(l)$, а точки неопределенности – места пересечений $a_1(l)$ и $a_2(l)$ с $q(l)$.

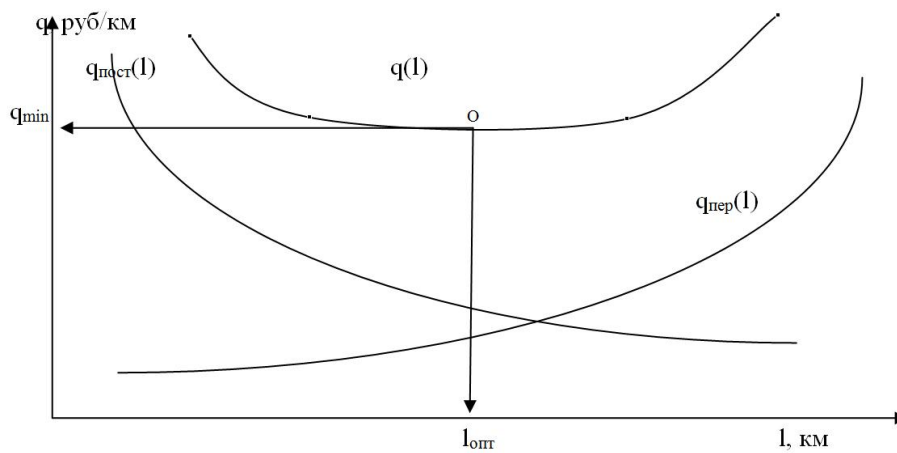


Рис. 4. Вид функции суммарных удельных затрат

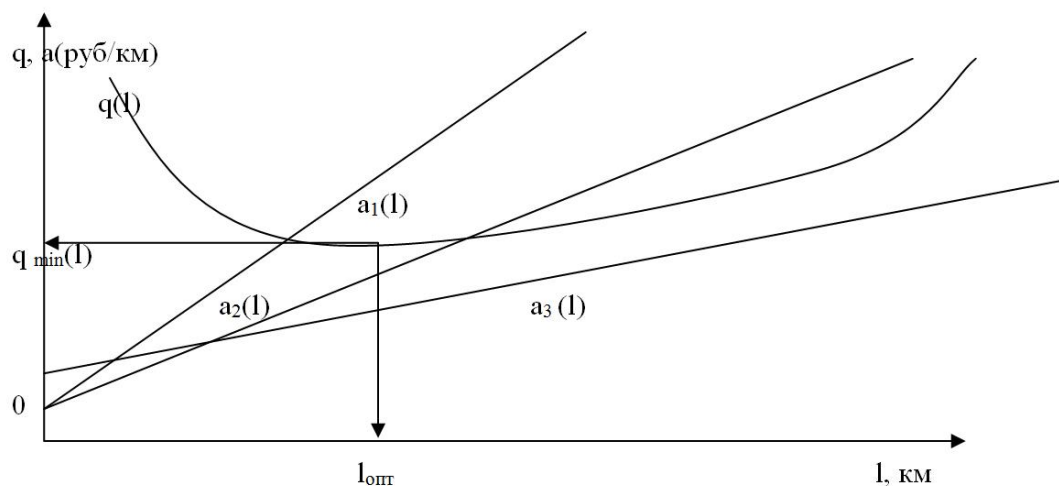


Рис. 5. Модель принятия решения при сопоставлении вариантов на основании двух критериев

Третий вариант (рис. 5) характеризует ситуацию, когда удельные затраты компании на содержание собственного автопарка $q(l)$ могут оказаться настолько высоки, что ожидать пересечения с прямой $a_3(l)$, характеризующей удельные затраты от приобретения услуг на стороне, придется очень долго. Это означает, что собственные расходы компании на транспортировку существенно выше среднерыночных и в этом случае аутсорсинг, безусловно, выгоднее. Следует отметить, что зависимости $a_1(l)–a_3(l)$ могут быть и нелинейными, особенно в случаях, когда компания несет убытки из-за некачественного предоставления услуг сторонними транспортными предприятиями.

Более точной, но и более сложной для анализа является трехмерная, или пространственная, модель принятия решения, в которой решения принимается на основе *трех выбранных критериев*. Для такой модели выбраны следующие критерии, оказывающие значительное влияние на принятие решения: транспортные тарифы, расходы на содержание транспортных средств (далее ТС), а также величина порожнего пробега. Для приближения к действительности рассмотрим случаи, когда у каждого выбранного критерия имеется своя зона неопределенности.



Рис. 6. Модель оси ординат пространственной модели критериев

На рис. 6 приведена модель принятия решения при критерии «расходы на содержание транспортного средства». Очевидно, что чем больше расходы, тем целесообразней использовать наемный транспорт. Аналогично на рис. 7 приведена модель принятия решения при оценке критерия «порожний пробег». В идеале порожний пробег должен стремиться к 0, но в реальных условиях это не так. Поэтому должны быть определены две величины порожнего пробега (без груза), одно из которых l_{\min} допускает использовать собственный транспорт. Другое значение критерия l_{\max} приводит к росту невосполняемых расходов, поэтому целесообразно использовать наемный транспорт.



Рис. 7. Модель оси абсцисс пространственной модели критериев

При определении транспортного тарифа каждая компания опирается в основном на рыночную стоимость данного вида услуги. Конкуренция в данной области довольно сильна, и если собственный тариф окажется выше, чем у других, к вам просто перестанут обращаться клиенты. С другой стороны, высокий тариф – большая прибыль. Поэтому так же, как и для перечисленных критериев (порожнего пробега и затрат на содержание ТС), транспортный тариф можно разделить на три области, как показано на рис. 8.

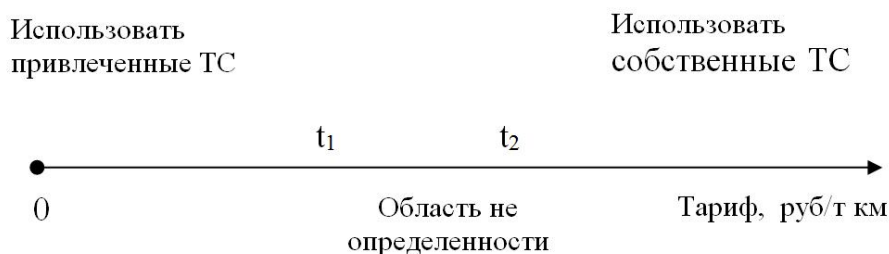


Рис. 8. Модель оси аппликат пространственной модели критериев

Задав систему координат $OXYZ$ и перенеся рассмотренные критерии с рис. 6 – рис. 8 на трехмерную систему координат, получим пространственную модель принятия решения, изображенную на рис. 9.

На рис. 9 четко прослеживаются три области (снизу вверх). Нижняя - область принятия решения об использовании привлеченного транспорта (аутсорсинг) – имеет максималь-

ный объем. Следующее пространство относится к зоне неопределенности. Ее объем зависит от величин области неопределенности по каждому критерию. Если решение принимается на основании расчета $k_{cp}(xyz)$ для областей неопределенности по каждой оси, то данная область минимизируется и превращается в плоскость. При этом условие соотношения $r = \frac{C_2}{C_1}$ для всех трех k_{cp} должно быть одинаково. И, наконец, вверху выделена область выбора в пользу использования собственного транспорта, которая в силу ряда ограничений минимальна по объему.

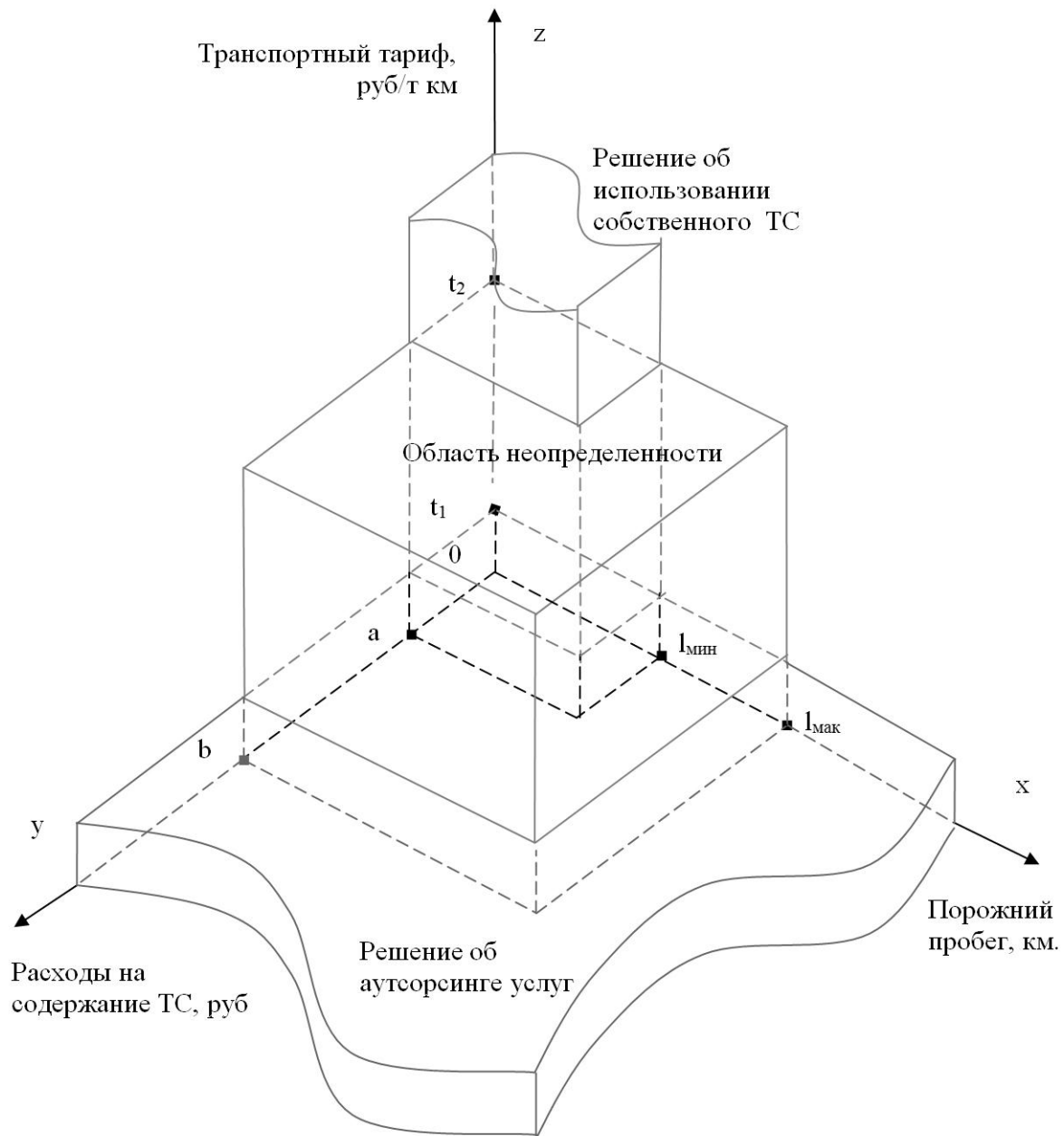


Рис. 9. Пространственная модель принятия решения

Со временем величины показателей и, соответственно, параметры областей в пространственной модели будут меняться по мере получения дополнительных результатов расчета. В целом, для поддержания актуальности корректировку модели следует осуществлять не реже одного раза в полгода.

Выводы

Показано влияние вида и количества критериев на правильность принятия стратегических решений. Исследована возможность и приведены примеры минимизации ошибок при решении логистических задач типа Make or Buy. Показаны методы решения задач аутсорсинга при попадании критерия принятия решения в область неопределенности при выборе одно-, двух- и трехмерных критериев. Рассмотрены основные принципы использования и виды многомерных критериев при принятии стратегических решений.

Библиографический список

1. **Биргер, И.Н.** Техническая диагностика / И.Н. Биргер. – М.: Машиностроение, 1978. – 238 с.
2. **Агапов, М.М.** Совершенствование системы ремонта и повышения работоспособности подвижного состава метрополитена: дисс. канд. техн. наук: 05.22.07: защищена 1993 / Агапов Михаил Михайлович. - Москва, 1993. – 186 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

М.М. Agapov¹, Alexey Y. Panov²

THE APPLICATION OF MULTIDIMENSIONAL CRITERIA IN SOLVING LOGISTICS TASKS

State governmental agency of the Nizhny Novgorod region
«General Directorate of Highways»¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Purpose: The solution of logistics tasks such as Make-or-Buy at the organization of road freight transport is based on the criteria of relevance and accuracy of which affect the correctness of the strategic decision-making. The aim of the work is the assessment of the possibility of applying multiple criteria with the «uncertainty zone» for solutions of logistic tasks.

Methodology: The choice of criterion for the solution of logistics tasks carried out on the basis of its validity (importance) for the tasks and possibilities of its determination (calculation). In the first case, the correct choice of the type of criterion will be characterized by its meaning, the ability to maximally characterize the process itself and its consequences. To minimize the errors of decision-making, especially in case of ingestion of criteria in the «zone of uncertainty», in the work of the used method for function minimization of the risk of errors 1 and type 2 as a method for determining the criteria for the demonstration of the use of the target function of the total of the cost of transportation.

Findings: The study shows that under the assumption of equality of the probabilities of errors of the first and second kind, the optimal value of the criterion will move to the borders of the zone of uncertainty. In order to improve the accuracy of decision-making in the work of the variants of the decision of a task of Make-or-Buy planar and spatial models of the criteria are used.

Value: Work can be used for the solution of practical problems of choosing between their own and hired transport in organization of transportation on the basis of multiple criteria.

Key words: Logistics, outsourcing, criterion, the error of decision-making, unit costs.

УДК 658.527.011

А.А. Иванов

**ПРИВОДЫ СИСТЕМ ТОЧНОГО ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ
НА ОСНОВЕ ОБРАТНОГО ПЬЕЗОЭФФЕКТА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель работы: Использование пьезоэлектриков в качестве преобразователей-двигателей, имеющих электрический вход и механический выход.

Метод проведения работы: Приведены результаты экспериментальных исследований пьезопреобразователей с продольной поляризацией, используемых в конструктивных схемах пьезодвигателей с косыми соударениями и двумерными колебаниями при различных комбинациях продольных, поперечных, изгибных и др. колебаний.

Результаты и область их применения: Установлено, что при условии равенства частоты собственных продольных колебаний и частоты второй формы изгибных колебаний можно осуществлять независимое возбуждение этих колебаний, которое обеспечивает выбор оптимальных амплитудных и фазовых соотношений между отдельными компонентами колебаний в зоне контакта.

Выводы: Представлены различные принципиальные схемы пьезодвигателей и даны рекомендации по их применению в системах точного позиционирования, в том числе в нанометрическом диапазоне, исключаящих громоздкую классическую схему: двигатель – редуктор – тяговая пара «винт-гайка».

Ключевые слова: пьезодвигатель, пьезокерамический преобразователь, обратный пьезоэффект.

Пьезоэлектрики являются обратимыми электромеханическими преобразователями, то есть они способны преобразовывать механическую энергию в электрическую и наоборот. Преобразователи, основанные на использовании прямого пьезоэффекта, называют преобразователями-генераторами, которые имеют механический вход и электрический выход. Преобразователи, основанные на использовании обратного пьезоэффекта, называют преобразователями-двигателями, которые имеют электрический вход и механический выход. Прямой пьезоэффект используется, например, в микрофонах, звукоснимателях, датчиках механических сил, перемещений и ускорений, бытовых зажигалках для газа и т.д. Обратный пьезоэффект послужил основой для создания телефонов, громкоговорителей, ультразвуковых излучателей, реле, двигателей и т.п.

Рассмотрим основные типы пьезоэлектрических двигателей, которые применяются в приводах систем точного позиционирования (СТП).

Пьезодвигатели с косыми соударениями

Схема перемещения содержит ПД с продольной поляризацией, расположенный под углом α к контактной плоскости подвижного звена ПЗ, смонтированного в шариковых направляющих (рис. 1).

Непрерывное движение ПЗ происходит за счет серии косых соударений наконечника 1 ПД с частотой колебаний напряжения, подводимого к пьезопреобразователю. Пружина 2 позволяет регулировать усилие поджима контактного наконечника 1 к плоскости ПЗ. Конструкция кронштейна 3 обеспечивает возможность изменения угла наклона α ПД. Пьезодвигатель может быть выполнен в виде сплошного бруска из пьезокерамики или в виде блока (пакета) пьезокерамических колец.

Предельные (разрушающие) механические напряжения в пьезокерамике на сжатие в среднем в десять раз превосходят напряжения на растяжение. Поэтому из соображений прочности необходимо выполнить предварительное нагружение пьезоэлемента при помощи упругой нагрузки (пружины, мембраны, стяжки и т.д.). Усилие предварительного нагружения обеспечивает гарантированное рабочее сжатие пьезоэлемента, при этом перемещение свободного конца пьезодвигателя естественно уменьшается.

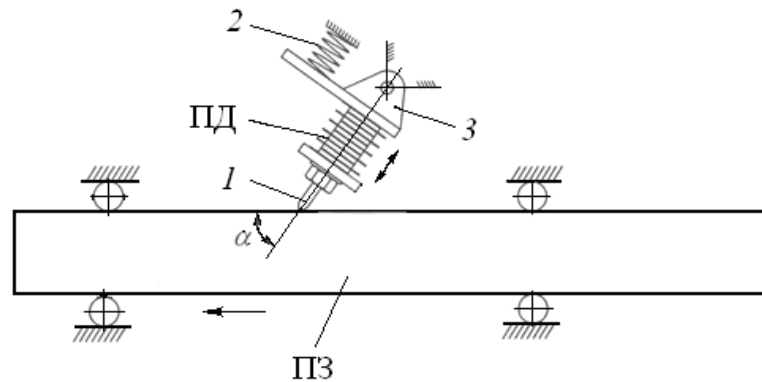


Рис. 1. Схема перемещения подвижного звена ПЗ с помощью пьезодвигателя ПД с продольной поляризацией методом косых соударений:

1 – контактный наконечник; 2 – пружина для поджима ПД к ПЗ;
3 – кронштейн для крепления ПД

Пьезоэлементы в блоке ПД электрически соединены параллельно, что позволяет увеличить амплитуду продольных колебаний пьезодвигателя.

Пьезодвигатели с косыми соударениями и двумерными колебаниями

Эти двигатели базируются на суммировании тангенциальных составляющих ударного импульса. Двумерное движение пьезокерамического преобразователя определяет и нормальную и тангенциальную составляющие скорости удара. В обобщенном случае двумерное движение колеблющегося звена может быть представлено любой комбинацией продольных, поперечных, изгибных, крутильных и других колебаний. Наиболее распространены схемы с продольно-изгибными, продольно-крутильными и радиально-крутильными колебаниями.

Рассмотрим случай, когда вектор электрического поля **E** перпендикулярен плоскости изгибных колебаний (рис. 2, а).

Продольные и изгибные колебания возбуждаются подачей напряжения резонансной частоты на различные электроды. Если соблюдать условие равенства собственной частоты основной формы продольных колебаний и частоты второй формы изгибных колебаний, то можно осуществить независимое возбуждение этих колебаний и тем самым обеспечить выбор оптимальных амплитудных и фазовых соотношений между отдельными компонентами колебаний в зоне контакта.

На рис. 2, а электрод $\mathcal{E}_{пр}$ служит для возбуждения продольных колебаний, а электроды $\mathcal{E}_{из}$ и $\mathcal{E}'_{из}$ (при сдвиге фазы на π) – изгибных колебаний. Оптимальные законы двумерных колебаний можно обеспечить и путем возбуждения связанных колебаний обоих типов, что упрощает схему питания преобразователя. При контакте ПКП с подвижным звеном ПЗ (например с кареткой КС) последнее будет перемещаться с шагом примерно 0,1 мкм, равном амплитуде колебаний ПКП (рис. 2, б).

Реверс движения ПЗ происходит при смещении фаз изгибных колебаний на угол π путем переключения с электродов $\mathcal{E}_{из}$ на электроды $\mathcal{E}'_{из}$. Шаг перемещения подвижного звена может быть рассчитан по формуле

$$s = \left(\frac{a_n}{2} + \frac{a_n^2}{2gf_3} \right) \tau^2,$$

где a_n – начальное ускорение ПЗ; g – ускорение свободного падения;

f_y – эффективный коэффициент трения при затухании колебаний;

τ – продолжительность импульса питания.

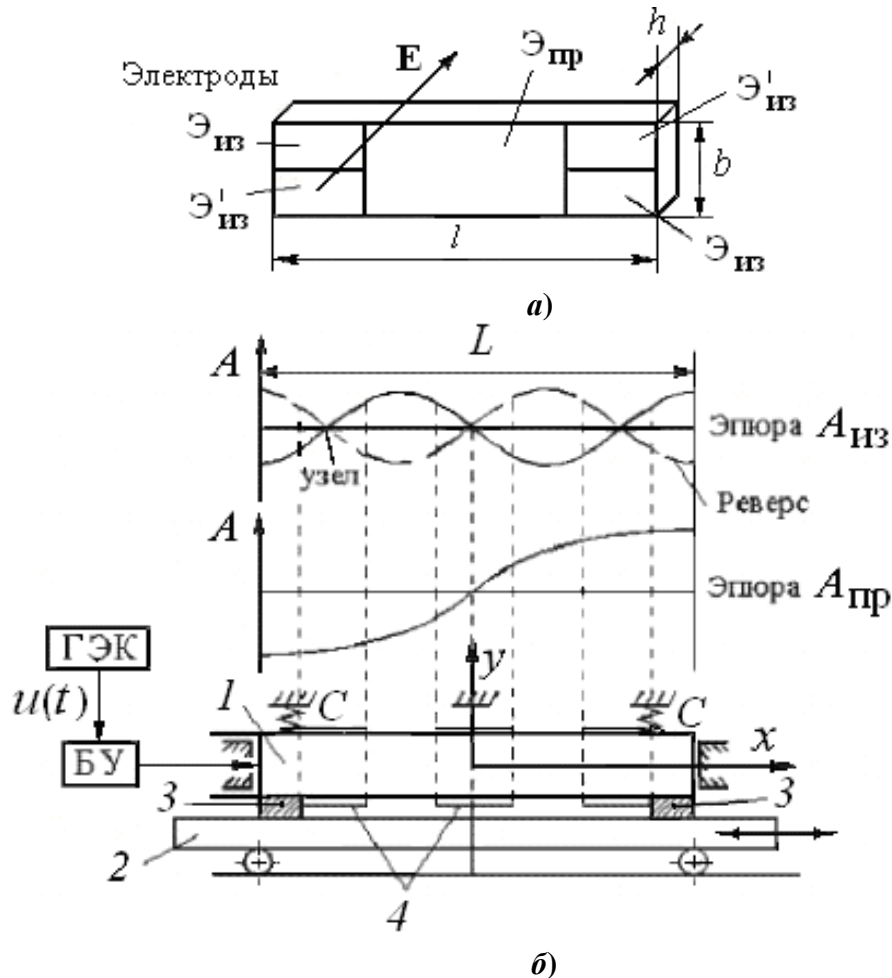


Рис. 2. Схемы пьезокерамического преобразователя с двумерными колебаниями (а) и непрерывного перемещения подвижного звена ПЗ методом косых соударений (б):

1 – ПКП; 2 – ПЗ; 3 – зоны контакта ПКП с ПЗ; 4 – электроды; ГЭК – генератор электрических колебаний; БУ – блок управления; $u(t)$ – переменное напряжение; $A_{из}$, $A_{пр}$ – амплитуды изгибных и продольных колебаний соответственно; $\mathcal{E}_{пр}$, $\mathcal{E}_{из}$ – электроды для возбуждения продольных и изгибных колебаний соответственно

Суммарная тангенциальная составляющая ударного импульса, согласно гипотезе вязкого трения, не зависит от нормальной составляющей и определяется коэффициентом мгновенного трения при ударе f_y , зависящим от свойств и состояния контактирующих поверхностей.

Снижение неравномерности движения подвижного звена осуществляется управлением коэффициентом f_y в зоне контакта путем наложения на ПКП более высоких частот, чем основная резонансная частота (рабочая). Кривая зависимости f_y от напряжения U , подводимого к ПКП, показывает, что диапазон изменения f_y достаточно широк (рис. 3, а).

Эффективность действия колебаний в зоне контакта оценивается коэффициентом k_3 ($0 \leq k_3 \leq 1$). Для точечных и линейных контактов $k_3 < 1$, а для поверхностных контактов $k_3 \approx 1$. Зависимость k_3 от амплитуды A тангенциальных и нормальных колебаний показана на рис. 3, б.

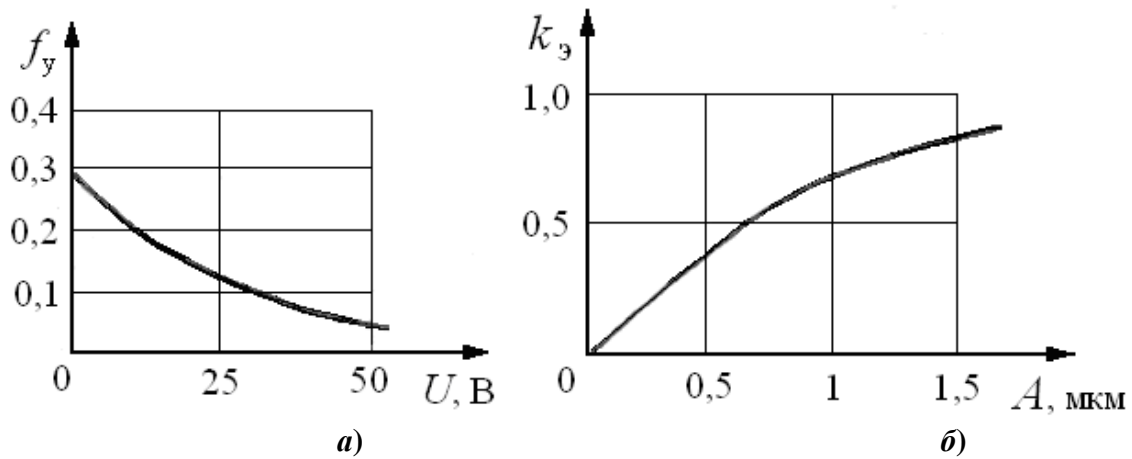


Рис. 3. Зависимости коэффициента мгновенного трения при ударе f_y от подводимого напряжения U (а) и коэффициента эффективности колебаний k_3 в зоне контакта от амплитуды A тангенциальных и нормальных колебаний (б)

Место крепления ПД определяется наличием хотя бы одного узла в эволютах колебаний обоих типов. Изменение знака скорости (реверс) подвижного звена производится изменением фазы одной из компонент колебаний с φ до $\varphi + \pi$.

Шаговое перемещение ПЗ осуществляется за счет возбуждения в ПКП пакетов импульсов ВЧ-колебаний.

Схема ПД с продольно-изгибными колебаниями используется и для организации вращательного движения подвижного звена (ротора).

Волновые ПД основаны на фрикционном взаимодействии колебаний типа бегущих волн ПД и ротора, которые обычно возбуждаются в регулярных структурах (по типу волновых фрикционных передач). В кольцевом ПД (волноводе) возбуждаются изгибные колебания типа бегущей волны амплитудой A_b с помощью двух напряжений одинаковой частоты, смещенных по фазе на угол $\varphi = \pi/2$.

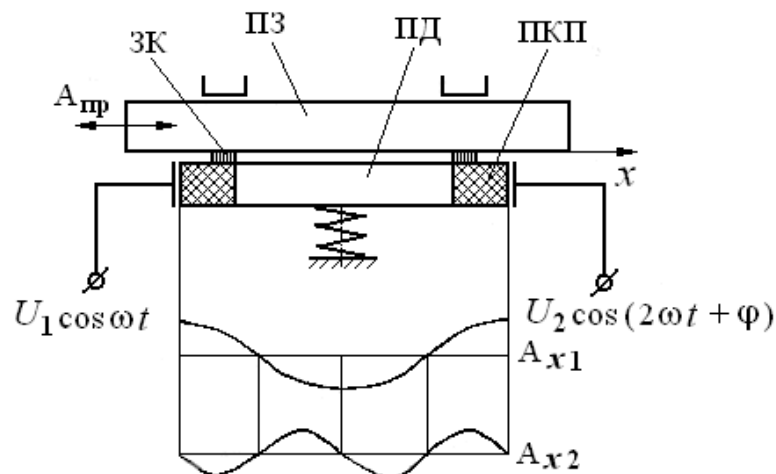


Рис. 4. Схема ПД с асимметричными циклами колебаний:

ЗК – зона контакта; ПЗ – подвижное звено; ПД – пьезодвигатель; ПКП – пьезокерамический преобразователь; $A_{пр}$ – амплитуда продольных колебаний; A_{x1} , A_{x2} – эволюты амплитуд продольных колебаний; U_1, U_2 – питающие напряжения, возбуждающие продольные колебания кратных резонансных частот; ωt – фазовый угол; φ – угол сдвига по фазе

ПД с асимметричными циклами колебаний основаны на асимметрии инерционных воздействий сил сухого трения или нелинейной скорости деформации упругого тела (ПЭ). В ПД возбуждают продольные или крутильные колебания с асимметрией ускорения в пределах одного цикла, причем в зоне контакта, как правило, возникает проскальзывание.

В этой схеме имеет место нелинейная зависимость сил сухого трения от скорости перемещения подвижного звена или инерционных воздействий. Реализация асимметричных колебаний осуществляется путем суперпозиции продольных колебаний кратных резонансных частот со сдвигом фаз между ними на угол φ (рис. 4).

Эти ПД уступают рассмотренным типам пьезодвигателей по КПД и скорости, но позволяют достигать меньшей дискреты шагового перемещения (2 нм в линейном приводе).

ПД с управляемой связью в зоне контакта

В качестве связи между ПД и подвижным звеном используют материалы с управляемым коэффициентом трения, например магнито- и электровязкие жидкости, и материалы, меняющие свою вязкость в УЗ поле.

ПД с управляемой связью обычно применяют в качестве нагрузочных устройств при исследовании динамических свойств системы.

Шаговый ПД, работающий по принципу «червяка»

Рассмотрим шаговый ПД, состоящий из трех пьезокерамических колец 1–3, насаженных на стержень и имеющих разное направление поляризации (рис. 5).

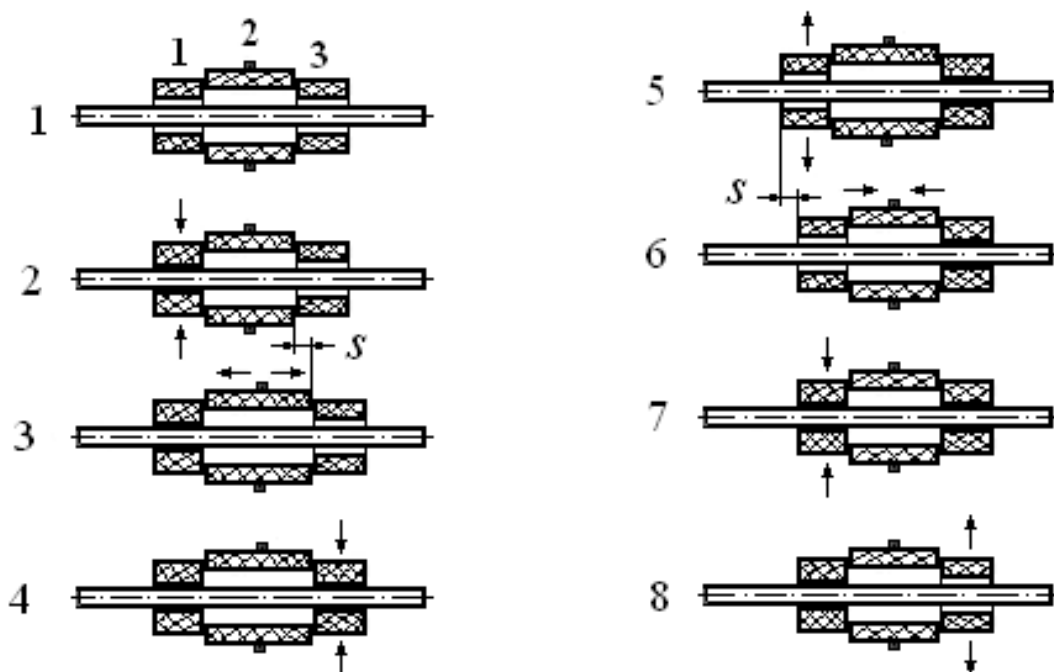


Рис. 5. Схема действия шагового ПД по принципу «червяка»:

1, 3 – кольца, поляризованные поперечно; 2 – кольцо, поляризованное продольно;
S – шаг ПД

Все кольца соединены в единый узел. В начальный момент времени (поз. 1) подается напряжение на первое кольцо, поляризованное поперечно. Оно деформируется радиально, сжимая стержень (поз. 2). Затем подается напряжение на второе кольцо с продольной поляризацией, которое под действием электрического поля увеличивается в длину, сдвигая третье кольцо вправо (поз. 3). После этого подается напряжение на третье кольцо, которое, подобно первому, обжимает стержень (поз. 4).

Следующим шагом с первого кольца снимается напряжение, оно возвращается в исходное состояние (поз. 5), а на втором кольце меняют полярность электрического поля, благодаря чему оно продольно сжимается, увлекая за собой первое кольцо вправо (поз. 6). После того, когда второе кольцо максимально уменьшит свою длину, происходит зажим стержня первым кольцом (поз. 7) и снимается напряжение с третьего кольца, которое возвращается в исходное состояние (поз. 8). Затем процесс повторяется.

ПД с ударным механизмом

Принцип действия: в ПД формируется сила удара F_y , которая превосходит силу трения покоя F_T и силу инерции $F_{и}$ подвижного звена:

$$F_y > F_T + F_{и}$$

Выводы

Представлены принципиальные схемы пьезодвигателей, работающих на основе обратного пьезоэффекта с высокочастотными пьезокерамическими преобразователями. Приведены основные технические характеристики пьезодвигателей и даны рекомендации по их применению в системах точного позиционирования, в том числе в нанометрическом диапазоне, исключая громоздкую классическую схему «двигатель – редуктор – тяговая пара «винт-гайка»».

Библиографический список

1. **Афонин, С.М.** Структурно-параметрическая модель составного пьезо-двигателя наноперемещений // Вестник машиностроения. 2007. № 1. С. 3–13.
2. **Иванов, А.А.** Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки / А.А. Иванов. – М.: ФОРУМ, 2011. – 224 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

A.A. Ivanov

SYSTEM DRIVES OF EXACT POSITIONING ON THE BASIS OF THE REVERSE PIEZO EFFECT

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

Purpose: Employment of piezoelectrics as converters that is engines with electric input and mechanical output is considered.

Methodology: A theoretical framework is proposed based on the results of the experimental investigations of piezoconverters with longitudinal polarization. Subsequently constructive schemes of piezoengines with oblique co-strokes and oscillations in both directions are quoted. For example different combinations of longitudinal, lateral and curved oscillations are used.

Findings: It is possible to accomplish independent excitement of these oscillations if frequencies of proper longitudinal oscillations are equal to the second form of curved oscillations.

Consequently the choice of optimal amplitude and phase correlations between separate components of oscillations in the contact zone.

Research limitations/implications: The study tested different principal schemes of piezoengines. As a result, some recommendations are given how to use these schemes in exact positioning systems including a nanometric range. Moreover the bulky classic scheme is eliminated in this case.

Key words: piezo engine, piezoceramic converter, reverse piezo effect.

УДК 658.58

С.А. Манцеров¹, А.Ю. Панов¹, И.Н. Шканов¹, А.И. Дмитриев²**ПЛАНИРОВАНИЕ РЕМОНТОВ И ПОСТАВОК ЗАПАСНЫХ ЧАСТЕЙ
ПО ДАННЫМ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ
ПО ПРОИЗВОДСТВУ УПАКОВОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
ОАО «Бумснаб»²

Цель: Анализ объема и сложности информации для ремонтных служб предполагает его сопоставимость с финансовой, экономической и технологической службами. Это позволяет решить проблемы организации подготовки ремонтов. Решением этих проблем является создание автоматизированной системы планирования ремонтов и поставка запасных частей.

Методология: Формирование структуры базы данных, обновление ресурсов на основе электронных карт и электронных графиков замены деталей.

Значение: Автоматизированная система планирования ремонта и поставки запчастей, оборудования могут быть внедрены в деятельность любого предприятия.

Ключевые слова: ремонт, техническое состояние, автоматизированная система.

В условиях современной экономики возникает необходимость в стратегическом и долгосрочном планировании развития промышленных предприятий, являющихся главной структурной составляющей экономики страны, определяющей ее будущее.

Важным моментом становится то, что в результате расширения рынков сбыта продукции возникает потребность в расширении ресурсной базы предприятия в целях удовлетворения возрастающих рыночных запросов. При этом необходимо связать воедино сильные стороны предприятия с точки зрения его ресурсов и уникальных технологических возможностей и потребности рынка в конечной продукции с учетом сопутствующих затрат.

Необходимость распределения ограниченных ресурсов ставит задачу стратегического управления и выбора оптимального долгосрочного плана развития, позволяющего получить максимальную прибыль для всего промышленного предприятия в современных рыночных условиях на обозримом горизонте планирования. При этом нужно учитывать как внутренние, технологические, так и внешние, рыночные, факторы, влияющие на предприятие.

Проблема оптимального управления промышленным предприятием является одной из ключевых как в рамках классической экономической теории, так и в работах современных отечественных и зарубежных ученых. Необходимо решить задачи определения состава и объемов продукции (с учетом функции спроса), а также состава и объемов производственных ресурсов с учетом инвестиций на их увеличение относительно первоначальных параметров некоторого предприятия так, чтобы его совокупная прибыль была максимальной.

Кроме того, важно использовать математические методы, приспособленные для решения данной специфической задачи, и информационные технологии, позволяющие автоматизировать процесс получения оптимального решения при значительной размерности исходных данных в приемлемые с точки зрения менеджмента сроки. При этом следует предусмотреть возможность интегрирования данной системы поддержки принятия решений в общую корпоративную информационную систему предприятия, загружая из нее исходные данные и возвращая управляющие воздействия, являющиеся следствием нахождения оптимального решения. Поэтому возникает задача управления, связанная с выбором вариантов производства, наиболее оптимальных, с учетом имеющихся ресурсов. Это становится особенно важным в контексте современных условий российской экономики с наличием крупных промышленных предприятий, построенных в свое время без учета реальных рыночных потреб-

ностей как внутри страны, так и на зарубежных рынках. Эти предприятия обладают значительным технологическим потенциалом, который, как правило, недоиспользуется или же используется недостаточно эффективно.

Одной из важнейших задач является планирование ремонтов и поставок запасных частей по данным технического состояния оборудования предприятия.

Анализ объемов и сложности информации в ремонтной службе позволяет вести речь о ее сопоставимости с бухгалтерской, экономической и технологической, а в части сложности методов решения задачи ремонтной службы зачастую превосходят другие задачи предприятия. Например, построение образа оборудования, балансировка производственно-номенклатурного плана по изготовлению запчастей и др. Это позволяет видеть проблемы ручной подготовки ремонтов, стоящие перед организационным персоналом.

Одним из путей решения этих проблем является создание автоматизированной системы планирования ремонтов и поставок запасных частей по данным технического состояния оборудования предприятия. Общая схема системы показана на рис. 1.



Рис. 1. Схема автоматизированной системы планирования ремонтов и поставок запасных частей

Такая работа была проведена коллективом кафедры «Теоретическая и прикладная механика» НГТУ по договору с ОАО «Бумснаб». Целью работы являлось создание автоматизированной системы планирования ремонтов и поставок запасных частей, расходных материалов, сырья и энергоносителей в соответствии с номенклатурным списком, по данным технического состояния оборудования предприятия.

Техническое обследование производственного оборудования, определение номенкла-

туры деталей и узлов, а также энергоносителей, включаемых в план ремонтов, определили следующую номенклатуру основных узлов, деталей и расходных материалов, в отношении которых необходимо осуществлять планирование ремонтов, в структурном виде следующих уровней:

- уровень 1. Предприятие по производству упаковки;
- уровень 2. Производственные цеха: цех гофрокартона и цех упаковки;
- уровень 3. Технологические линии;
- уровень 4. Технологическое оборудование;
- уровень 5. Технологические узлы в сборе;
- уровень 6. Детали и комплектующие;
- уровень 7. Расходные материалы.

Осуществлена электронная паспортизация деталей и узлов производственного оборудования в соответствии с номенклатурным списком. Формирование структуры баз данных, уточнение вычислительных ресурсов осуществлялось на основе следующих основных форм:

- электронная карта (табл. 1);
- чертеж детали (рис. 2);
- электронный график замены деталей (рис. 3).

Таблица 1

Клеесъемный вал двойной клеевой машины

Поле	Значение
Цех	Цех №1
Комплекс	Линия ЛЕЙЕР
Станок	Двойная клеевая машина
Деталь	Вал клеесъемный
Извещение	Извещение о замене конструкции или поставщика
Место заказа	Наименование предприятия-поставщика
Факт замены Причина Дата	Физический износ 12.01.05

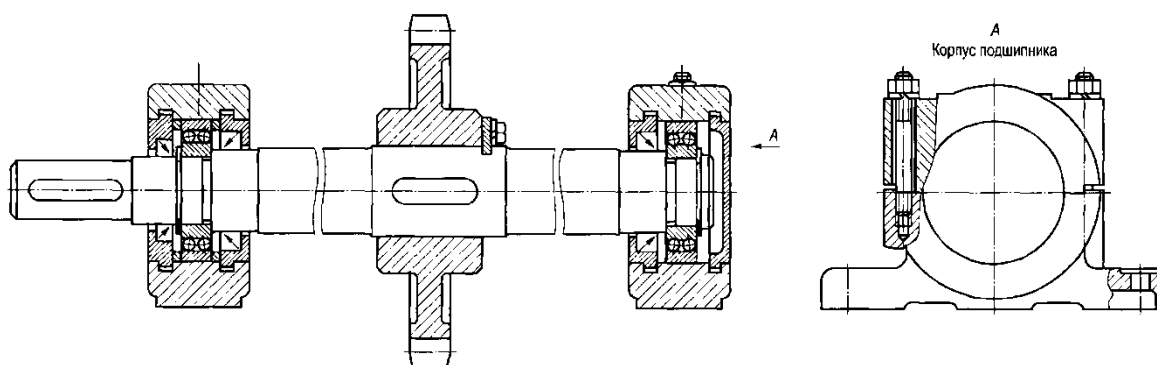


Рис. 2. Вал клеесъемный двойной клеевой машины



Рис. 3. График замены клеесъемного вала

Структура АСУ включает в себя центр сбора и обработки данных, оборудование каналов связи и передачи данных по состоянию производственного оборудования в центр сбора и обработки данных, а также оборудование хранения и отображения полученных данных.

АСУ является двухуровневой автоматизированной системой учета состояния оборудования с централизованным управлением и распределенной функцией внесения изменений:

- система управления базами данных (СУБД) на основе MSSQL 2005 (сервер);
- клиентское приложение, с разделением уровней прав доступа (пользователь, администратор).

Сервер АСУ обеспечивает сбор и хранение текущего состояния оборудования, диагностику состояния, подготовку отчетов. В состав АСУ входят сервер, технические средства для организации локальной вычислительной сети и оборудование клиентских мест (ПК для пользователей). Сбор информации со второго уровня производится постоянно, по мере внесения изменений в БД. Система функционирует в круглосуточном режиме. Надежность АСУ в целом зависит от надежности применяемых средств учета электроэнергии, средств связи, компьютерной техники.

Целостность и корректность информации АСУ, хранящейся на сервере, сохраняется при отключении электропитания. После восстановления электропитания обеспечена процедура восстановления требуемого объема информации.

Компьютер и периферийные устройства, входящие в состав АСУ, подключены к защитному заземлению, выполненному в соответствии с требованиями ГОСТ 12.2.007.0 и ГОСТ 25861. АСУ объекта включает техническое и программное обеспечение.

Система имеет возможность наращивания перечня решаемых задач и объема циркулирующей в ней информации при поэтапном ее развитии.

В состав технического обеспечения АСУ входят:

- технические средства вычислительного комплекса;
- технические средства сервера.

К техническим средствам вычислительного комплекса относятся:

- коммуникационное оборудование для информационного взаимодействия между клиентскими местами и сервером;

К техническим средствам сервера относятся:

- средства вычислительной техники;
- коммуникационное оборудование для информационного взаимодействия между АСУ и внешними информационными системами.

При этом сервер обеспечивает:

- сбор информации по текущему состоянию объектов и результатов измерений со всех счетчиков и вычислителей, обслуживаемых данным сервером;
- контроль достоверности поступающей информации;
- хранение результатов измерений, состояний объектов;
- ведение нормативно-справочной информации;
- ведение журналов событий;
- формирование отчетных документов;
- возможность передачи результатов измерений, состояний объектов и нормативно-справочной информации (предоставления доступа к информации) другим потребителям информации;
- безопасность хранения данных и программного обеспечения;
- конфигурирование и параметрирование технических средств и программного обеспечения;
- предоставление пользователям и эксплуатационному персоналу регламентированного доступа к визуальным, печатным и электронным данным;
- диагностику работы технических средств и программного обеспечения.

Аппаратное обеспечение сервера имеет следующие характеристики:

- центральный процессор с тактовой частотой не менее 2 ГГц;
- оперативная память (ОЗУ) не менее 2 Гб;
- дисковое пространство не менее 160 Гб;
- сетевые интерфейсы не менее 2 шт.

Сервер имеет защиту от несанкционированного доступа как в аппаратной части (разъём, функциональным модулям и т.п.), так и в программно-информационном обеспечении.

Обеспечено параметрирование (установка настраиваемых параметров) при первоначальной установке, после вывода из ремонта, в процессе эксплуатации самого сервера и при изменении коммуникационных параметров.

Напряжение питания сервера от сети переменного или постоянного тока 110, 220 В с допустимым отклонением напряжения в пределах + 20%. Сервер имеет резервный источник питания и обеспечивает автоматическое переключение на резервный источник питания при исчезновении основного питания и обратно.

Программное обеспечение АСУ имеет русифицированный интерфейс пользователя, включая вспомогательные и сервисные функции. Каналы связи настроены на скорость передачи данных не менее 100 Мбит/с.

Архитектура программного обеспечения, используемого в АСУ, обеспечивает соблюдение принципов взаимодействия открытых систем.

- решение пользовательских и технологических комплексов задач;
- замену, включение новых и удаление старых компонентов в процессе развития и совершенствования системы;
- информационный обмен с внешними информационными системами;
- управление базами данных учета электроэнергии;

- защиту от несанкционированного доступа к информационным и программным ресурсам системы;
- технологические (сервисные) функции (архивацию данных, антивирусную защиту, обслуживание файлов системы и т.д.).

Дистрибутивное программное обеспечение АСКУ ТЭР хранится на внешних носителях с инструкцией и программой инсталляции.

Общесистемное программное обеспечение включает следующие компоненты:

- операционные системы (Microsoft Windows Server 2003);
- системы управления базами данных (СУБД MSSQL 2005);
- клиентские места, с установленной операционной системой Microsoft Windows (2000, XP, Vista) и пакетом NET Framework;
- телекоммуникационные программные средства;
- средства поддержки стека протоколов TCP/IP;
- программные средства защиты от несанкционированного доступа;
- сервисные программные средства (драйверы, архиваторы, редакторы, генераторы отчетов и т.д.).

Система управления базами данных предоставляет возможность ведения журналов регистрации событий с фиксацией:

- идентификации пользователей базы данных;
- внесенных изменений с привязкой к системному времени и пользователю;
- списка сформированных отчетных документов.

В состав программного обеспечения должны входить следующие программные средства:

- для учета технологического оборудования линий и комплектующих;
- ведения журналов событий;
- контроля достоверности изменений;
- замещения данных;
- регламентации доступа к информации;
- формирование архивов информации;
- предоставления информации;
- контроля функционирования АСУ и ее компонентов.

ПО АСУ обеспечивает групповую и индивидуальную настройку интерфейсных элементов, а также возможность одновременной работы пользователей с нескольких рабочих мест.

Персонал АСУ составляет администратор БД, администратор сети, пользователи системы.

Автоматизированная система планирования ремонта и поставок запасных частей оборудования была в тестовом режиме внедрена в деятельность ОАО «Бумснаб».

Библиографический список

1. **Манцеров, С.А.** Создание автоматизированной системы планирования ремонтов и поставок запасных частей по данным технического состояния оборудования предприятия / С.А. Манцеров, А.Ю. Панов, И.Н. Шканов // Будущее технической науки: сб. мат. X Международной молодежной научно-технической конференции. – Н. Новгород, 2011. С. 103.
2. **Панов, А.Ю.** Создание единого информационного пространства жизненного цикла продукции машиностроительного кластера на основе принципов CALS-технологий / А.Ю. Панов [и др.] // Клуб 3D Инновационное проектирование. – Н.Новгород: ЛИТЕРА – 2011. №4. С. 88-95.
3. **Манцеров, С.А.** Создание баз данных объектов машиностроения на основе формул функциональной систематики // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2007. №11. С. 171– 76.

4. Манцеров, С.А. Структурная систематика единого информационного пространства машиностроительного кластера / С.А. Манцеров, А.Ю Панов // Вестник ВГТУ / ВГТУ. Воронеж. 2008. №1 С. 37–42.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

S. Mantserov¹, A. Panov¹, I. Shkanov¹, A. Dmitriev²

**PLANNING OF REPAIRS AND SPARE PARTS SUPPLY ACCORDING
TO THE TECHNICAL STATE OF EQUIPMENT OF ENTERPRISE PRODUCING
PACKAGING PRODUCTS**

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
JSC «Bumsnab»²

Purpose: Analysis of the volume and complexity of information for rebuild service assumes its comparability with the financial, economic and technological services. For example, the construction of the equipment image, balancing of manufacturing and nomenclatural plans of producing spare parts, etc. This allows seeing the problems of manual preparation of repairs. Solution to these problems is to create computer-aided system of planning of repairs and spare parts supply.

Methodology: Formation of the structure of databases, updating computing resources was based on electronic maps, detail drawing and electronic schedule of replacement of parts.

Value: Computer-aided system of planning of repair and spare parts supply of the equipment could be introduced in the activity of any enterprise.

Key words: repair, technical state, computer-aided system.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.58

М.А. Большухин, А.В. Будников, В.И. Фомичев, Д.Н. Свешников, Р.И. Романов

АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ РАЗВИТИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ БАЗЫ ДАННЫХ ДЛЯ ВЕРИФИКАЦИИ CFD ПРОГРАММ ПРИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИИ В АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКЕ

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Рассматриваются актуальные вопросы использования программ вычислительной гидродинамики (CFD) в атомной энергетике, проблемы верификации и отработки технологии их использования на основе верификационных экспериментов. В качестве верификационных экспериментов рассматриваются эксперименты по смешению потоков, характеризующихся существенным влиянием сил плавучести, обусловленных разностью плотностей неравномерно прогретой жидкости, как наиболее актуальных для атомной энергетике. Представлено краткое описание проводимых экспериментов и выполненных на их основе верификационных расчетов и сделан вывод о конкретных результатах адаптации и верификации CFD к решению практических задач расчетного обоснования отдельных элементов конструкции и сложных режимов работы реакторных установок.

Ключевые слова: вычислительная гидродинамика, смешение, конвекция, верификация cfd, вихреразрешающие модели.

В последнее десятилетие в атомной энергетике широко внедряются программы трехмерного теплогидравлического расчета (CFD). Актуальность применения CFD программ подтверждается большим числом научных российских и зарубежных публикаций и рядом специализированных научных конференций, посвященных этой теме. К наиболее значимым и представительным в этой области можно отнести работы, координируемые в рамках OECD/NEA (OECD / Nuclear Energy Agency) – в Европе, и в рамках программы CASL (Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors) – в США.

В частности, начиная с 2002 года, OECD/NEA проводит ежегодные конференции CFD4NRS (CFD for Nuclear Reactor Safety), посвященные задачам и проблемам использования CFD программ в атомной энергетике. На этих конференциях методом экспертной оценки определяются наиболее приоритетные цели использования CFD программ и проблемные вопросы, которые необходимо решить для достижения поставленных целей.

К наиболее приоритетным целям использования CFD программ международные эксперты относят:

- моделирование процессов перемешивания потоков с разными температурами или потоков, отличающихся концентрацией борной кислоты в камерах реактора;
- моделирование процессов термоциклического нагружения элементов конструкций;
- моделирование стратифицированных течений в горизонтальных или слабо-наклоненных трубопроводах;
- расчет концентраций водорода и аэрозолей в помещениях защитной оболочки.

Обобщив перечисленные цели, можно констатировать, что приоритетным направлением использования CFD программ в атомной энергетике является моделирование процессов

смешения потоков, характеризующихся существенным влиянием сил плавучести, обусловленных разностью плотностей неравномерно прогретой жидкости.

Интересно отметить: несмотря на то, что история успешного применения коммерческих CFD программ насчитывает уже несколько десятилетий, накоплен огромный положительный опыт их применения в авиации, автомобиле-, ракетостроении, возможность их использования для поставленной цели появилась относительно недавно, вслед за развитием относительно дешевых и доступных высокопроизводительных многопроцессорных вычислительных ресурсов (суперЭВМ). Указанная особенность объясняется следующим образом.

Традиционно в CFD программах решаются не исходные, а усредненные по Рейнольдсу уравнения Навье-Стокса (RANS). Усреднение по Рейнольдсу предполагает разложение всех, входящих в уравнение Навье-Стокса переменных на среднюю во времени и пульсационную (хаотически изменяющуюся) составляющие. Решение записывается для средних во времени составляющих, а влияние на средние характеристики потока пульсационных составляющих описывается моделями турбулентности, в которых обычно предполагается, что это влияние может быть описано введением дополнительной *турбулентной* вязкости. Процессы теплопереноса (или переноса другой *скалярной* переменной) моделируется на основании предположения о тепловой и гидродинамической аналогии.

Развитие моделей турбулентности, основанных на использовании RANS подхода, позволило на несколько порядков снизить размерности задач по сравнению с методом прямого моделирования уравнений Навье-Стокса (DNS), что и обеспечило возможность широкого применения CFD программ для решения ряда практических задач.

Описанный RANS подход хорошо зарекомендовал себя и при описании процессов переноса в турбулентном пограничном слое, но оказался неработоспособным при моделировании процессов смешения в центре потока (так как в соответствии с гидродинамической аналогией малость градиентов скоростей в ядре потока должна приводить к малости параметров, характеризующих смешение потоков). А высокая турбулентная вязкость, характерная для RANS подхода, препятствует возникновению вихревых движений в центре потока.

Альтернативой RANS подходу, снимающей ограничения на корректность моделирования процессов смешения в потоке, является использование так называемых вихререзающих методов. В этих методах исходная система уравнений и используемая в расчетах пространственно-временная дискретизация обеспечивают, как минимум, адекватное моделирование «крупных» вихрей в потоке («мелкие» вихри, размер которых меньше размера расчетной ячейки, и в этом подходе моделируются дополнительной, *подсеточной* вязкостью). Прямое моделирование крупных, энергонесущих вихрей обеспечивает корректное описание процессов смешения в потоке, но накладывает ряд дополнительных проблемных вопросов.

Во-первых, использование вихререзающих методов приводит к существенному росту (по сравнению с RANS подходом) размерности решаемых задач (величина этого роста составляет несколько порядков и зависит от конкретной вихререзающей модели). Причем даже на современном уровне развития средств вычислительной техники, строгое удовлетворение требований вихререзающих моделей к пространственно-временной дискретизации являются трудновыполнимым.

Во-вторых, для использования этих моделей требуется дополнительное задание (в дополнении к условиям RANS подхода) неочевидных начальных и граничных условий по пульсационным характеристикам потока.

Указанные проблемные вопросы по-разному решаются в различных вихререзающих моделях. Разнообразие этих моделей свидетельствует одновременно и о высокой актуальности задачи, и об отсутствии к настоящему времени универсального решения, пригодного для широкого класса задач.

Поэтому использование CFD программ в атомной энергетике невозможно без этапа

адаптации и верификации на представительных экспериментальных данных, причем адаптация и верификация CFD программ должны выполняться для каждого вновь возникающего класса задач.

С целью формирования базы представительных экспериментальных данных для верификации CFD программ в ОАО «ОКБМ Африкантов» создана специализированная гидродинамическая лаборатория. Для измерения нестационарных полей теплогидравлических параметров в лаборатории используются самые современные системы:

- тепловизор – для измерения полей температур (1, 2);
- лазер – для измерения полей скоростей в потоке.

Экспериментальные исследования с использованием лазера в лаборатории выполняются в тесном сотрудничестве с Институтом механики сплошных сред Уральского отделения РАН (ИМСС УрО РАН) (3). В частности, совместно с ИМСС УрО РАН был поставлен и проведен описываемый далее уникальный эксперимент по исследованию естественной конвекции в кубической полости со стороной $D=250$ мм, заполненной дистиллированной водой, подогреваемой снизу и охлаждаемой сверху (рис. 1).

В эксперименте поле скорости восстанавливалось с помощью метода цифровой трассерной визуализации (PIV), основанном на измерении перемещения полиамидных частиц нейтральной плавучести в плоскости лазерного светового ножа. Температурные пульсации регистрировались с помощью 11 дифференциальных медь - константановых термопар диаметром 0.2 мм.

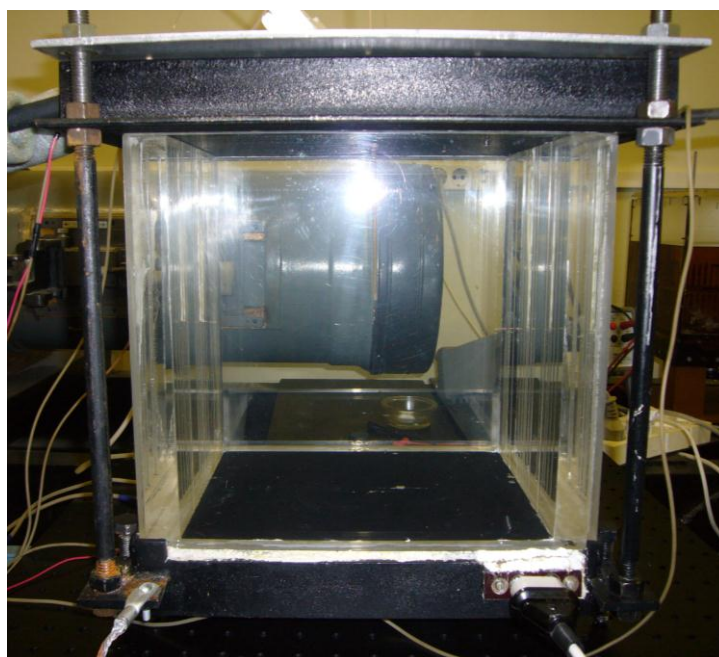


Рис. 1. Экспериментальная установка для исследования свободной конвекции

Были выбраны два экспериментальных случая, отличающиеся режимами крупномасштабной циркуляции: рассматривались задачи о конвекции в прямоугольных полостях с аспектным соотношением $\Gamma = 1$ (куб) и $\Gamma = 0.1$ (щель). Число Рэлея $Ra = 4.4 \cdot 10^9$, число Прандтля $Pr = 7$. Для численного моделирования конвекции использовался вихререзающий LES метод, при этом использовалась равномерная расчетная сетка, состоящая из 3 млн элементов для куба и 1.5 млн элементов для щели.

В результате сравнения расчетных и экспериментальных данных для куба отмечено, что расчет не только воспроизвел среднюю структуру потока, но и с хорошей точностью воспроизвел максимальные значения скорости (рис. 2).

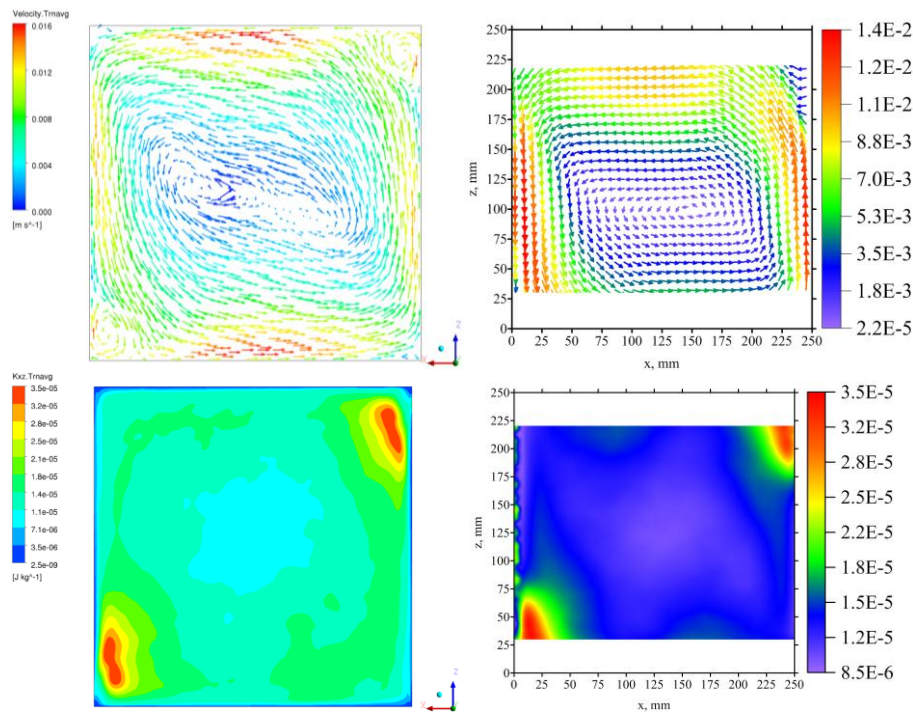


Рис. 2. Среднее поле скорости (наверху) и плотность энергии турбулентных пульсаций (внизу) в центральном вертикальном сечении кубической полости. Расчет (слева) и эксперимент (справа)

В случае тонкой щели (рис. 3) направление крупномасштабной циркуляции меняется многократно, выделенного направления нет и структура среднего поля становится более сложной. Значения средних скоростей становятся на порядок меньше и детальная картина поля скорости в расчете и эксперименте не столь похожа (в этом случае для хорошего совпадения нужны существенно большие времена осреднения), хотя качественное совпадение расчета и эксперимента есть и значения максимальных значений скорости также близки.

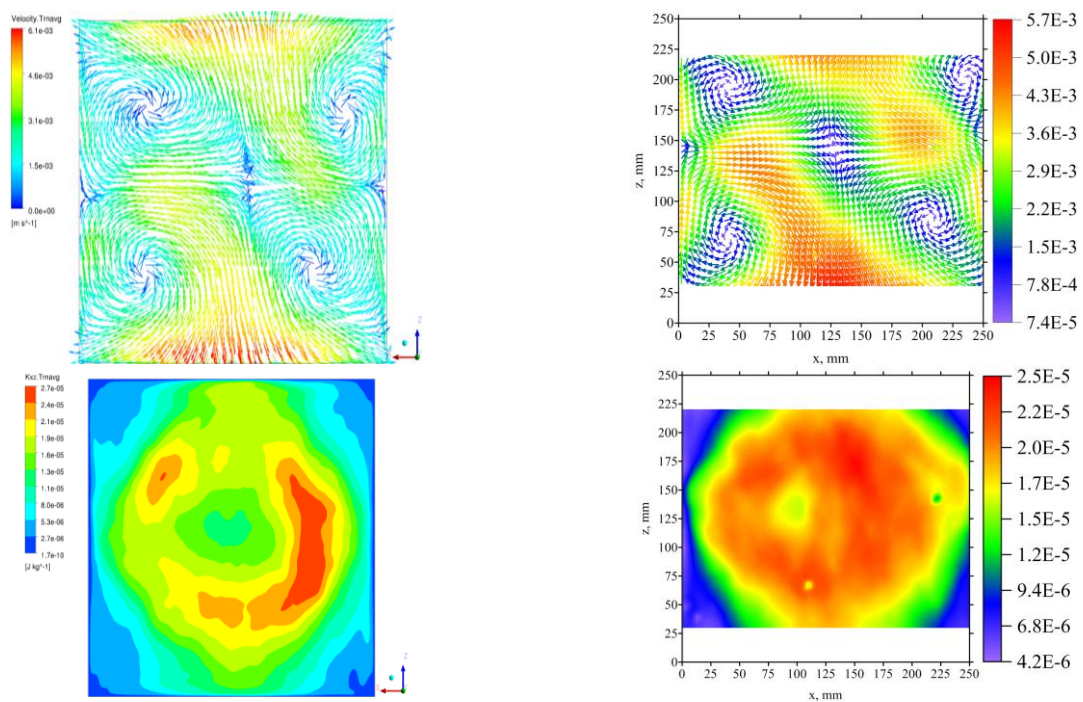


Рис. 3. Среднее поле скорости (наверху) и плотность энергии турбулентных пульсаций (внизу) в центральном вертикальном сечении щели ($\Gamma=0.1$). Расчет (слева) и эксперимент (справа)

Выполненные расчеты для двух случаев ($\Gamma=1$ и $\Gamma=0.1$) показали, что метод LES позволяет адекватно воспроизвести как среднее течение, так и пространственное и спектральное распределение турбулентных пульсаций.

Экспериментальные исследования смешения неизотермических потоков выполнены на модели Т-образного соединения, отличительной особенностью которого является форма подводящего трубопровода, которая позволяет в потоке перед входом в Т-образное соединение образовать крупный вихрь, закручивающий поток (рис. 4). На рис. 4 представлено поле температур, регистрируемое тепловизором, где отчетливо видна закрутка потоков в области смешения.

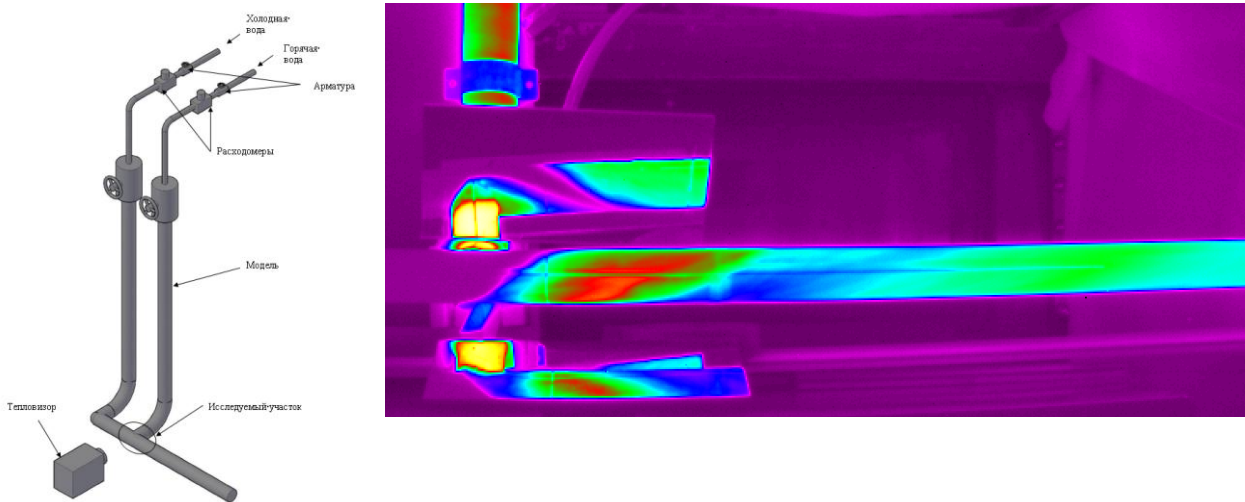


Рис. 4. Экспериментальная модель тройникового соединения и поле температур с закруткой потока в месте смешения, регистрируемое тепловизором

Большой интерес представляет проверка способности различных (RANS или SRS) подходов предсказать такую закрутку потока (рис. 5). Расчеты были выполнены с использованием структурированной гексаэдрической сетки, состоящей из 2 млн элементов, при этом характерный размер ячейки – 0.5 мм и среднее значение коэффициента $Y^+ \sim 30$.

Далее приведены поля температур в стенке, полученные экспериментально и в результате расчетов с использованием LES подхода для режима с расходом холодной и горячей воды по $G=1$ [$\text{м}^3/\text{ч}$], что соответствует скорости $V \sim 0,14$ м/с и температурами 17°C, 45°C холодной и горячей воды соответственно.

LES модель турбулентности позволяет предсказать закрутку потока, в отличие от RANS, тем самым учитывая предысторию потока перед смешением, что особенно актуально для расчетов реальных инженерных задач.

Несмотря на значительный потенциал собственных (выполняемых в ОАО «ОКБМ Африкантов») экспериментальных исследований, для верификации используются результаты экспериментов, выполненных по заказу ОАО «ОКБМ Африкантов» в научных организациях РФ. В частности, совместно с кафедрой гидроаэродинамики С.- Петербургского технического университета выполнены расчетные и экспериментальные исследования процессов естественной конвекции воздуха вблизи вертикальной нагретой пластины. Отличительной особенностью этого эксперимента является возможность одновременного (в одном эксперименте) исследования всех режимов естественноконвективного течения от: ламинарного до развитого турбулентного, вплоть до значения числа Грасгофа $4.5 \cdot 10^{11}$ (рис. 6).

Численное моделирование эксперимента проводилось с использованием технологии зонального LES моделирования, которая позволила существенно сэкономить вычислительные ресурсы за счет RANS моделирования областей, где неприципиально сеточное разрешение конвективных вихревых структур (рис. 7). Размерность сеточной модели при этом составила 2,8 млн элементов.

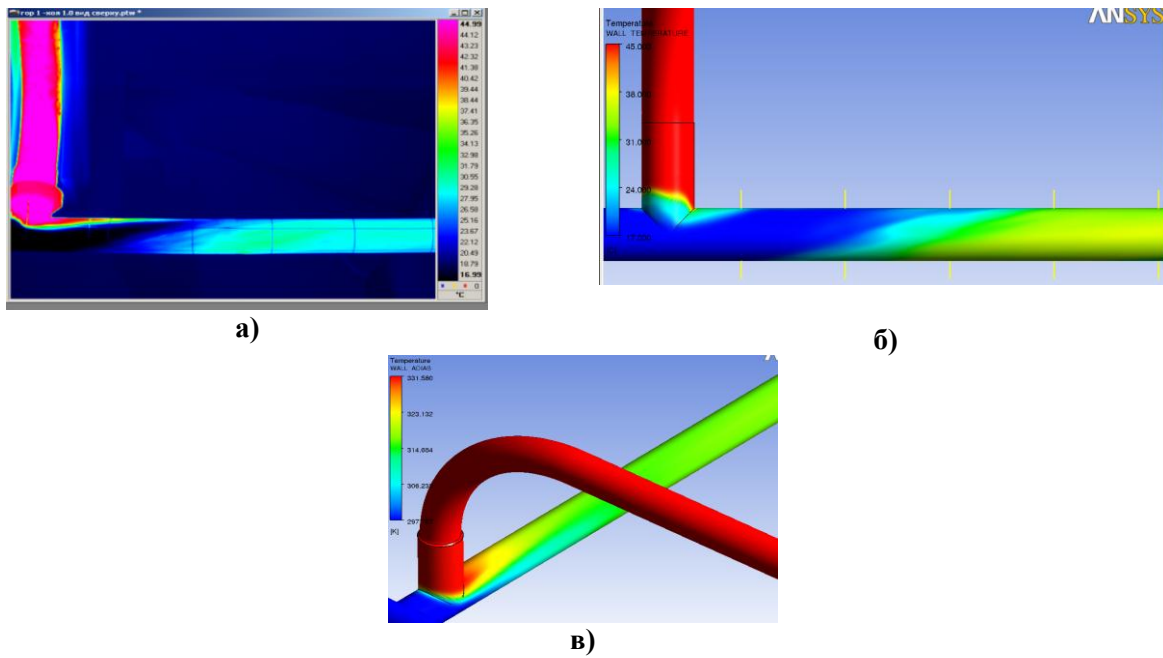


Рис. 5. Сравнение результатов расчета (RANS, LES) с экспериментом:
 а – эксперимент; б – расчет LES; в – расчет RANS

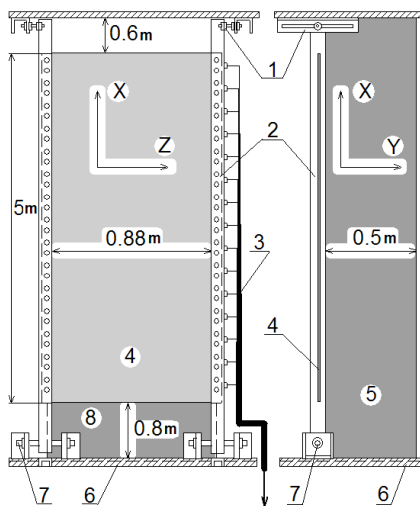


Рис. 6. Схема экспериментальной установки

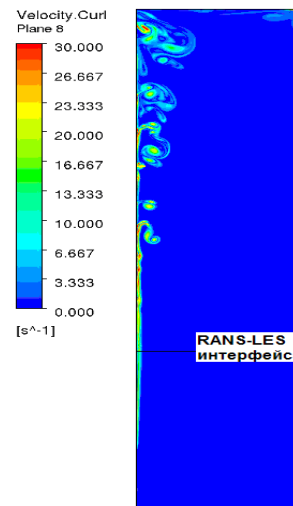


Рис. 7. Зарождение турбулентности на границе RANS – LES интерфейса и ее развитие в LES области

Большим преимуществом зонального LES моделирования является генерация статистических параметров RANS турбулентности на входе в LES область, тем самым обеспечивается возможность моделирования области перехода, в которой происходит генерация турбулентности.

Выполненные расчеты подтвердили, что только с использованием технологии зонального LES моделирования возможно моделирование представленного эксперимента.

Актуальной задачей атомной энергетики также является анализ процессов естественной конвекции в узких вертикальных щелевых зазорах (рис. 8), который по конструктивным особенностям соответствует единицам оборудования РУ – стойке ИМ СУЗ, узлу выхода охлаждающей воды и др. Отработка технологии расчетов данного типа конвективных течений в ОАО “ОКБМ Африкантов” проводится на экспериментальной модели щелевого зазора (рис. 8).

Нижнее основание кольцевого зазора непосредственно связано с объемом греющей среды (баком). На нижней поверхности бака поддерживается постоянная температура. Внутри внутренней трубы снизу вверх подается холодная вода.



Рис. 8. Экспериментальная установка

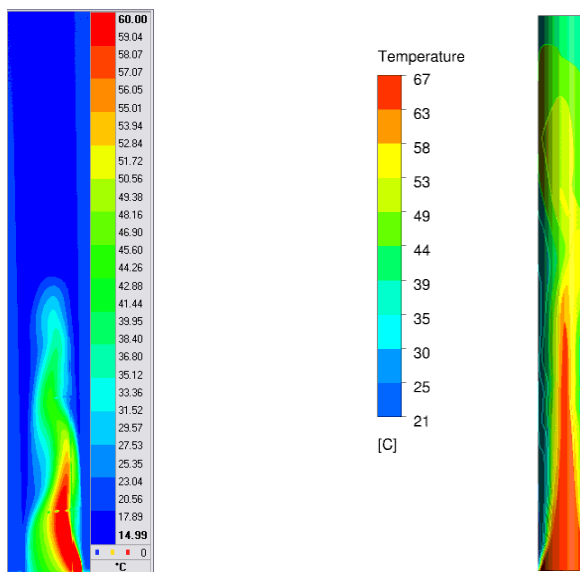


Рис. 9. Поле температур, полученное в эксперименте (слева), в расчете (справа)

В расчетах использовалась структурированная гексаэдрическая сетка размерностью около 6 млн элементов, при этом кольцевой зазор разбит на десять элементов по толщине. На рис. 9 представлены также поля температур на поверхности модели, полученные с использованием тепловизора и в результате расчета.

Отработка технологии расчетов стратифицированных течений проводилась на основе экспериментов по исследованию стратифицированных течений в наклонной трубе.

Экспериментальная установка стенда представляет собой сборку, состоящую из двух баков, соединенных между собой при помощи шаровых фланцев участком трубы прямоугольного сечения (рис. 10). Значения температур воды в баках во время эксперимента измеряется с помощью термодатчиков. Бак с горячей водой устанавливается на площадку подъемника, тем самым, благодаря установленным в баках шаровым фланцам, изменяя высоту установки рабочей площадки подъемника, изменяется угол наклона к горизонту исследуемого участка трубы.

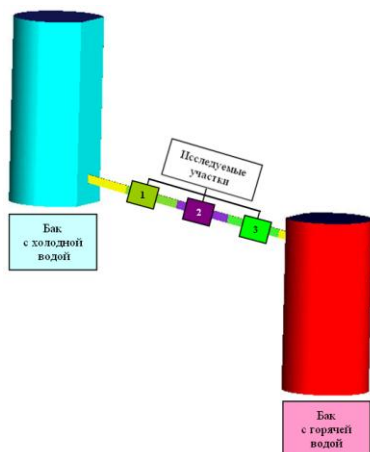


Рис. 10. Компьютерная модель стенда

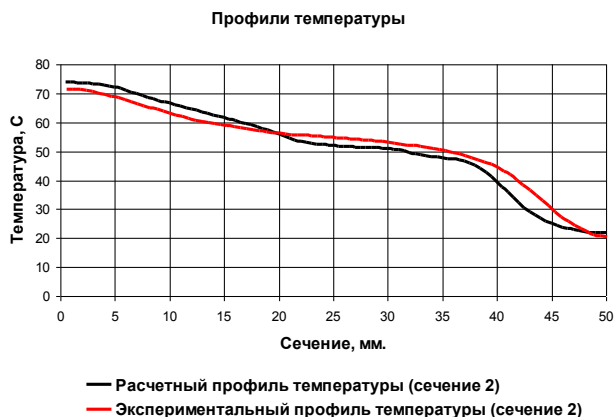


Рис. 11. Осредненные по времени экспериментальные и расчетные профили температур

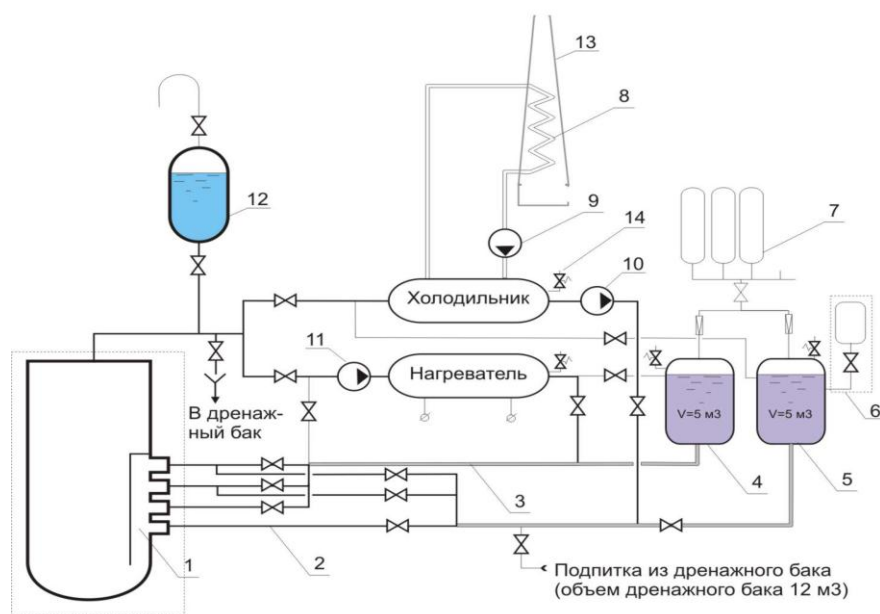
В эксперименте угол наклона трубы составляет 10° , температура холодной воды 18°C , температура горячей воды 82°C .

Сравнение экспериментальных и расчетных данных проведено по осредненным профилям температуры в сечениях. Видно, что в профиль температуры имеет выраженную “ступеньку” (рис. 11), довольно качественно предсказанную расчетом с использованием вихререзающих моделей турбулентности.

Логическим продолжением выполняемых верификационных исследований является создаваемый в Нижегородском техническом университете им. Р.А. Алексеева крупномасштабный стенд для исследования процессов смешения в реакторе.

Принципиальная схема стенда приведена на рис. 12. Создаваемый стенд позволит снять ограничения по величине масштабного фактора, присущие стендам и экспериментальным моделям гидродинамической лаборатории ОАО «ОКБМ Африкантов», и будет превосходить зарубежные аналоги. Измерения на стенде будут выполняться с использованием лазерных и тепловизионных методов, сеточных датчиков. Кроме того, предусмотрена возможность исследования на стенде влияния морской качки и статических наклонов на процессы смешения в реакторе, что представляет особую актуальность для установок транспортного назначения.

Схема стенда исследований смешения потоков



Характеристики стенда

Мощность нагревателя - 1.0 МВт
 Мощность холодильника - 1.0 МВт
 Максимальное давление - 1.0 МПа
 Максимальная температура - -160°C
 Диаметры основных трубопроводов горячей и холодной воды - 100 мм

Обозначения

1 - экспериментальная модель
 2 - контур холодной воды
 3 - контур горячей воды
 4 - сосуд с горячей водой
 5 - сосуд с холодной водой
 6 - система солеподготовки
 7 - система газа высокого давления (20 баллонов 40 л)
 8 - воздушный теплообменник
 9 - насос контура охлаждения (производительность 50 т/ч)
 10 - насос холодной воды (производительность 80 т/ч)
 11 - насос горячей воды (производительность 80 т/ч)
 12 - компенсатор давления (объем 1.2 м³)
 13 - тяговая труба контура воздушного охлаждения
 14 - предохранительный клапан

Рис. 12. Принципиальная схема стенда

Таким образом, в результате комплекса выполняемых в ОАО «ОКБМ Африкантов» расчетных и экспериментальных исследований получены конкретные результаты адаптации и верификации CFD к решению практических задач расчетного обоснования отдельных элементов конструкции и сложных режимов работы реакторных установок. Эти результаты подтверждают перспективность выбранного направления развития. В дальнейшем запланировано существенное расширение верификационных экспериментальных исследований.

Библиографический список

1. Пат. № 112409 «Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока», Патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов», 10.01.2012
2. Пат. № 126455 «Устройство для измерения температурного поля газового или жидкостного потока», Патентообладатель ОАО «ОКБМ Африкантов», 10.07.2012

3. **Большухин, М.А.** Об экспериментальных тестах (бенчмарках) для программных пакетов, обеспечивающих расчет теплообменников в атомной энергетике / М.А. Большухин [и др.] // Вычислительная механика сплошных сред. Т. 4, 5, октябрь – декабрь 2012. С. 469-481.
4. **Zboray, R.**, Manera A., Niceno B., Prasser H.-M.: Investigations on Mixing Phenomena in Single-phase Flows in a T-Junction Geometry. The 12th Int. Topical Meeting on Nuclear Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-12), Sheraton Station Square, Pittsburgh, Pennsylvania, U.S.A. September 30-October 4. 2007.
5. **Westin, J.** Thermal Mixing in a T-Junction. Model Tests at Vattenfall research and Development AB 2006. Boundary Conditions and List of Available Data for CFD-Validation, Report Memo U 07-26, Vattenfall R&D AB, Älvkarleby, Sweden. 2007.
6. **Prasser, H.-M.**, Grunwald, G. Höhne, T., Kliem, S., Rohde U., Weiss F.-P. Coolant mixing in a Pressurized Water Reactor: Deboration Transients, Steam-Line Breaks, and Emergency Core Cooling Injection, Nuclear Technology 143 (1). 2003. P. 37.
7. **Alavyoon, F.**, Hemström, B., Andersson, N. G., Karlsson; R. I.: Experimental and Computational Approach to Investigating Rapid Boron Dilution Transients in PWRs. CSNI Specialist Meeting on Boron Dilution Reactivity Transients, State College, PA, USA, October 18-20, (1995).

*Дата поступления
в редакцию 02.05.2013*

M.A. Bolshukhin, A.V. Budnikov, V.I. Fomichev, D.N. Sveshnikov, R.I. Romanov

PRESSING ISSUES OF EXPERIMENTAL DATABASE DEVELOPMENT TO VERIFY CFD CODES USED IN NUCLEAR POWER INDUSTRY

JSC “OKBM Afrikantov”

Purpose: Creation of experimental database, which can be used to verify CFD codes, is the binding requirement for their usage in nuclear power industry.

Design/ methodology/ approach: As the verification experiments, ones for flow mixing are analyzed, which are characterized by significant influence of buoyant forces due to the density difference of unevenly heated liquid, considered to be the most vital experiments for the nuclear power industry.

Findings: The paper presents short description of the carried out experiments and verification calculations performed on their basis, conclusion is drawn concerning specific results of CFD customization and verification to solve practical problems of justifying calculations for separate construction components and complicated modes of reactor plant operation.

Research limitations/implications: The present study is one of initial steps for providing a basis for CFD codes usage in nuclear power industry.

Key words: computational fluid dynamics, mixing, convection, cfd verification, scale-resolving simulations.

УДК621.039

С.С. Бородин¹, А.В. Варенцов¹, Д.В. Доронков¹, А.Н. Пронин¹, Г.Ш. Иксанова²

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ГИДРОДИНАМИКИ И МАССООБМЕНА ПОТОКА ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ В ФРАГМЕНТЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ РЕАКТОРА ВБЭР–300

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО «ОКБМ Африкантов»²

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в фрагменте активной зоны реактора ВБЭР-300

Ключевые слова: ядерный реактор, тепловыделяющая сборка, гидродинамика теплоносителя, перемешивающая решетка

Введение

В ОАО «ОКБМ Африкантов» разработан проект установки с водо-водяным реактором блочного типа мощностью 300 МВт. В данной реакторной установке используются бескожуховые ТВСА каркасной конструкции.

Для повышения критического теплового потока в конструкции ТВС применяются перемешивающие решетки (ПР), выполняющие функцию интенсификации теплообмена.

Одним из этапов обоснования теплотехнической надежности активной зоны является теплогидравлический расчет, требующий большой информативности, высокой достоверности параметров и значений локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя. Для получения этих данных необходим комплекс экспериментальных исследований по выявлению закономерностей и особенностей течения теплоносителя в активной зоне реактора.

Данные задачи решаются на базе НГТУ им. Р.Е. Алексеева в научно-исследовательской лаборатории «Реакторной гидродинамики» путем моделирования процессов течения потока теплоносителя в пучках труб на аэродинамическом стенде

Экспериментальный стенд

Экспериментальный стенд для исследований локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя представляет собой аэродинамический разомкнутый контур, через который прокачивается воздух (рис. 1).

Во время работы стенда воздух посредством вентилятора высокого давления нагнетается в ресиверную емкость, далее проходит успокоительный участок, экспериментальную модель и выбрасывается в атмосферу. Для изучения межъячеечного массообмена в экспериментальной модели применяется метод диффузии примесей [1].

Данный метод основан на регистрации поперечного потока массы по некоторой переносимой субстанции (краски, соли, газа и т.д.). В качестве примеси выбран пропан, поскольку он обладает наиболее близкими к воздуху свойствами, возможностью быстрой и достаточно точной регистрации, что позволяет получать большие объемы данных в ограниченное время. Пропан подается в характерную ячейку пучка твэлов, после чего отслеживается его распространение по сечениям и длине экспериментальной модели (ЭМ).

Экспериментальная модель представляет собой фрагмент активной зоны реактора ВБЭР-300, включающей в себя сегменты трех топливных кассет ТВСА и межкассетное пространство (рис. 2). Модель выполнена в полном геометрическом подобии и состоит из: твэ-

лов-имитаторов, направляющих каналов (НК), уголков жесткости, поясов дистанционирующих решеток (ДР) и перемешивающих решеток.

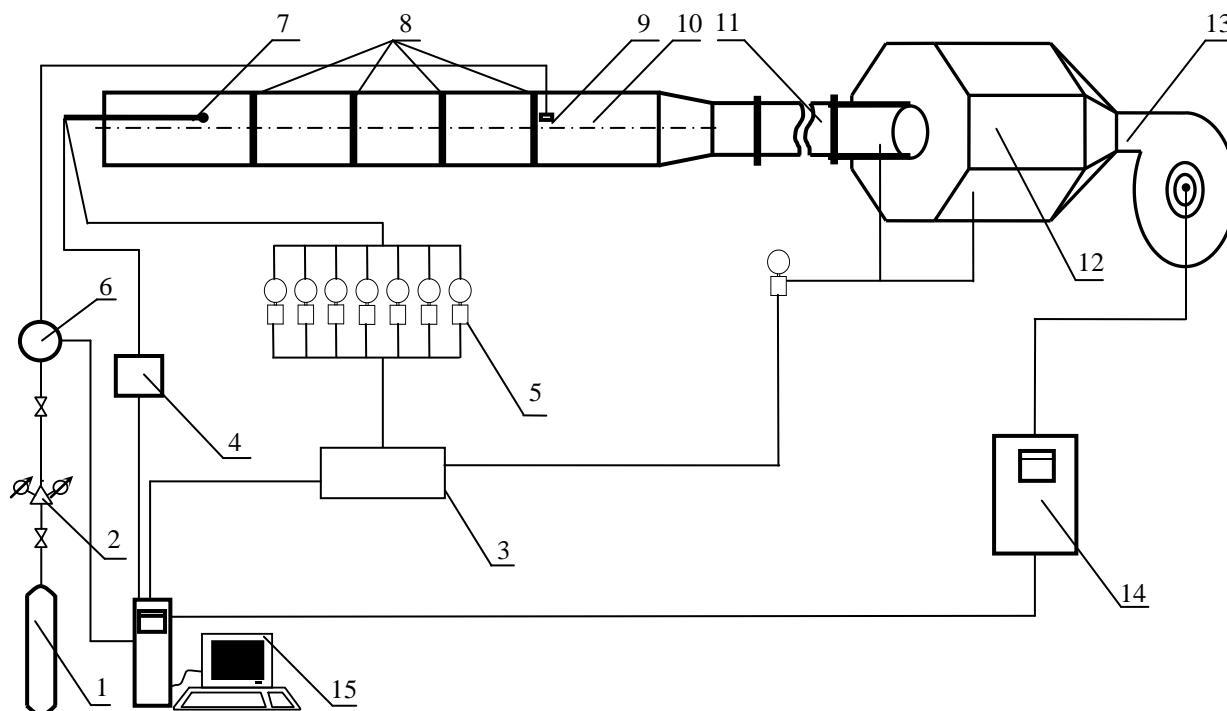


Рис. 1. Схема экспериментального стенда:

1 - газовый баллон; 2 – редуктор; 3 - базовый блок коммутации/измерения Agilent 34980A; 4 - модульный газоанализатор; 5 - преобразователи давления САПФИР-22Р; 6 - регулятор расхода газа EL-FLOW; 7 - отборный зонд; 8 - статические отборы; 9 - устройство ввода трассера в ячейку ЭМ; 10 - экспериментальная модель; 11 - успокоительный участок; 12 - буферная емкость; 13 - вентилятор высокого давления; 14 - преобразователь частоты; 15 – ЭВМ

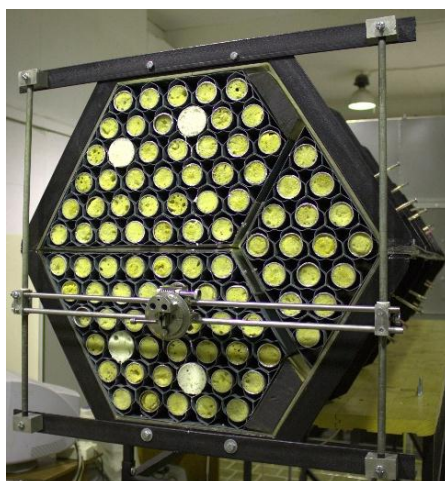


Рис. 2. Экспериментальная модель ТВСА реактора ВВЭР

Перемешивающая решетка типа «порядная прогонка» (рис. 3) имеет турбулизирующие дефлекторы высотой 19,8 мм (что соответствует высоте 4,5 мм натурального дефлектора), угол отгиба турбулизирующего дефлектора составляет 30° [2].

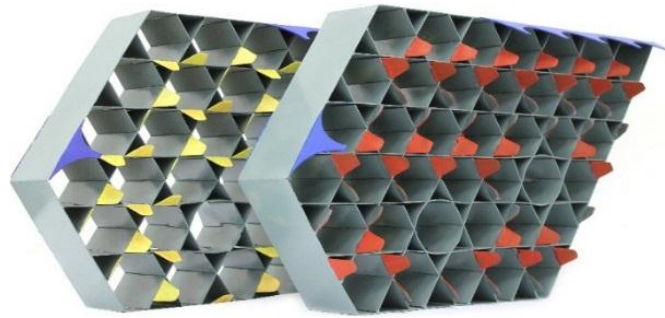


Рис. 3. Пояса перемешивающих решеток

Измерительный комплекс

В состав измерительного комплекса входят газоанализатор, регулятор расхода газа EL-FLOW, отборный зонд, выполненный в виде трубки Пито-Прандтля и одновременно выполняющий функцию транспортного газопровода в газоанализатор, ПЭВМ с соответствующим программным обеспечением.

Для измерения концентрации углеводородов C_nH_m в газо-воздушной смеси использовался газоанализатор, принцип работы которого основан на измерении величины поглощения инфракрасного излучения в области длины волны 3,4 мкм. Диапазон измеряемых концентраций: 0...10000 ppm, погрешность измерения при этом с учетом индивидуальной градуировки равна ± 5 ppm (0...1000 ppm); $\pm 1,5\%$ (1000...10000 ppm). Величина 10000 ppm соответствует одному объемному проценту газа трассера в газо-воздушной смеси [3].

Для поддержания заданного расхода газа использовался массовый расходомер EL-FLOW, который позволяет измерять и регулировать потоки газов в диапазонах от 0,014..0,7 мл/мин до 8..1670 л/мин при давлениях от вакуума до 400 бар. Погрешность при этом составляет не более 0,5%.

Методика проведения исследований

Методика проведения экспериментальных исследований локального массообмена заключалась в следующем:

1. Для выявления влияния взаимного расположения ДР и ПР на поток теплоносителя рассматривалось два варианта их расположения друг относительно друга:

а) изучение влияния ПР на течение потока теплоносителя (схема 1 рис. 4);

б) изучение влияния ДР на течение потока теплоносителя при её расположении после ПР (схема 2 рис. 4).

Схема №1

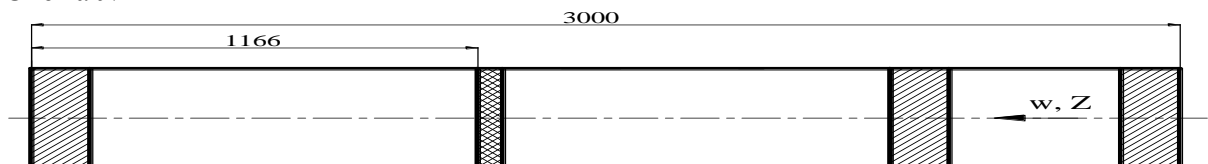
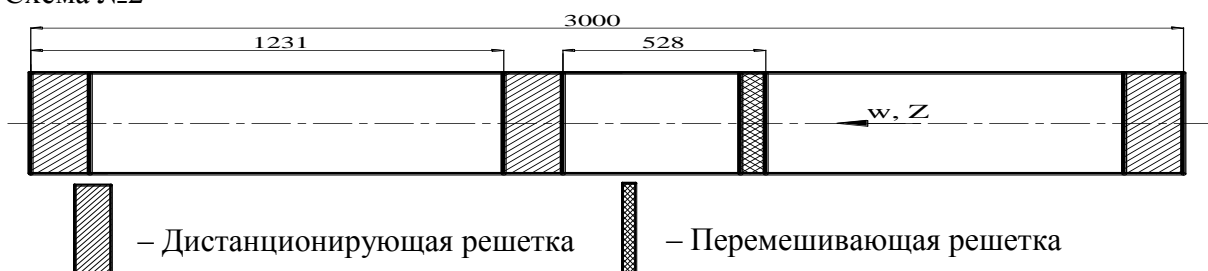


Схема №2



– Дистанционирующая решетка – Перемешивающая решетка

Рис. 4. Схемы расположения ПР и ДР в экспериментальной модели

2. Поперечные сечения экспериментальных моделей были разбиты на ячейки, каждой из которых был присвоен свой индивидуальный порядковый номер (рис. 5).

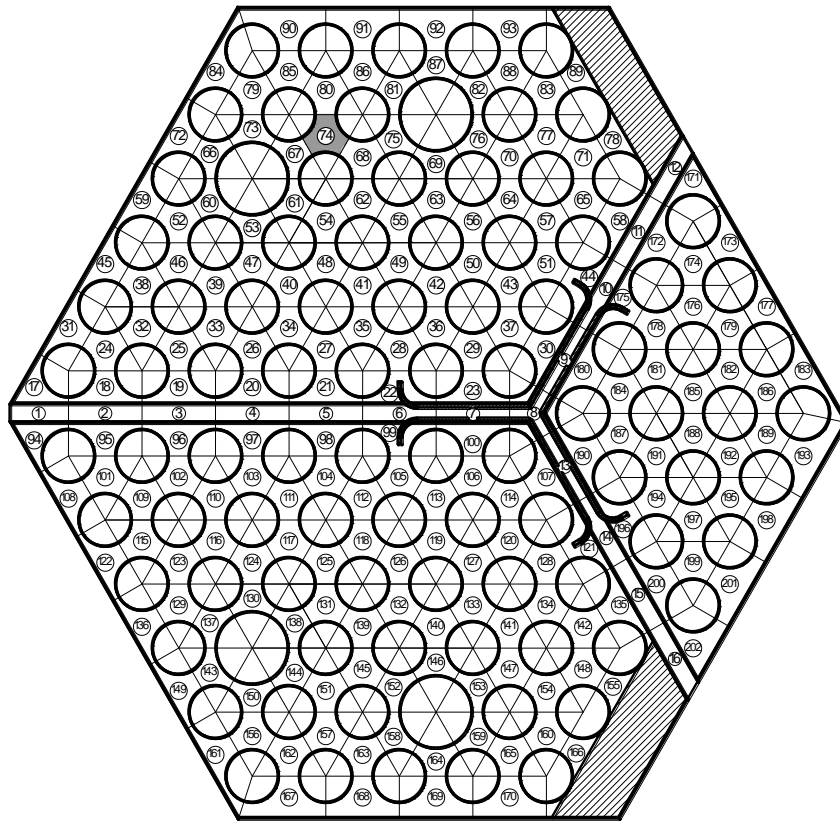


Рис. 5. Расположение зон измерения в поперечном сечении экспериментальной модели

3. Газовый трассер через впускной зонд подавался в характерную ячейку ЭМ до пояса перемешивающей решетки по ходу течения потока теплоносителя. Далее с помощью отборного зонда производился замер концентрации трассера газоанализатором по центрам всех ячеек за исследуемыми поясами решеток в характерных сечениях по длине ЭМ.

4. По полученным данным строились картограммы и графики зависимости распределения концентрации трассера от относительной координаты для характерных зон поперечного сечения ЭМ. Все экспериментальные исследования проводились в диапазоне чисел Re $8 \cdot 10^4 - 10^5$ на участке стабилизированного автомодельного течения теплоносителя, поэтому полученные результаты можно перенести на натурные условия течения теплоносителя в активных зонах со штатными ТВСА.

Для обоснования представительности экспериментальных исследований было подтверждено, что в области автомодельного течения теплоносителя коэффициенты местного гидравлического сопротивления перемешивающих решеток ЭМ соответствуют коэффициентам гидравлического сопротивления натуральных решеток и составляют $\xi_{\text{ПР}} = 0,55$ [4].

Результаты исследований распределения концентрации трассера в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР при различных схемах постановке перемешивающих решеток

Анализ результатов распределения концентрации трассера в экспериментальной модели при постановке одной ПР позволил сделать следующие выводы:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов (рис. 6).

2. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за ПР вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках прилежащих к НК осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлектора.

4. Затухание возмущений массообменных характеристик потока теплоносителя за ПР происходит на расстоянии $\Delta l/d=17\div 18$.

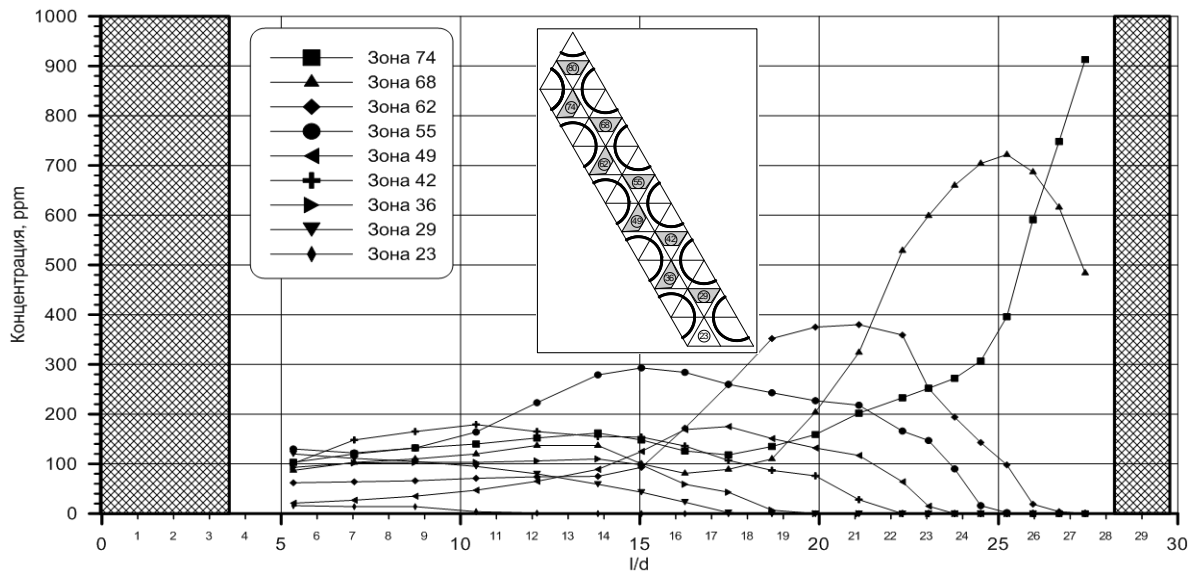


Рис. 6. Распределение концентрации трассера по длине экспериментальной модели за ПР типа «порядная прогонка»

Анализ результатов распределения концентрации пропана в экспериментальной модели при постановке системы ДР после ПР по ходу движения потока теплоносителя показал следующее.

1. Трассер из ячейки подачи за перемешивающей решеткой распространился в 16 ячеек (рис. 7) на расстоянии $\Delta l/d \approx 11$ от решетки. Далее за дистанционирующей решеткой происходит постепенное выравнивание концентрации трассера по поперечному сечению модели.

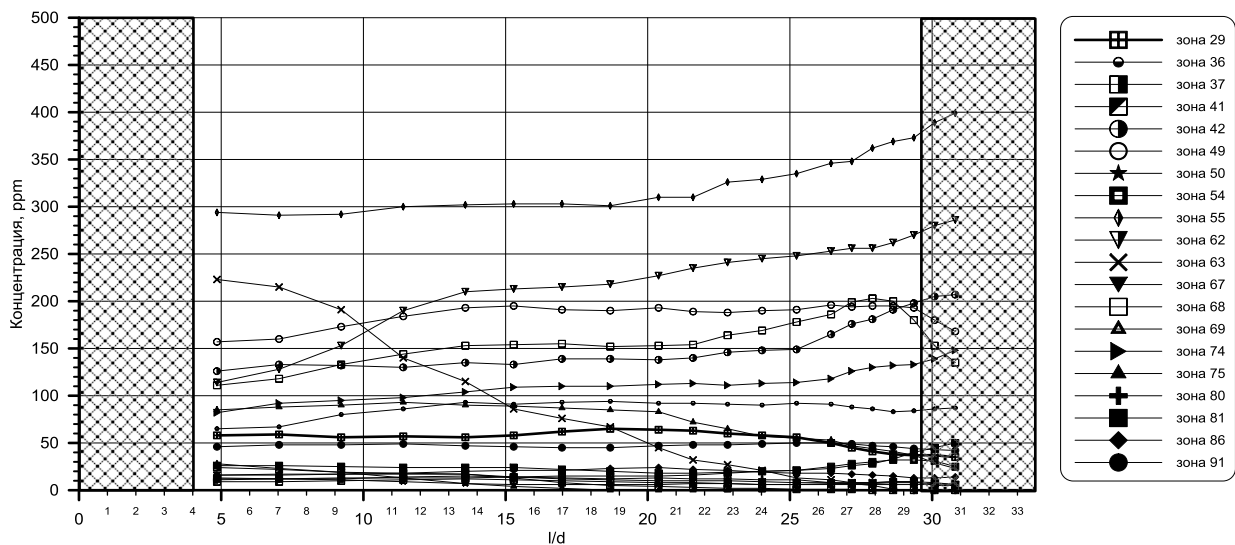


Рис. 7. Распределение концентрации трассера за дистанционирующей решеткой ЭМ

2. За ДР максимум концентрации трассера наблюдается сразу за решеткой (рис. 8) и далее по длине не переходит в другие ячейки. Это свидетельствует о том, что воздействие deflectоров на поток теплоносителя за ДР прекращается и дальнейшее перемешивание осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии. Исходя из этого, можно сделать вывод: ДР, расположенная после ПР, сглаживает возмущения массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении ЭМ и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

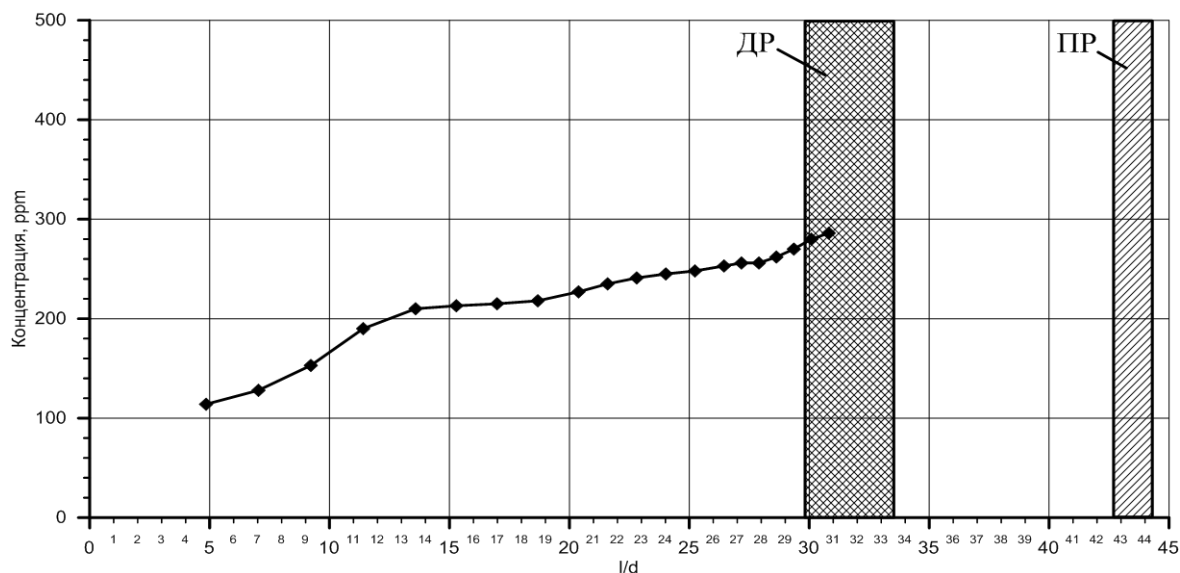


Рис. 8. Распределение концентрации трассера по длине ЭМ за ДР

При анализе массообменных характеристик теплоносителя в области НК выявлено, что трассер в данной области распространяется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют deflectора.

На рис. 9 представлен график изменения относительного расхода теплоносителя за поясом ПР по длине экспериментальной модели.

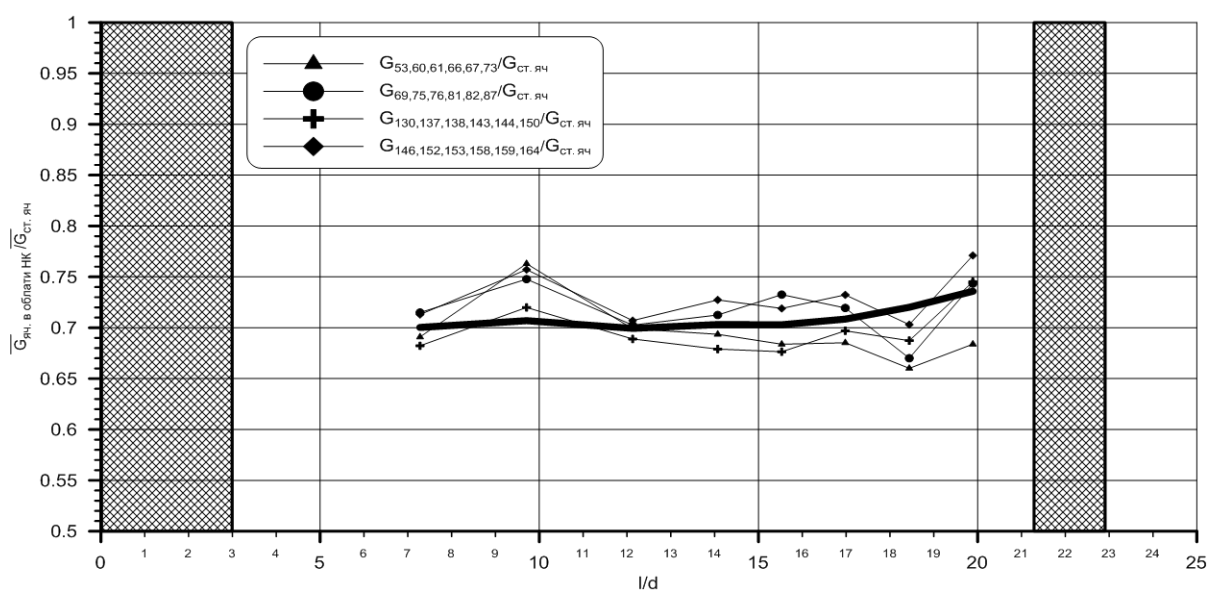


Рис. 9. Отношение распределения расхода теплоносителя через ячейки, прилежащие к НК, к стандартным ячейкам

Из данного графика видно, что часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки.

Выводы

По результатам экспериментальных исследований гидродинамики и массообмена в модели фрагмента активной зоны реактора ВВЭР–300 были выявлены основные закономерности движения потока теплоносителя:

1. За дефлекторами перемешивающей решетки типа «порядная прогонка» происходит направленное постепенно затухающее движение трассера, обусловленное соответствующим расположением дефлекторов.

2. Не весь трассер движется в направлении, определенном дефлектором. Часть трассера передается в соседние ячейки за счет турбулентного массообмена, имеющего значительно большую величину за перемешивающей решеткой вследствие дополнительной турбулизации потока.

3. Распределение концентрации трассера в ячейках, прилежащих к НК, осуществляется посредством механизма турбулентной диффузии, поскольку в районе НК отсутствуют перемешивающие дефлекторы.

4. Наличие дистанционирующей решетки, расположенной после перемешивающей решетки, приводит к сглаживанию возмущений массообменных характеристик, вносимых перемешивающей решеткой. Это приводит к уменьшению глубины распространения трассера в поперечном сечении экспериментальной модели и, как следствие, к снижению эффективности перемешивающих решеток как интенсификаторов массообмена.

5. Значения расхода в ячейках, прилежащих к НК, в среднем на (25-30)% меньше по сравнению с расходом теплоносителя через стандартные ячейки. Часть потока в ячейках, прилежащих к НК, перераспределяется в соседние стандартные ячейки.

Полученные результаты могут быть использованы в качестве базы экспериментальных данных для верификации CFD-кодов и программ детального поячеечного расчета активных зон водо-водяных ядерных реакторов.

Библиографический список

1. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА ВВЭР / С.С. Бородин [и др.] // Атомная энергия. 2012. Т. 113. Вып. 5. С. 252–257.
2. **Бородин, С.С.** Экспериментальные исследования локального массообмена теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов типа PWR / С.С. Бородин [и др.] // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. №3. С. 106–112.
3. **Бородин, С.С.** Особенности локальной гидродинамики и массообмена теплоносителя в ТВС реакторов ВВЭР и PWR с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – Москва: Наука и Технологии, 2013. Т. 5. Вып. 3. С. 98–107.
4. **Варенцов, А.В.** Экспериментальное исследование локального массообмена и оценка эффективности перемешивания дистанционирующих решеток в ТВС реактора КЛТ-40С / А.В. Варенцов [и др.] // Наука и технологии: матер. XXXII Всерос. конф. по пробл. науки и технологий. – Миасс: МСНТ, 2012. С. 111–113.

*Дата поступления
в редакцию 30.04.2013*

S.S. Borodin¹, A.V. Varentsov¹, D.V. Doronkov¹, A.N. Pronin¹, G.H. Iksanova²

EXPERIMENTAL RESEARCHES OF FLOW HYDRODYNAMICS AND MASS TRANSFER TO THE COOLANT FLOW IN THE CORE FRAGMENTS VBER-300

JSC «OKBM Afrikantov»¹,
Nizhniy Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Purpose: Experimental research of local hydrodynamics and mass-transfer of coolant in the VBER-300 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 VBER-300 reactor fuel assembly were defined. Features of coolant stream behind spacer grid and mixing 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 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 VBER-300 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 VBER-300 reactor core.

Key words: nuclear reactor, fuel assembly, hydrodynamics of coolant, mixing grid.

УДК 621.039

С.М. Дмитриев, А.Е. Соборнов, Р.Р. Рязанов, А.В. Котин

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ТЕПЛОПЕРЕНОСА В ПОТОКЕ ВЯЗКОЙ ЖИДКОСТИ В КАНАЛАХ С ЛЕНТОЧНЫМИ ЗАВИХРИТЕЛЯМИ РАЗЛИЧНОЙ ГЕОМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты и анализ экспериментальных данных по исследованию теплоотдачи и гидравлического сопротивления в каналах с ленточными интенсификаторами теплообмена различного шага закрутки.

Ключевые слова: интенсификация теплоотдачи, теплоноситель, ленточный завихритель, гидравлическое сопротивление.

Введение

Создание вихревого течения в каналах теплообменного аппарата позволяет значительно интенсифицировать процесс теплообмена и, тем самым, повысить энергетическую эффективность оборудования, а также уменьшить его размеры и массу. Одним из наиболее перспективных способов закрутки потока является использование ленточных интенсификаторов. Основными достоинствами интенсификаторов данного типа являются:

- относительная простота изготовления и монтажа;
- минимально возможное загромождение канала, что способствует незначительному увеличению гидравлического сопротивления.

Несмотря на то, что закрутка потока требует дополнительной затраты энергии, возможны такие режимы работы теплообменного аппарата, при которых передача заданного количества тепла в каналах с завихрителями будет осуществлена при меньшей затрате энергии на перемещение теплоносителя, чем в каналах трубной формы.

Необходимо отметить, что использование ленточных завихрителей в каналах теплообменного оборудования ЯЭУ приводит к изменению режима движения нагреваемого теплоносителя. Изменение режима возникает вследствие значительного расширения диапазона значений чисел Рейнольдса, соответствующих ламинарному с макро вихрями режиму движения [1]. Смещение границ режимов течения следует связывать с возникновением вторичных течений, обусловленных воздействием инерционных сил на поток. Действие вторичных течений вызывает:

- уменьшение значения критического числа Рейнольдса, соответствующего потере устойчивости ламинарного течения в трубе, вследствие значительного изменения профиля скорости в потоке теплоносителя;
- увеличение значения критического числа Рейнольдса, соответствующего возникновению турбулентного течения в трубе, вследствие роста устойчивости потока теплоносителя. Рост устойчивости объясняется меньшей восприимчивостью закрученного потока к возникновению поперечных течений, по сравнению с течением в прямой трубе круглого сечения.

Таким образом, сложная структура закрученного потока ограничивает разработку надежных теоретических методов для оценки его характеристик. Вследствие этого, проведение экспериментальных исследований процесса теплоотдачи в каналах с ленточными интенсификаторами при ламинарном с макро вихрями режиме движения жидкости является актуальной научно-технической задачей.

Новизна данной работы заключается в экспериментальном исследовании процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями большой протяженности ($l \approx 240$ d) в диапазоне параметров, соответствующих режимам эксплуатации теплообменного оборудования ядерных энергетических установок.

Целями являются:

- выбор оптимальной геометрической формы интенсификатора теплообмена;
- создание экспериментальной базы для верификации расчётных кодов.

Экспериментальный стенд и методика проведения исследований

Экспериментальные исследования интенсификации теплообмена проводились на теплофизическом стенде ФТ-80, предназначенном для исследования процессов тепломассопереноса, теплогидравлических, ресурсных характеристик парогенерирующих элементов, а также процессов устойчивости и опрокидывания циркуляции. В состав стенда входит три гидравлических контура. Первый и второй контуры являются гидравлически замкнутыми и находятся под избыточным давлением, в диапазоне от 1.0 до 18.0 МПа.

Третий контур не замкнут и служит для охлаждения основного оборудования. В качестве теплоносителя в первом и втором контурах использовалась вода высокой степени чистоты, в третьем контуре – техническая вода.

Экспериментальная модель предназначена для исследования теплогидравлических характеристик интенсификаторов теплообмена при однофазном режиме движения теплоносителей I и II контуров представлена на рис. 1.

Конструктивно модель представляет собой теплообменный канал, выполненный по принципу «труба в трубе», с противоточным движением теплоносителей. Среда II контура движется по внутренней трубе, обогреваемой средой I контура, движущейся в кольцевом зазоре между теплообменной трубой и наружным кожухом канала. Подвод нагреваемого теплоносителя осуществлялся в нижний коллектор с последующим отводом в верхнем коллекторе. Организация данной схемы движения теплоносителей является наиболее оптимальной с точки зрения достижения максимальной величины температурного напора, а также минимизации действия подъёмных сил на процесс теплоотдачи и движение теплоносителей. Общая длина модели составляет 2940 мм. Длина активной части теплообменной поверхности составляет 2440 мм.

В состав модели входят верхний и нижний коллекторы, предназначенные для подвода и отвода греющего теплоносителя и рабочего тела к исследуемому участку, а также для компенсации термических расширений элементов модели. Компенсация термических расширений достигается конструктивными мероприятиями, обеспечивающими свободное перемещение теплообменной трубы в нижнем коллекторе относительно верхнего коллектора, где она имеет жесткое крепление. Для исключения смешивания теплоносителя и рабочего тела в месте возможных протечек установлено асбографитовое уплотнение. Для контроля плотности уплотнения предусмотрены отборы протечек.



Рис. 1. Экспериментальная модель

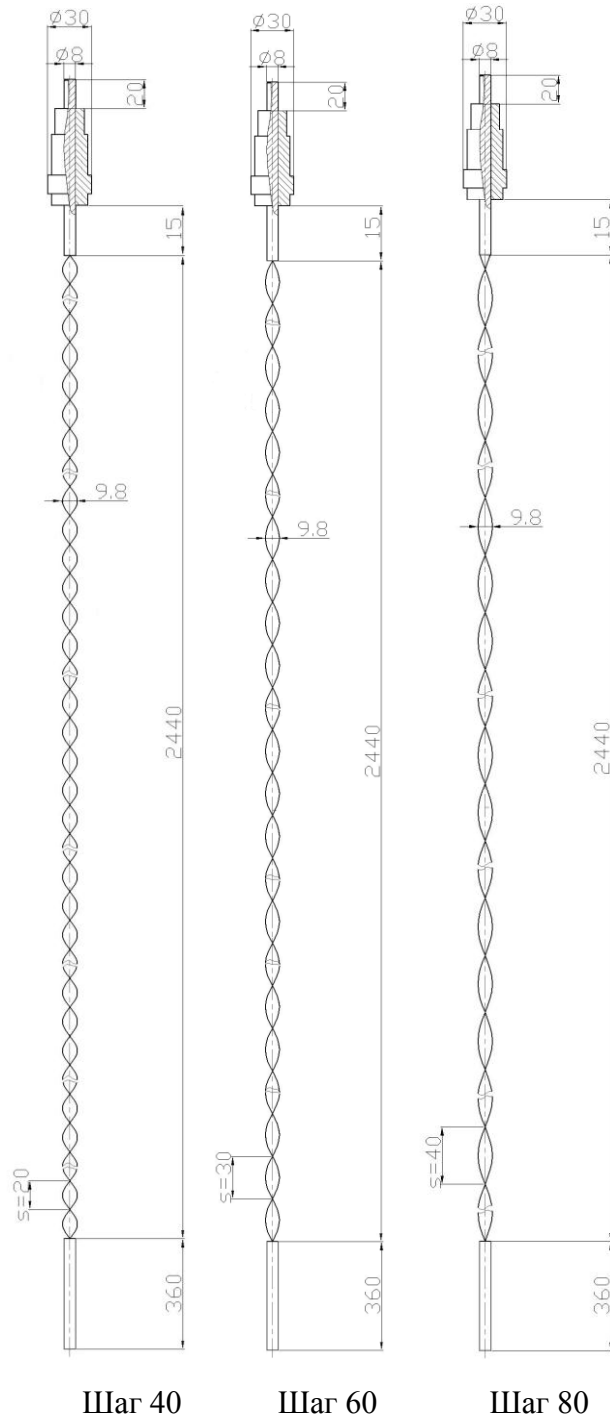


Рис. 2. Ленточные завихрители

Прочный кожух состоит из двух частей, которые после сварки продольных швов образует канал с круглым внутренним сечением диаметром 17 мм. Теплообменная труба наружным диаметром 13 мм с толщиной стенки 1.5 мм дистанционируется в продольном канале прочного корпуса и образует в нем канал кольцевого сечения.

Экспериментальные исследования проводились для интенсификаторов теплообмена, представляющих собой ленточные завихрители различной конфигурации (рис. 2).

Ленточный завихритель представляет собой полосу из нержавеющей стали толщиной 1 мм и шириной 9.8 мм, закрученную вокруг центральной оси. Длина интенсификатора теплообмена соответствует длине активной части теплообменной трубы экспериментальной мо-

дели. Всего было изготовлено три ленточных завихрителя с постоянными шагами закрутки равными 40 мм, 60 мм и 80 мм соответственно.

Для закрепления интенсификаторов внутри исследуемой модели предусмотрены следующие конструктивные элементы: в верхней части интенсификаторов – втулка, в нижней части - стержень из нержавеющей стали. Оба элемента имеют технологические отверстия для упрощения процесса монтажа и демонтажа интенсификатора.

Экспериментальные исследования проводились в следующем диапазоне основных параметров:

- расход греющего теплоносителя первого контура $G_1 = 11 \div 280$ кг/ч;
- расход теплоносителя второго контура $G_2 = 4 \div 114$ кг/ч;
- температура входа теплоносителя первого контура $T_{1ВХ} = 250 \div 260^{\circ}\text{C}$;
- температура входа теплоносителя второго контура $T_{2ВХ} = 40 \div 50^{\circ}\text{C}$;
- давление первого контура 11 МПа;
- давление второго контура 5 МПа;
- режим движения теплоносителя второго контура - ламинарный с макро вихрями.

Методика проведения экспериментальных исследований заключалась:

- в создании заданной комбинации теплофизических параметров;
- стабилизации теплофизических параметров экспериментального участка;
- записи временных реализаций температурных полей, расхода греющего теплоносителя и охлаждающей воды.

Важным этапом экспериментальных исследований было проведение цикла экспериментов по определению величины тепловых потерь. Создание изотермического течения теплоносителя первого контура достигалось путём осушения и отключения второго контура. Полученные распределения температуры теплоносителя и теплообменной поверхности по высоте модели представлены на рис. 3. Вертикальная координата сечений расположения термодатчиков отсчитывается от патрубка входа питательной воды в экспериментальную модель.

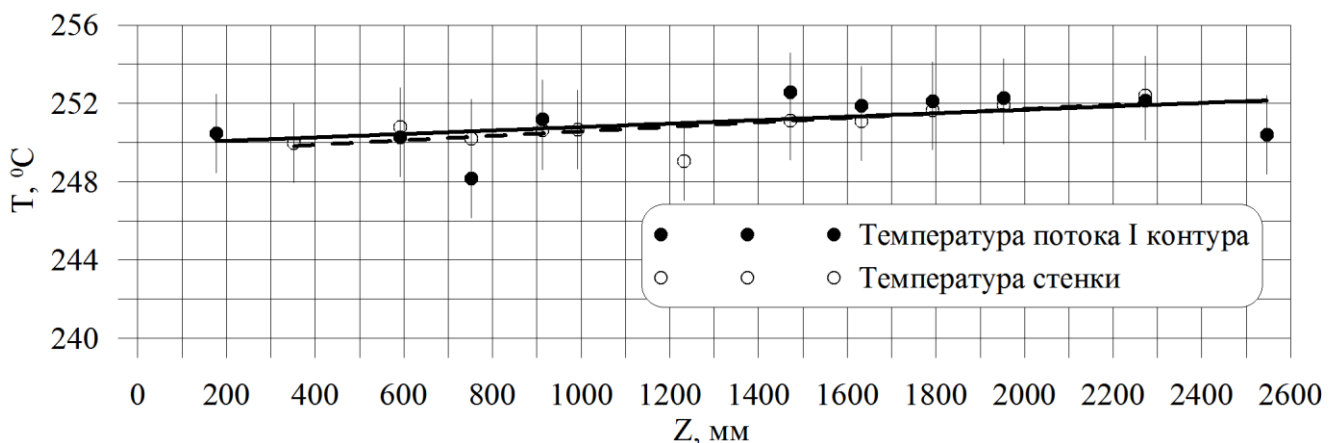


Рис. 3. График распределения температур по высоте модели для режима определения тепловых потерь

Анализируя полученные значения температур, можно сделать вывод о том, что максимальная величина тепловых потерь при проведении всего цикла экспериментальных исследований не превышала значения 1%. Столь малая величина тепловых потерь позволяет исключить их влияние при проведении дальнейших расчётов.

Результаты экспериментальных исследований

По результатам проведённых экспериментов сформированы таблицы экспериментальных данных и построены графики распределения температур теплоносителей и теплообменной поверхности по высоте модели. Характерный вид полученных зависимостей представлен на рис. 4.

Дальнейшая обработка экспериментальных данных заключалась в определении зависимости интенсивности теплоотдачи со стороны теплообменной поверхности от расхода теплоносителя второго контура. Для построения необходимых зависимостей был проведён следующий цикл вычислений:

- 1) используя вертикальную координату расположения термодпар, а также геометрические характеристики канала, исследованный канал разбивался по высоте на десять участков;
- 2) используя усреднённые по времени показания термодпар, для каждого участка определялись теплофизические параметры теплоносителя
- 3) используя полученные значения, для каждого участка определялись:
 - коэффициент теплоотдачи и тепловой поток от стенки теплообменной поверхности к теплоносителю второго контура;
 - критерии Нуссельта и Рейнольдса.

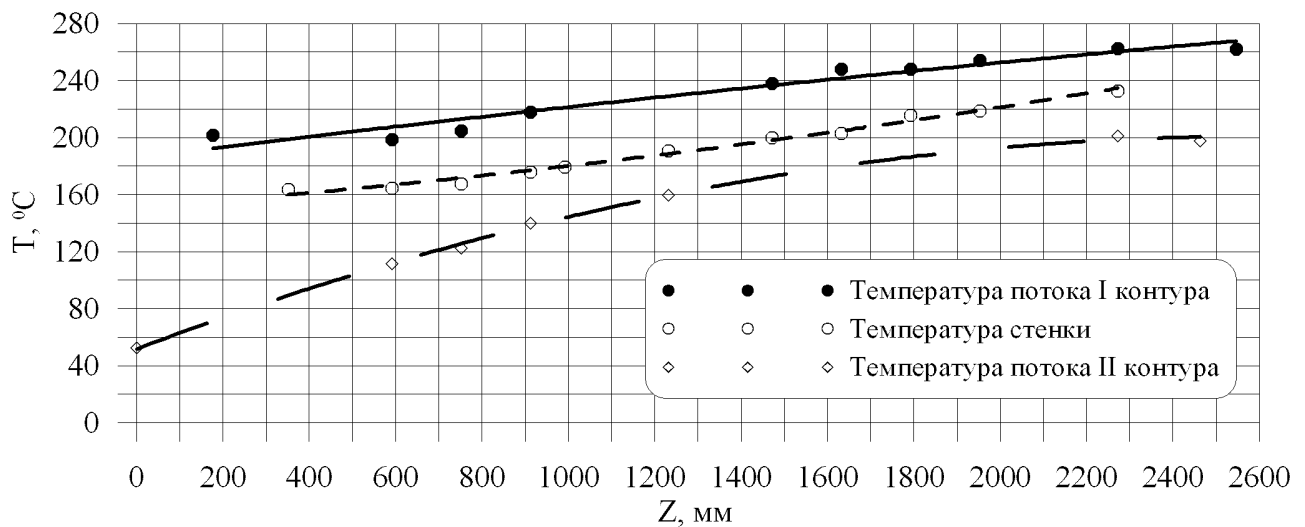


Рис. 4. Распределение температур теплоносителей и теплообменной поверхности по высоте модели

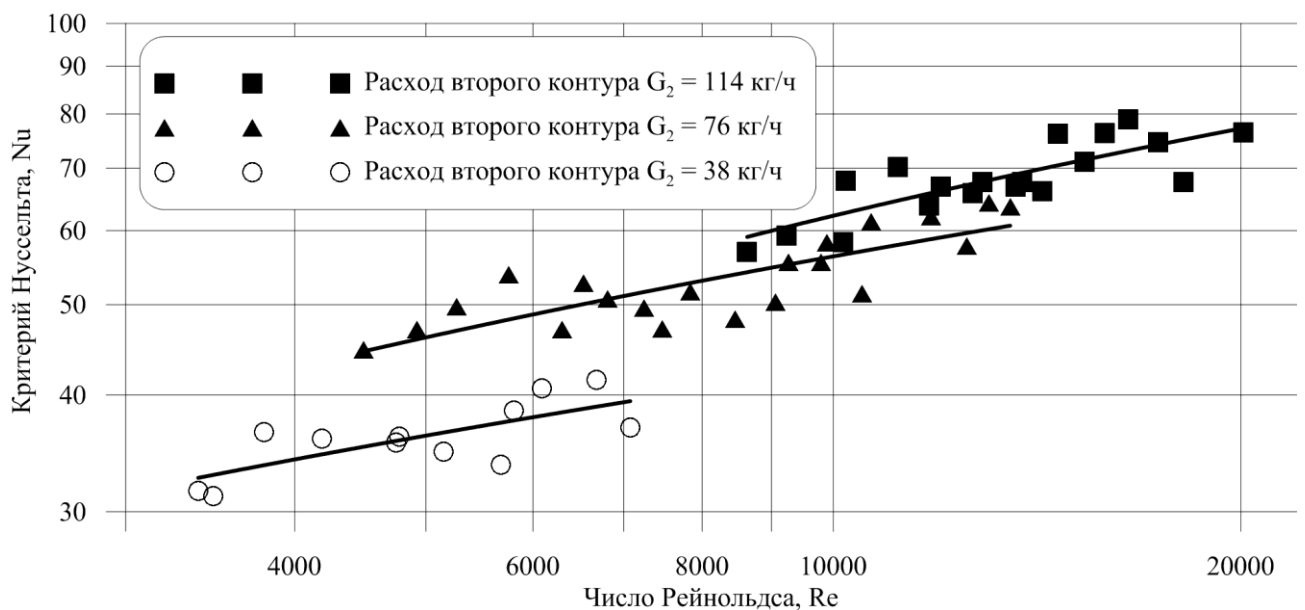


Рис. 5. Характерная зависимость критерия Нуссельта от Рейнольдса для интенсификатора с шагом 80 мм при постоянном расходе греющего теплоносителя

Вычисления производились для каждого интенсификатора при различных расходах и температурных состояниях теплоносителей. Необходимо отметить, что при обработке массива полученных значений критериев Нуссельта и Рейнольдса их необходимо разделять на группы, используя в качестве критерия величину расхода нагреваемого теплоносителя. Это обусловлено тем фактом, что получение аналитических зависимостей в результате аппроксимации значений, классифицированных другим способом, затруднено вследствие сложной зависимости критерия Рейнольдса от расхода и температуры.

Анализ полученных результатов позволяет определить зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса при постоянном расходе греющего теплоносителя для каждого интенсификатора. Следует отметить, что общий характер зависимостей не изменяется в зависимости от шага навивки интенсификатора. На рис. 5 приведена характерная зависимость критерия Нуссельта от Рейнольдса при постоянном расходе теплоносителя первого контура для интенсификатора с шагом 80 мм.

Проведенный анализ позволяет заключить, что с увеличением расхода нагреваемого теплоносителя наблюдается рост интенсивности теплоотдачи. Данный вывод полностью согласуется с теоретическими представлениями о структуре закрученных потоков. Увеличение местного коэффициента теплоотдачи связано с возрастающим влиянием вторичных течений на процессы теплообмена.

Следующим этапом обработки экспериментальных данных является оценка влияния геометрии завихрителя на процесс теплоотдачи. Для решения данной задачи были построены распределения критерия Нуссельта по высоте модели. Характерный график зависимости представлен на рис. 6.

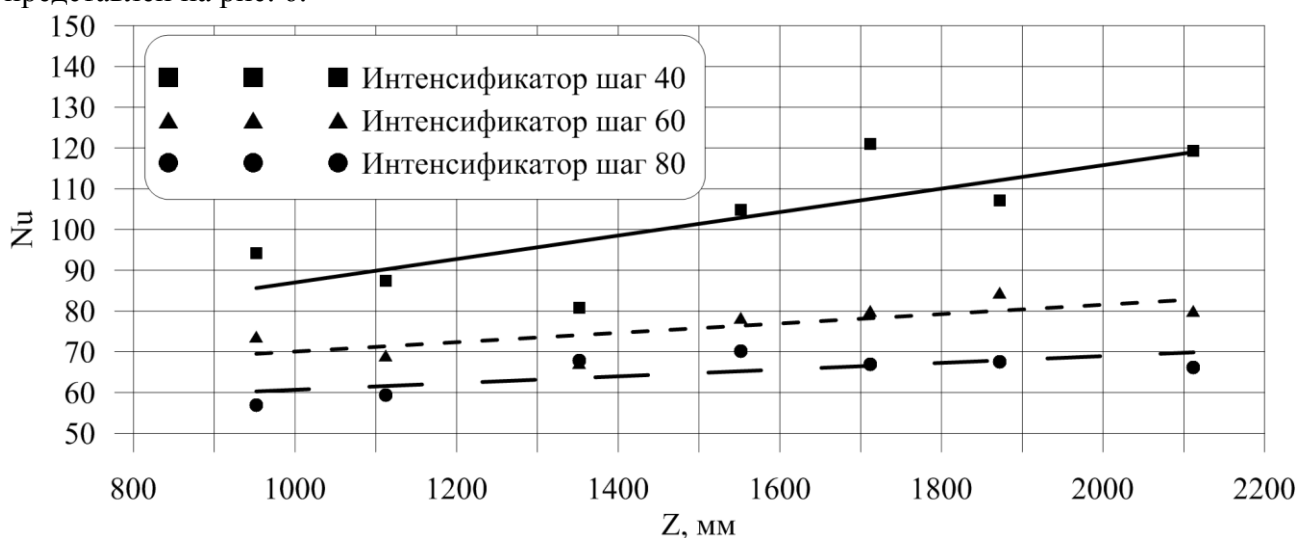


Рис. 6. Распределение критерия Нуссельта по высоте модели на участке стабилизированного течения

Увеличение значения критерия Нуссельта по высоте модели связано с уменьшением значения коэффициента теплопроводности жидкости вследствие роста температуры теплоносителя. Наклон графика определяется интенсивностью роста температуры теплоносителя по высоте модели, которая, в свою очередь, определяется шагом закрутки интенсификатора.

Для проведения качественного сравнения интенсификаторов теплообмена были построены зависимости критерия Нуссельта от критерия Рейнольдса при фиксированном значении расхода второго контура и различных значениях расхода греющего теплоносителя. На рис. 7 представлена характерная зависимость критерия Нуссельта от Рейнольдса для заданного значения расхода нагреваемого теплоносителя.

Анализ полученных зависимостей позволяет сделать вывод о наибольшей эффективности в интенсификации процесса теплообмена ленточного завихрителя с шагом навивки 40 мм.

Наибольшая эффективность интенсификатора с шагом навивки 40 мм достигается во всём диапазоне значений расхода нагреваемого теплоносителя.

Для проведения более корректного сравнения эффективности применения интенсификаторов теплообмена следует сравнивать и гидравлическое сопротивление, возникающее вследствие усложнения геометрической формы канала. Для решения данной задачи был проведён цикл экспериментальных исследований гидравлического сопротивления канала в зависимости от расхода теплоносителя.

Необходимо отметить, что данные исследования проводились в том же диапазоне значений расхода нагреваемого теплоносителя, так как это позволит в дальнейшем оценить эффективность применения ленточных завихрителей для интенсификации теплообмена [2]. Результаты исследований представлены на рис. 8.

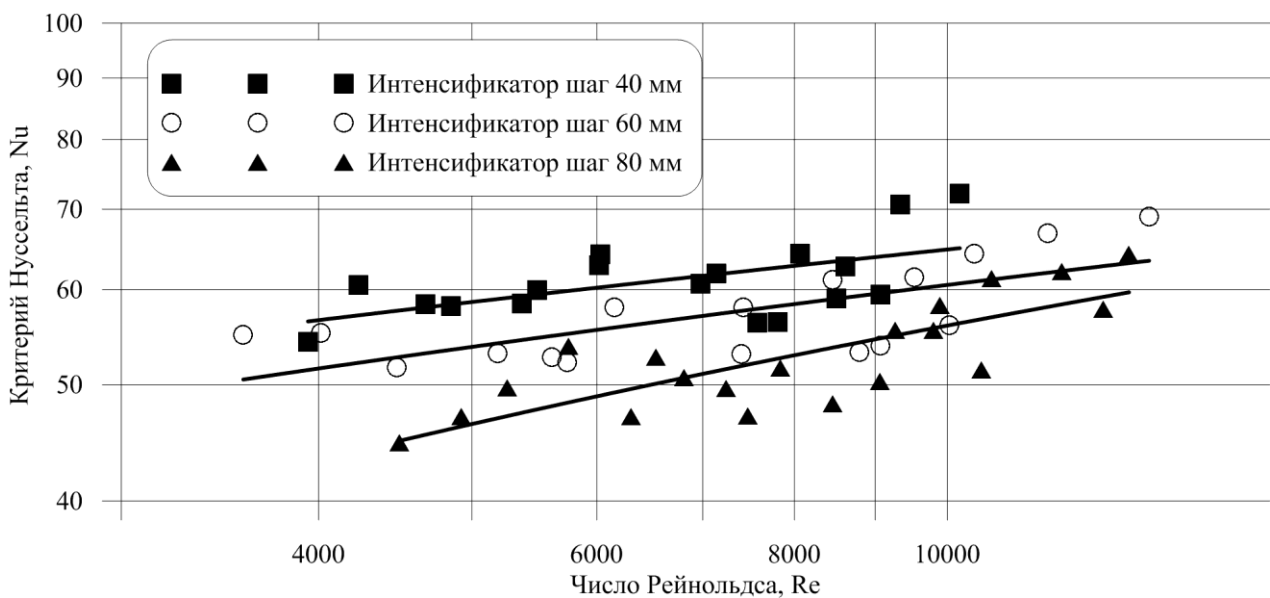


Рис. 7. Характерная зависимость критерия Нуссельта от Рейнольдса для трёх интенсификаторов

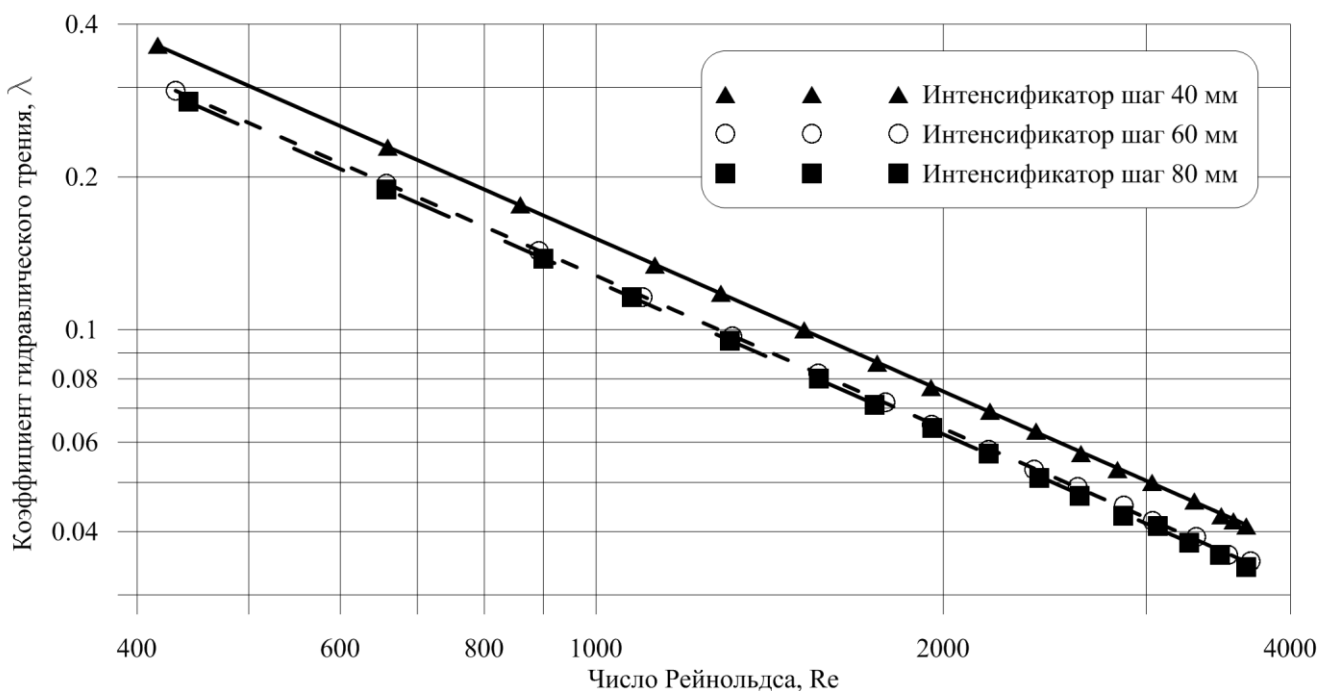


Рис. 8. Зависимость гидравлического сопротивления канала от расхода теплоносителя

Сравнительный анализ интенсивности теплоотдачи в каналах с ленточными завихрителями с учётом величины гидравлического сопротивления показал, что оптимальной формой интенсификатора является ленточный завихритель с шагом навивки 40 мм.

Выводы

Анализ результатов проведенного экспериментального исследования процесса теплопереноса в потоке вязкой жидкости в каналах с ленточными завихрителями различного шага навивки позволяет сделать следующие выводы:

- при увеличении расхода нагреваемого теплоносителя в пределах данного диапазона наблюдается рост интенсивности теплоотдачи со стороны теплообменной поверхности;
- каждый режим с заданным соотношением расходов характеризуется ростом значения критерия Нуссельта по высоте модели, возникающим вследствие уменьшения коэффициента теплопроводности жидкости;
- оптимальной формой интенсификатора является ленточный завихритель с шагом навивки 40 мм. При использовании интенсификатора заданной геометрии становится возможным получение наибольших значений коэффициента теплоотдачи при сравнительно невысоких значениях величины гидравлического сопротивления.

Библиографический список

1. Будов, В.М. Форсированные теплообменники ЯЭУ / В.М. Будов, С.М. Дмитриев. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 174 с.
2. Соборнов, А.Е. Оценка эффективности применения ленточных завихрителей в каналах теплообменного оборудования для интенсификации процесса теплоотдачи / А.Е. Соборнов [и др.] // Современные техника и технологии: сб. научных трудов. СТТ-2013: в 8 т. М., 2013. Т. 1. С. 17–27.

*Дата поступления
в редакцию 30.04.2013*

S.M. Dmitriev, A.E. Sobornov, R.R. Ryazapov, A.V. Kotin

EXPERIMENTAL RESEARCH OF HEAT TRANSFER IN A VISCOUS FLOW IN CHANNELS WITH TWISTED METALLIC BANDS DIFFERENT GEOMETRY

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

Purpose: Experimental research of heat transfer and pressure drop in a pipe with metallic band various twisting step.

Design/methodology/approach: Experimental model is designed as heat exchange channel, which includes inner and outer pipes. Coolant flows moved in these pipes in opposite directions. Metallic band is located in inner pipe. The total length of the model is 2940 mm. The length of the active part of the heat exchange surface is 2440 mm. Three type of equally twisted metallic bands were studied in this research: 40, 60 and 80 mm by step. The temperature fields, the flow rates of coolants were recorded during this work. A series of experiments to find a dependency between the pressure drop and flow rate were conduct at last stage of this study.

Findings: The results were written in experimental data tables. The distribution of coolant and heat exchange surface temperatures were plotted. Physical parameters of coolant were determined using the time-averaged readings of thermocouples, also heat transfer coefficient, the heat flux from heat exchange surface to the coolant, the Nusselt and Reynolds numbers were calculated. The optimal geometry of twisted metallic turbulizer was determined using analyze results. At present, the experimental data are using to verify ANSYS CFX.

Originality/value: Originality of this research is in the study of heat transfer in a viscous flow in channels with long twisted metallic bands ($l \approx 240d$) at the range of parameters, which coincide with ones of heat exchange equipment at nuclear power plants.

Key words: heat transfer intensification, coolant, twisted metallic band, pressure drop.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.3

В.Н. Худяков, И.А. Тютнев, В.А. Александрович

ОСНОВЫ ВЫБОРА ПАРАМЕТРОВ ТРУБОУКЛАДЧИКОВ, ПРЕДНАЗНАЧЕННЫХ ДЛЯ РАБОТ НА БОЛОТАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена вопросам взаимодействия гусеничных движителей трубоукладчиков с заболоченной местностью, особенностью которой является наличие, действующего в течение долгого периода времени, грузовой момент, обусловленного необходимостью подъема трубы из траншеи при проведении работ по её обслуживанию и ремонту. Установлено, что нормальная работа трубоукладчика на болотах возможна только при применении специальных средств для повышения проходимости – опорных площадок. Получены зависимости между геометрическими размерами площадок от параметров трубоукладчиков и болот, на которых проложен трубопровод.

Ключевые слова: трубоукладчики, заболоченная местность, грузовой момент, глубина погружения, устойчивость, подвижность.

Развитие трубопроводного транспорта нефти, нефтепродукта и газа нашей страны находится на таком этапе, когда главной задачей является достижение максимальной эффективности производства и высокого качества продукции. В условиях современного производства от надежности функционирования таких сложных промышленно-транспортных комплексов, какими являются магистральные трубопроводы, во многом зависит не только плановое развитие многих отраслей народного хозяйства, но и их научно-технический прогресс.

Магистральный трубопроводный транспорт является важнейшей составляющей топливно-энергетического комплекса России. Значимость трубопроводного транспорта для Российской Федерации определяется значительной удаленностью основных месторождений нефти и газа от потребителей, а также высокой долей нефти, нефтепродуктов и газа в экспортном балансе России. В стране создана разветвленная сеть магистральных нефте- и газопроводов, нефтепродуктопроводов, которые проходят по территории большинства субъектов Российской Федерации. Объем транспортировки газа за последние годы изменялся с 483 (1994 и 2009 гг.) до 511 млн т (2011 г.). Объемы перевозки нефти также значительно увеличились с 300 (1994 г.) до 475 млн т (2009 г.) и 511 млн т (2011 г.). Транспортировка нефтепродуктов не претерпела значительных изменений по увеличению объемов и находится на уровне 30 млн т.

Одной из главных составляющих эффективного работ трубопроводного транспорта является своевременное проведение технического обслуживания и ремонта. При этом следует учитывать, что более половины работ по содержанию трубопроводов приходится на участки со сложными условиями. Под сложными условиями подразумевается прохождение трассы нефте- и газопроводов по болотистой местности, в горах, песках, районах вечной мерзлоты и с глубоким снежным покровом. Наиболее распространены болотистые и горные участки.

Особые трудности возникают при ликвидации аварий на трубопроводах в условиях болот. Это в первую очередь объясняется сложными грунтово-геологическими условиями и

слабой несущей способностью болотных грунтов. Современные аварийно-восстановительные службы могут за короткий срок ликвидировать аварию в обычных условиях. В условиях болот этот срок увеличивается за счет дополнительных работ по сооружению подъездных путей, рабочих площадок и составляет до 60 % времени, необходимого для восстановления трубопровода. В связи с освоением нефтяных месторождений Сибири и Севера европейской части страны значительное количество нефтепроводов больших диаметров (1020, 1220 мм) проходит именно по болотистой местности. Протяженность участков болот, по которым проходят нефтепроводы, составляет десятки и сотни метров, а в отдельных случаях — десятки километров.

При строительстве и ремонте магистральных трубопроводов трубоукладчики являются наиболее универсальными грузоподъемными машинами и используются практически при всех видах работ: в составе изоляционно-укладочной колонны при укладке трубопроводов в траншею, при сварочно-монтажных работах, при транспортировании, погрузке и разгрузке труб и плетей, а также при монтаже и других подъемно-транспортных работах [2].

Принципиальные отличия трубоукладчиков от других грузоподъемных машин заключаются в том, что при работе в колонне при укладке трубопровода в траншею нагрузка на крюке трубоукладчика носит переменный характер [1], так как зависит от массы и упругости приподнятого участка трубопровода, рельефа местности и согласованности действий операторов. Циклограмма стандартной работы трубоукладчиков показана на рис. 1.

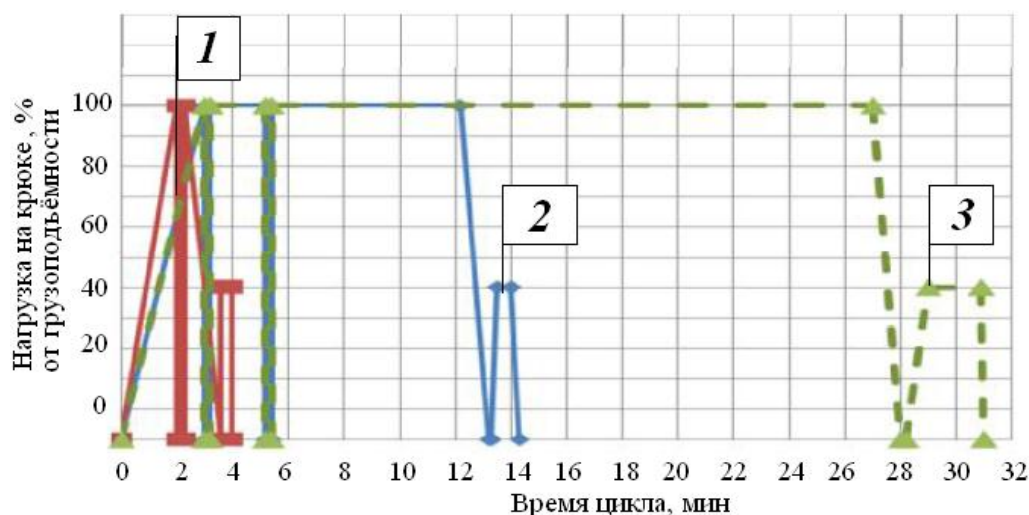


Рис. 1. Циклограмма нагрузки на крюке трубоукладчика по видам работ: 1 – погрузка-разгрузка; 2 – в колонне при применении электрической сварки; 3 – в колонне при применении ручной сварки

Наличие при работе трубоукладчика значительного грузового момента приводит к наклону трубоукладчика и опорной площадки. Перераспределение удельных нагрузок приводит к их возрастанию более, чем в пять раз [4], в связи с чем было разработано требование о недопустимости наклона опорной площадки более, чем на 0,1 рад, для опорных оснований со значением показателя степени в зависимости «нагрузка-осадка», находящимся в пределах от 0,6 до 1,2 (что соответствует основным типам болот) [4].

При работе на болотистых грунтах крутизна откосов траншей не превышает значения 1:3. В этих условиях трубоукладчики работают с предельными значениями вылета стрел (6–9 м). Учитывая, что забалластированный трубопровод имеет значительный вес, каждый трубоукладчик в колонне будет способен поднять на технологически необходимую высоту всего лишь 4–5 метров трубопровода большого диаметра.

Другими словами, даже если все трубоукладчики будут находиться вплотную друг к другу, они просто не впишутся в свои габариты, величина которых находится в пределах от 4 до 7 м. То есть имеется потребность в движении трубоукладчиков, осуществляющих мон-

таж труб большого диаметра на болотистой местности в две колонны (слева и справа от трубопровода).

Кроме того, с учетом условий и специфики проведения аварийно-восстановительных работ на магистральных нефтепроводах видно, что существующие типы трубоукладчиков не способны выполнять поставленную задачу без применения каких-либо дополнительных средств повышения проходимости. Наиболее распространённым типом таких решений в нашей стране являются сборно-разборные дорожные покрытия.

Однако требований к данным устройствам до сих пор не разработано, что значительно сужает возможность их применения в реальных условиях эксплуатации.

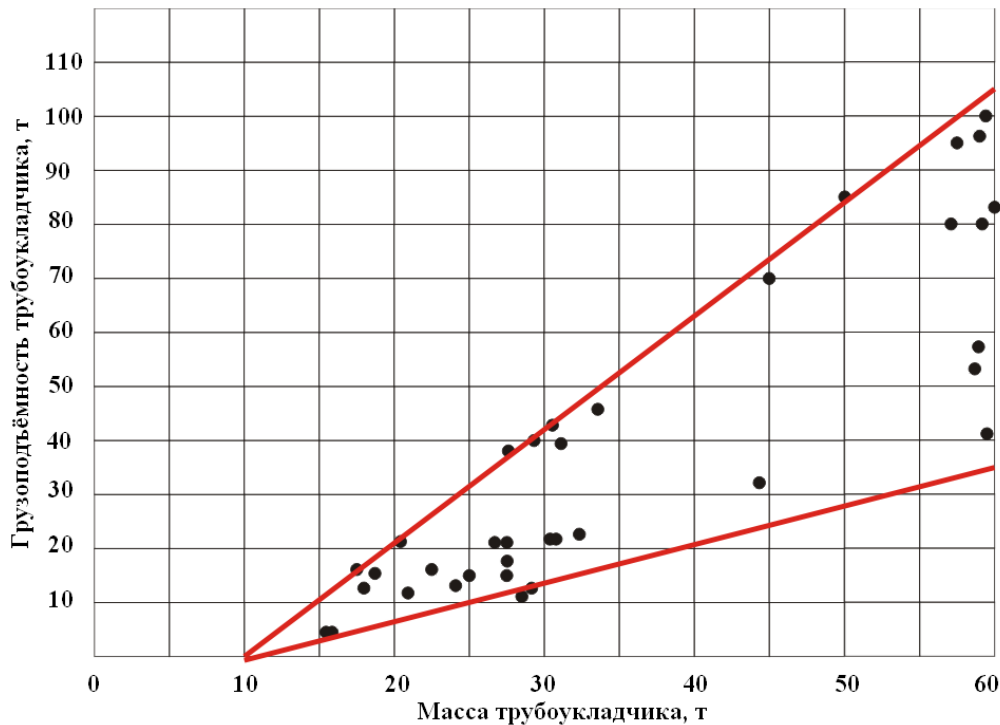


Рис. 2. Технические параметры применяемых в настоящее время трубоукладчиков

Тогда в первую очередь определим величину наклона опорной площадки от действующего опрокидывающего момента:

$$\sum F_Z = 0 \rightarrow \int_0^{L_{\text{пл}}} q dl = P_1 + P_2 = P_1(1+k) = L_P(A_1 L_{\text{пл}} + \frac{(A_2 \sin \alpha)^{A_3}}{A_3} L_{\text{пл}}^{A_3+1}) + C, \quad (1)$$

$$M = \frac{L_P}{2}(P_1 - P_2) = \frac{L_P}{2} P_1(1-k) \rightarrow P_1 = \frac{2M}{L_P(1-k)} \rightarrow M = \frac{L_P(A_1 L_{\text{пл}} + \frac{(A_2 \sin \alpha)^{A_3}}{A_3} L_{\text{пл}}^{A_3+1}) + C}{2(1+k)} (L_P(1-k)) \quad (2)$$

Так как углу поворота площадки α соответствует опрокидывающий момент, равный 0, то это значит, что величина коэффициента C в данном уравнении будет равняться $-L_P A_1 L_{\text{пл}}$, а уравнение (2) примет вид

$$M = \frac{L_P^2 \frac{(A_2 \sin \alpha)^{A_3}}{A_3} L_{\text{пл}}^{A_3+1}}{2(1+k)} \{1-k\}, \quad (3)$$

или

$$\alpha = \arcsin \left(\frac{1}{A_2 L_{\text{пл}}} \sqrt[3]{\frac{2A_3(1+k)M}{L_P^2 L_{\text{пл}}(1-k)}} \right) \leq 0,1. \quad (4)$$

Переходя к грузоподъёмности, уравнение (4) примет вид

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{1}{A_2 L_{\text{ПЛ}}} A_3 \sqrt{\frac{A_3(1+k)P_1}{L_P L_{\text{ПЛ}}}}\right) \leq 0,1. \quad (5)$$

Анализ уравнения (5) показал, что при выполнении технологическими операциями возможно управление только шириной площадки, так как величина L_P является колёй трубоукладчиков, её величина для разных типов машин составляет от 2,1 до 2,7 м, а величина $(1+k)P_1$ представляет собой общий вес трубоукладчика и трубы. Тогда выбор ширины настила на исследуемом опорном основании будет определяться из выражения

$$\left(\sqrt[A_3]{\frac{A_3(1+k)P_1}{L_P L_{\text{ПЛ}}^{A_3+1}}}\right) \leq 0,1 A_2 \rightarrow \left(\sqrt[A_3]{\frac{A_3(1+k)P_1}{L_P}}\right) \leq 0,1 A_2 L_{\text{ПЛ}}^{1+\frac{1}{A_3}} \rightarrow L_{\text{ПЛ}} \geq \sqrt[1+\frac{1}{A_3}]{10 \frac{\left(\sqrt[A_3]{\frac{A_3(G_{\text{ТУ}} + G_{\text{ТР}})}{L_P}}\right)}{A_2}}, \quad (6)$$

или

$$L_{\text{ПЛ}} \geq \sqrt[1+\frac{1}{A_3}]{10 \frac{\left(\sqrt[A_3]{\frac{A_3(G_{\text{ТУ}} + G_{\text{ТР}})}{L_P}}\right)}{A_2}}. \quad (7)$$

Решение данного уравнения показано на рис. 3 и рис. 4.

Полученное уравнение позволяет спроектировать опорную площадку необходимой ширины, обеспечивающей устойчивость трубоукладчика на болотах при выполнении ими технологических операций, связанных с подъёмом трубопровода.

Кроме того, решения указанного уравнения показывают, что в связи со степенной зависимостью между нагрузкой и грузоподъёмностью практически каждому типу болот соответствует своя допустимая грузоподъёмность трубоукладчиков, которая может быть найдена из уравнения

$$G_{\Sigma} \leq \left(\frac{A_3 - 0,1}{0,06}\right)^2.$$

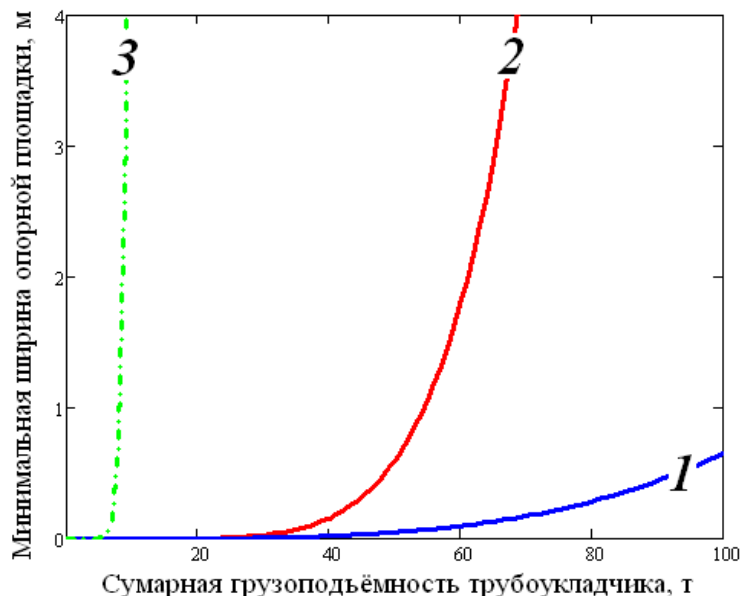


Рис. 3. Зависимость минимальной ширины опорной площадки от суммарной грузоподъёмности трубоукладчиков:

1 – для опорных оснований со значением показателя степени в зависимости «нагрузка-осадка», равным 0,75; 2 – для опорных оснований со значением показателя степени в зависимости «нагрузка-осадка», равным 0,5; 3 – для опорных оснований со значением показателя степени в зависимости «нагрузка-осадка», равным 0,33

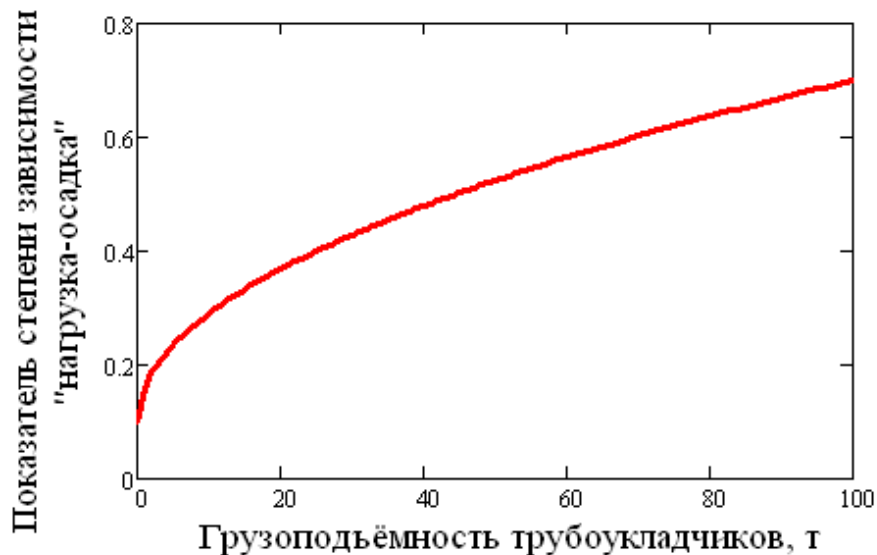


Рис. 4. Зависимость между показателями степени зависимости «нагрузка – осадка» и суммарной грузоподъемности трубоукладчиков

Библиографический список

1. **Куляшов, А.П.** Нагрузки, действующие на трубоукладчики при выполнении технологического процесса / А.П. Куляшов, И.А. Тютнев // Новое в науке XXI века: межвузовский научный сборник; НГТУ. – Н.Новгород. 2010. Вып. 6. С. 148–163.
2. **Баловнев, В.И.** Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
3. **Куляшов, А.П.** Зимнее содержание дорог / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин. – Н.Новгород, НГТУ, 2007. – 318 с.
4. **Артюшкин, А.В.** Особенности использования трубоукладчиков на болотах / А.В. Артюшкин, А.П.Куляшов, И.А. Тютнев // Строительные и дорожные машины. 2012. № 5.

Дата поступления
в редакцию 05.02.2013

V.N. Khudyakov, I.A. Tyutnev, V.A. Alexandrovich

OUTLINES OF SELECTIONS OF OPTIONS INTENDED TO WORK IN THE SWAMPS

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

The article deals with the interaction tracked propulsion pipe layers with marshy terrain feature is the presence of acting over a long period of time, the load moment due to the need to lift the pipe out of the trenches at work on its maintenance and repair. Found that the normal operation of pipelaying in the marshes is only possible with the use of special funds to improve cross - reference sites. Obtained dependencies between the geometric dimensions of the parameters of the pipe-laying areas and wetlands, where the pipeline is laid.

Key words: pipe layers, swampy terrain, load moment, depth, stability, mobility.

УДК 629.3

Ю.В. Кошелев, Д.А. Соколов, Ю.И. Молев

**ПОДВЕСКА РАБОЧЕГО ОРГАНА И ЕЁ ВЛИЯНИЕ НА СТЕПЕНЬ ОЧИСТКИ
ЗАСНЕЖЕННЫХ ДОРОГ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена вопросам взаимодействия плужного рабочего органа коммунальных машин со снежным покровом. Установлено, что нормальная работа снегоуборочной машины возможна только при скорости движения менее 1 м/с. Получены зависимости между параметрами и конструктивными решениями подвески отвала, геометрическими размерами базовой машины и объемом снега, остающимся на дороге после прохождения коммунальной машины.

Ключевые слова: коммунальная машина, плужный рабочий орган, заснеженные дороги, объем неубранного снега.

Резание льда и снега, находящегося на поверхности автомобильных дорог, плужным рабочим органом имеет ряд особенностей, обусловленных физико-механическими свойствами льда, снега и дорожной одежды, кинематическими параметрами рабочего процесса и расположения рабочего органа относительно снежно-ледяного покрова в процессе его удаления.

Разрушение льда и снега плужным рабочим органом осуществляется при помощи двух относительно независимых движений плуга – вертикального и горизонтального. При этом возможны три схемы работы снегоуборочной машины, разработанные на базе модели, предложенной А.Р. Пуртовым [4] для щётчного рабочего органа (рис. 1):

- а) схема фрезерования, когда плуг находится впереди транспортного средства;
- б) схема фрезерования, когда плуг находится посередине транспортного средства;
- в) схема фрезерования, когда плуг находится позади транспортного средства.

Рассмотрим кинематические и энергетические характеристики обоих процессов. При этом сопротивление, создаваемое системой гидравлического управления отвалом будем учитывать путём введения дополнительного момента сопротивления вращения отвала в шарнире.

Величину усилия резания на рабочем органе будем определять из суммы двух составляющих: усилия, собственно приходящегося на разрушение льда, определяемого из выражений, полученных в работах В.Ф. Кулепова, А.Р. Пуртова, А.М. Соколова [4] и силы трения отвала по очищаемой поверхности, зависящей не только от веса отвала, но и от уровня колебания рабочего органа, впервые учтённой в настоящей работе.

При равномерном движении автомобиля проекция всех сил на горизонтальную ось должна равняться 0, тогда проекция суммы сил на вертикальную ось примет вид:

$$G_{PO}g + F_{TP} \sin \alpha - N \cos \alpha = F_{\Sigma}^y \quad \text{или:} \quad G_{PO}g + N(f \sin \alpha - \cos \alpha) = F_{\Sigma}^y. \quad (1)$$

Следует отметить, что на процесс взаимодействия отвала с очищаемой поверхностью будет оказывать влияние и такой параметр, как способ установки отвала, а именно, расстояние от шарнира до режущей кромки (см. рис. 2). В дополнение к использованным обозначениям на рисунке обозначены: $z_{ш}$ – вертикальное перемещение упряжного шарнира; z_{PO} – искоемое перемещение режущей кромки рабочего органа; N_y – вертикальная составляющая реакции режущей кромки на очищаемую поверхность; l_4 – расстояние от горизонтальной оси упряжного шарнира до горизонтальной оси режущей кромки.

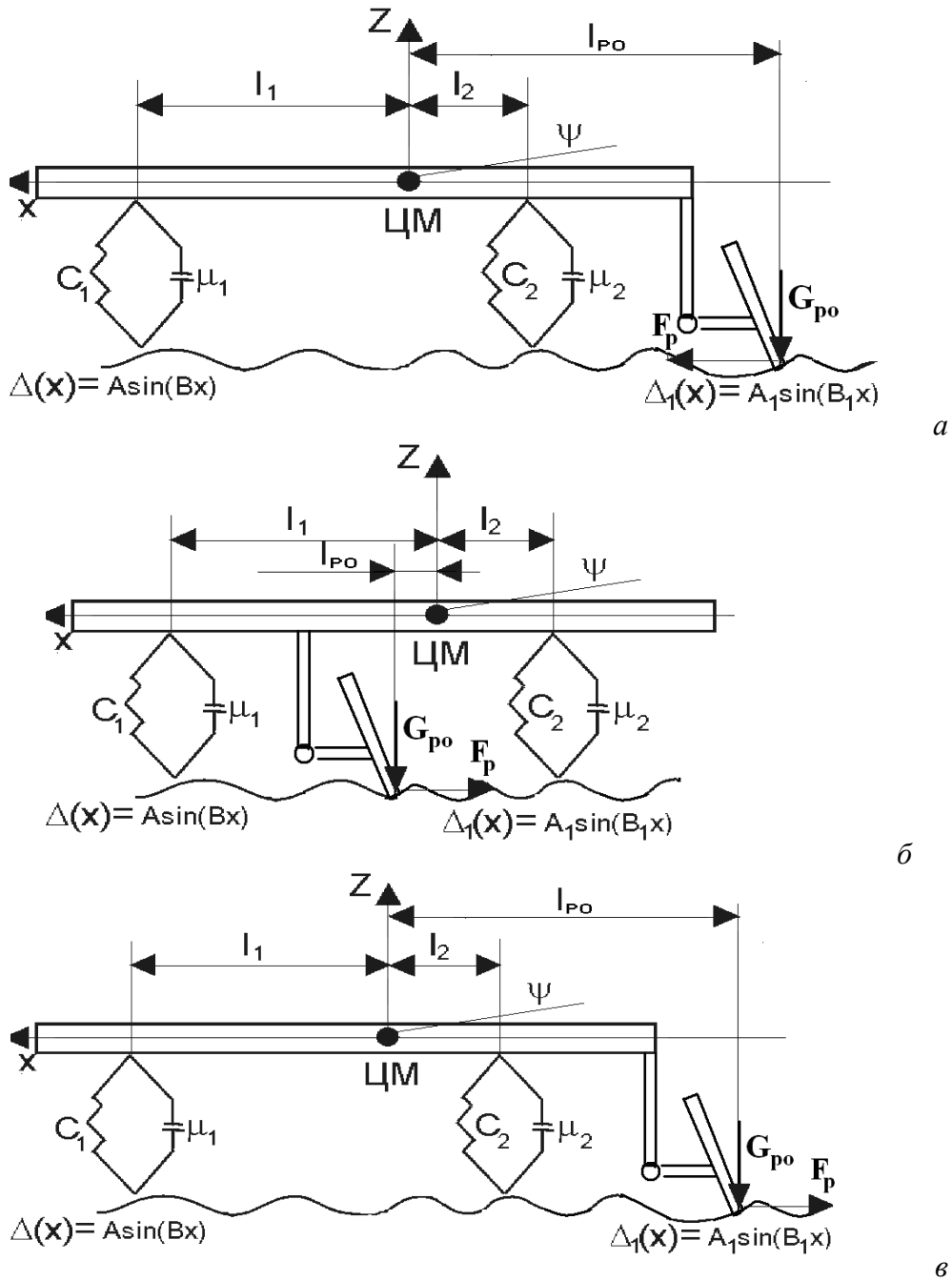


Рис. 1. Расчётные схемы к определению величин колебаний плужных рабочих органов:
 а – впереди базовой машины; б – по центры; в – позади базовой машины

Из представленной схемы (рис. 1) видно, что не вся масса рабочего органа участвует в прижатии рабочего органа к очищаемой поверхности. Действительную величину прижатия можно определить, составив уравнение моментов вокруг упругого шарнира:

$$G_{PO}l_2 \cos \alpha_1 \pm F_{\Sigma}^X l_1 - N_Y l_3 \cos \alpha_1 = 0, \quad (2)$$

где α_1 – угол наклона отвала относительно упругого шарнира, равный $\arccos \frac{z_{III} - z_{PO}}{l_4}$.

Знак \pm показывает разницу в характере движения отвала при расположении упругого шарнира до и после режущей кромки. Изменение усилия прижатия $\Delta N/N_Y$ можно определить спроектировав все силы на вертикальную ось: $\Delta N + N_Y = G_{PO}$, тогда уравнение (2) может быть записано в виде

$$G_{PO} = \frac{N_y l_3 \cos \alpha_1 \pm F_{\Sigma}^X l_1}{l_2 \cos \alpha_1}. \quad (3)$$

С учётом того, что $N_y = G_{PO}(g + z'')$, дифференциальное уравнение движения рабочего органа примет вид

$$G_{PO} l_2 = G_{PO} l_3 + G_{PO} l_3 \frac{z''_{PO}}{g} \pm F_{\Sigma}^X \frac{l_1}{l_4} (z_{III} - z_{PO}) \quad (4)$$

или

$$z''_{PO} = g \left(\frac{l_2}{l_3} \pm \frac{F_{\Sigma}^X}{G_{PO}} \frac{l_1}{l_3} \frac{z_{III} - z_{PO}}{l_4} - 1 \right). \quad (5)$$

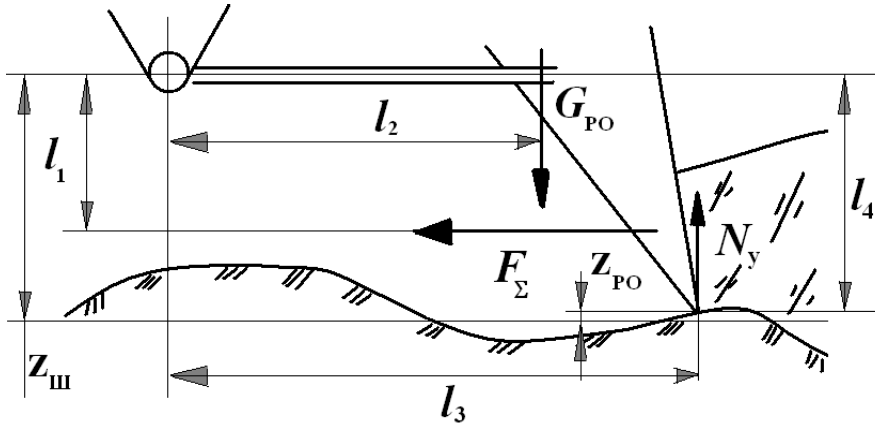


Рис. 2. Схема сил, действующих на отвал, шарнирно закреплённый на снегоуборочной машине

Суммарная горизонтальная сила состоит из силы тяги, развиваемой машиной, усилия резания снега и силы трения отвала по очищаемой поверхности. Величина этой силы может быть найдена из уравнения

$$F_{\Sigma}^X = \varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} - F_P - ftg \left(-A \left(\frac{v_{PO}}{l} \right) \sin \left(\frac{v_{PO}}{l} t \right) \right) - f \frac{F_P}{G_{PO}} \sin \left(\frac{v_{PO}}{l} t \right) \quad (6)$$

где φ - коэффициент сцепления колёс автомобиля с дорогой; f - коэффициент трения между отвалом и очищаемой поверхностью; G_{CM} - вес снегоуборочной машины; v_{PO} - скорость движения рабочего органа; A - половина амплитуды колебаний очищаемой поверхности; l - длина волны колебания очищаемой поверхности.

Упряжные шарниры снегоуборочных машин, имеющие жёсткую связь с корпусом, испытывают те же колебания, что и базовая машина. Колебания машины и упряжного шарнира принято описывать системой уравнений, полученной из анализа схемы машины, приведённой в работе [4]:

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} + \frac{2\dot{z}}{M_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} &= \frac{2}{M_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} \dot{\zeta}_i + \sum_1^n C_{pi} \zeta_i \right) \\ \ddot{\psi} + \frac{2\dot{\psi}}{J_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} l_i^2 + \frac{2\psi}{J_{II}} \sum_1^n C_{pi} l_i^2 &= \frac{2}{J_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} l_i \dot{\zeta}_i + \sum_1^n C_{pi} l_i \zeta_i \right) \\ \ddot{\zeta}_i + \frac{2\dot{\zeta}_i \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2\zeta_i (C_{pi} + C_{Si})}{m_i} &= \frac{2}{m_i} \left(C_{Si} \Delta_i + \frac{2\dot{z} \mu_{ai}}{m_i} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

где M_{II} - поддрессоренная масса машины; J_{II} - поддрессоренный момент инерции; l_i - расстояние от элементов подвески до центра массы машины; μ_{ai} - коэффициент сопротивления

амортизатора; C_{pi} , C_{Si} – коэффициенты жёсткости соответственно рессоры и шины; m – не-подрессоренная масса; Δ_l – высота неровностей рассматриваемой поверхности.

Левые части описывают свободные вертикальные и продольно-угловые колебания, а правые части описывают возмущающие воздействия. При решении данной системы уравнений ряд авторов [1, 3, 5] предлагает не рассматривать вынужденные колебания неподрессоренных масс. Расчёты, проведённые данными авторами, показывают, что при значительном упрощении вычислений данное допущение приводит к появлению дополнительной погрешности в пределах 8-12%.

Для учёта данной особенности введём в расчёты параметров колебаний поправочный коэффициент, равный 1,1. Кроме того, в работе [3] было уточнено, что если положение центра масс совпадает с центром упругости его осей, что характерно для вновь изготавливаемых автомобилей, то можно сделать ещё одно важное допущение – о независимости угловых и вертикальных перемещений машины. С учётом изложенного, а также считая, что рабочие органы не оказывают влияние на процесс колебаний, и подставляя в качестве возмущающей силы выражение $A \sin(vBx)$, выражение (7) примет вид

$$\left. \begin{aligned} \ddot{z} + \frac{2\dot{z}}{M_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} + \frac{2z}{M_{II}} \sum_1^n C_{pi} + &= \frac{2}{M_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} ABv \cos(vBx) + \sum_1^n C_{pi} A \sin(vBx) \right) \\ \ddot{\psi} + \frac{2\dot{\psi}}{J_{II}} \sum_1^n \mu_{ai} l_i^2 + \frac{2\psi}{J_{II}} \sum_1^n C_{pi} l_i^2 + &= \frac{2}{J_{II}} \left(\sum_1^n \mu_{ai} l_i ABv \cos(vBx) + \sum_1^n C_{pi} l_i A \sin(vBx) \right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

В выражениях возмущающей силы величина A совпадает со значениями амплитуды, а vBx – с частотой возмущения, которая прямо пропорционально зависит от скорости движения машины v . Таким образом, для определения максимальных перемещений упругого шарнира необходимо определить параметры возмущающего воздействия опорного основания.

Поскольку поверхность уплотнённого рабочими органами снега является случайной, стационарной, эргодичной нормально распределённой функцией, то можно найти значения максимальной высоты неровностей по правилу трёх сигм [4, 5]. Максимальная высота неровности в данном случае будет равняться шести среднеквадратичным значениям преобладающей неровности. Таким образом, анализ высот преобладающих неровностей поверхности разработанного плужным рабочим органом снега можно провести, исследовав зависимость среднеквадратичного отклонения высоты неровностей поверхности снега от средней оставшейся высоты снега на трассе.

Для отыскания данной закономерности у каждого участка во всех частотных диапазонах подсчитывались величины относительного среднего квадратичного отклонения высоты неровностей снега, которые служили ординатой точки и наносились на соответствующий график, где абсциссой точки являлось среднее значение высоты снежного покрова. Нахождение среднего квадратичного отклонения высоты неровностей в долях от средней толщины оставшегося снега позволило привести к единой зависимости участки с близкими значениями среднеквадратичных отклонений неровностей и получить зависимость среднего квадратичного отклонения поверхности снега для различных значений среднего квадратичного отклонения неровностей основания.

При аппроксимации все имеющиеся у рядов частоты в каждом диапазоне заменялись одной преобладающей частотой. Для этого было необходимо выяснить, насколько преобладающая в каждом диапазоне частота оказывает большее влияние на колебание транспортных средств, насколько рассеяна мощность внутри диапазонов, приходится ли она в основном на преобладающие частоты или рассредоточена по всему диапазону.

Анализ полученных данных позволил сделать следующие выводы. С ростом частоты неровностей высоты снега происходит их размывание по спектру, и всё больше, наряду с основной частотой, начинают играть роль и другие частоты. Полученные зависимости дают

возможность количественно оценить рассеяние частот относительно преобладающей для всех неровностей основания и снега. Результатом всего комплекса экспериментально-аналитических исследований стал выбор аппроксимационной зависимости изменения высоты уплотнённого снежного покрова, относительно трассы движения снегоуборочной техники, приведённый в работах [3– 5]:

$$\Delta_i(l) = 0,11225 \sin(12vl). \quad (9)$$

Таким образом, зная эксплуатационные параметры машины и частотную характеристику неровностей обрабатываемой поверхности, решая стандартную систему дифференциальных уравнений (8) с постоянными коэффициентами, получим зависимость изменения вертикальных и угловых колебаний транспортных средств. Зная характер колебаний центра тяжести автомобиля и его угловые перемещения, по законам геометрии можно определить линейные перемещения нижнего края рабочего органа.

Для оценки колебания габаритных точек снегоуборочных машин в рассматриваемых условиях, при движении со скоростью 25 км/час, по опорной поверхности, неровности которой описываются выражением (9), может быть предложено следующее аппроксимационное выражение:

$$\begin{cases} Z_{III} = \frac{2}{13+G_{CM}} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) & ; \text{ - для центра масс базовой машины} \\ Z_{III} = \{0,17 + (0,001(G_{CM} - 13)^2 - 0,0001G_{CM}^{2,4})\} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right); & \text{ - для крайних точек базовой машины} \end{cases} \quad (10)$$

С учётом усилия резания полученное уравнение примет вид

$$\begin{aligned} z_{PO}'' &= g \left(\frac{l_2}{l_3} \pm \frac{\varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} - F_P - ftg\left(-A\left(\frac{v_{PO}}{l}\right) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)\right) - f \frac{F_P}{G_{PO}} \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)}{G_{PO}} \right) \times \\ &\times \frac{l_1}{l_3} \frac{(0,17 + 0,01(G_{CM} - 13)^{1,3} - 0,0003G_{CM}^{1,9}) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right) - z_{PO}}{l_4} - 1). \end{aligned} \quad (11)$$

Следует отметить, что представленное уравнение справедливо только для случая движения, когда снегоуборочная машина полностью использует своё тяговое усилие. Для случаев, когда следует рассматривать равномерное движение снегоуборочной машины, сила тяги, развиваемой последней должна составлять среднее значение сил сопротивления на рабочем органе:

$\varphi \frac{G_{CM}}{G_{PO}} = F_P + G_{PO} \frac{l_2}{l_3}$. Исходя из этого, уравнение (11) примет вид

$$z_{PO}'' = \left(\frac{l_2}{l_3} \cos\left(\sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)\right) - 1 \right) g \pm \frac{F_P}{G_{PO}} tg\left(-A\left(\frac{v_{PO}}{l}\right) \sin\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right)\right) \frac{l_1}{l_3 \cos \alpha_1}. \quad (12)$$

При этом перемещение рабочего органа относительно очищаемой поверхности определится из уравнения

$$Z_{PO} = z_{PO} - A \cos\left(\frac{v_{PO}}{l} t\right). \quad (13)$$

Решение указанных уравнений показано на рис. 3.

Из рисунка видно, что качество очистки дороги зависит в первую очередь от перемещения рабочего органа вниз относительно очищаемой поверхности.

Принимая за расчётный показатель максимальную величину остаточной толщины снежных накатов на дороге можем оценить влияние на процесс удаления снега таких пара-

метров, как толщина срезаемого рыхлого снега (рис. 4), скорость уборки (рис. 5) и массу рабочего органа (рис. 6).

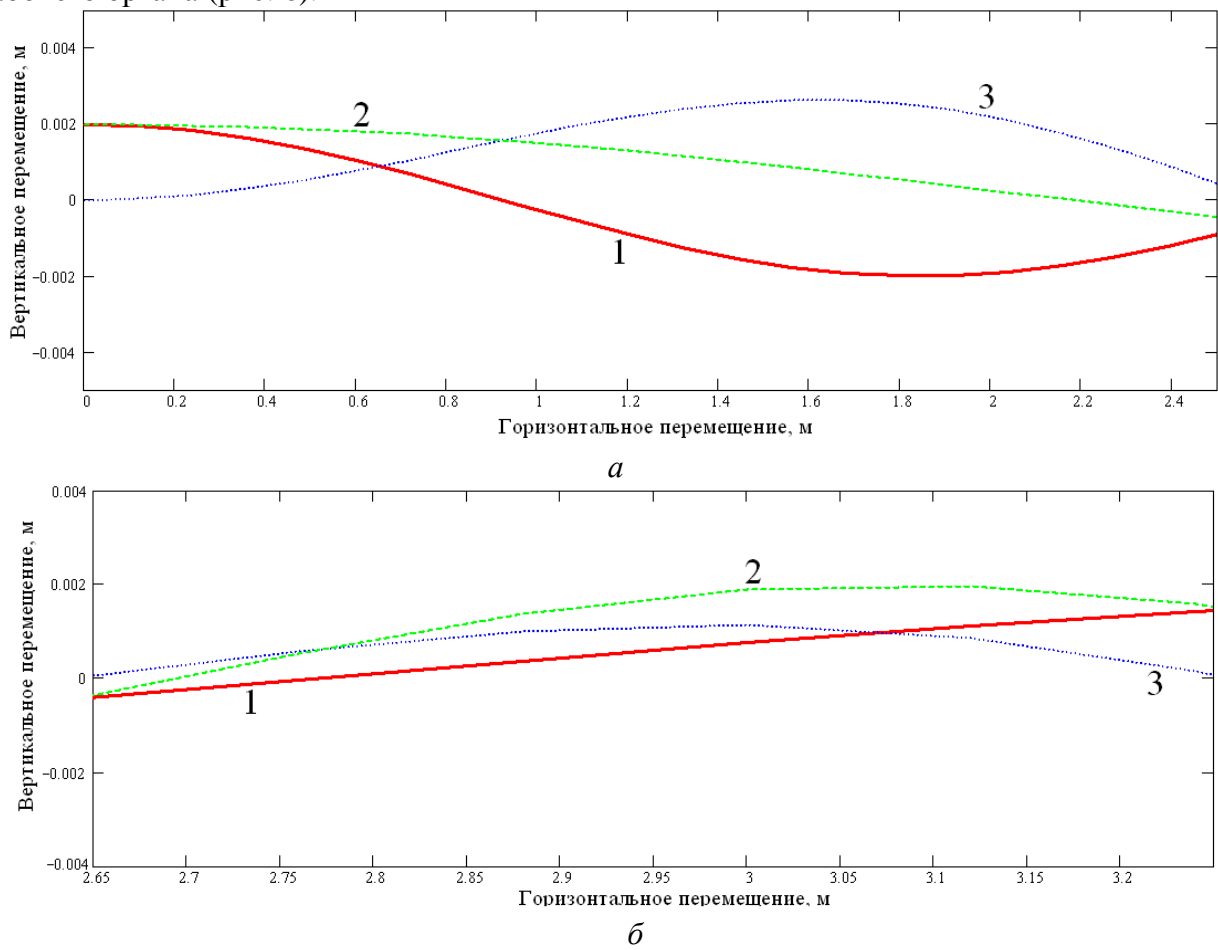


Рис. 3. Зависимость перемещения рабочего органа относительно очищаемой поверхности при движении со скоростью 1 м/с:

а – при перемещении отвала вниз; *б* – при перемещении отвала вверх;

1 – профиль очищаемой поверхности; *2* – траектория перемещения отвала массой 100 кг;

3 – остаточная толщина снега на дороге

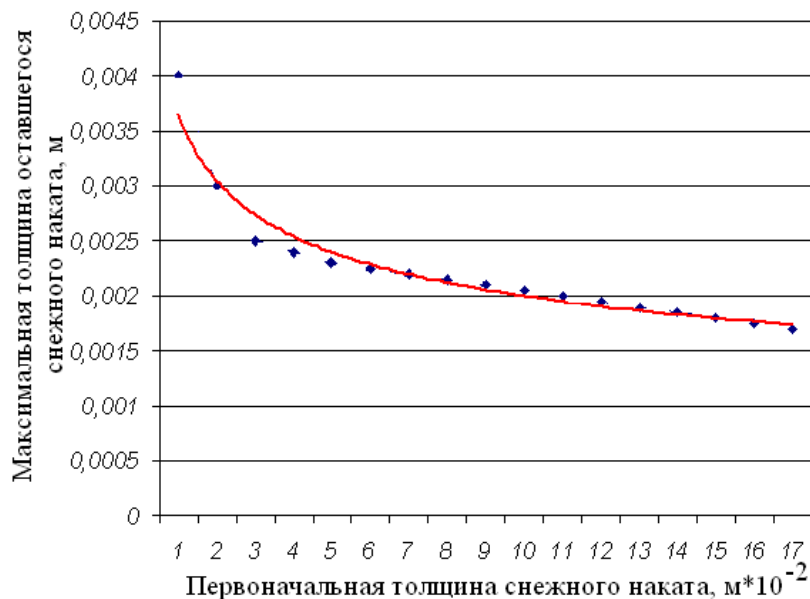


Рис. 4. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от его начальной толщины



Рис. 5. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от скорости движения снегоуборочной машины

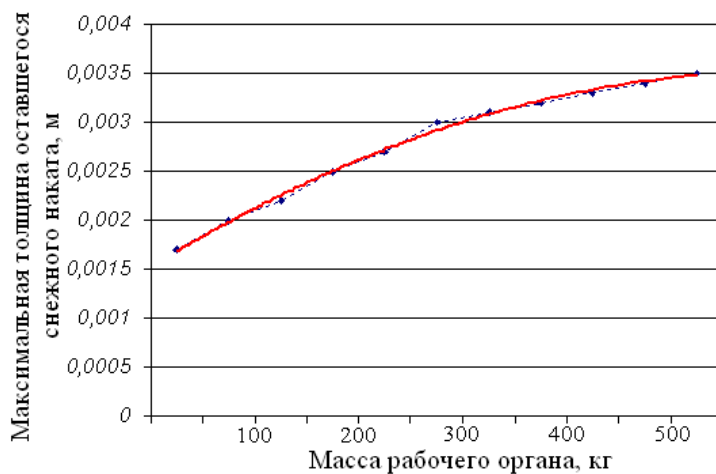


Рис. 6. Изменение максимальной толщины неудалённого снежного наката от массы рабочего органа

Полученные данные свидетельствуют о том, что схема с шарнирным креплением рабочего органа к корпусу базовой машины обеспечивает гораздо более качественную очистку поверхности дорог от снега. Кроме того, полученные данные позволяют провести определённый выбор таких параметров машин, которые бы обеспечивали максимально возможное качество снегоочистки. Так, при соотношении $\frac{F_P}{G_{PO}} \geq 500 \text{ м/с}^2$ движение отвала будет ко-

пировать очищаемую поверхность. Однако технически выдержать заданное соотношение не представляется возможным. С учётом того, что масса отвала и усилие резания растут прямо пропорционально его ширине, следует признать, что качество снегоочистки не зависит от ширины рабочего органа. Поэтому единственным эффективным способом повышения качества очистки дорог от снежного наката является снижение скорости уборки до значений меньших, чем 1 м/с.

Библиографический список

1. **Афанасьев, В.Л.** Статистические характеристики микропрофиля автомобильных дорог и колебаний автомобиля / В.Л. Афанасьев, А.А. Хачатуров // Автомобильная промышленность. 1966. № 2. С. 15–23.
2. **Баловнев, В.И.** Моделирование процесса взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высш. шк., 1981. – 335 с.
3. **Куляшов, А.П.** Зимнее содержание дорог / А.П. Куляшов, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин; НГТУ. – Н. Новгород, 2007. – 318 с.
4. Пуртов А.Р. Выбор конструктивных параметров рабочего органа для удаления снежных накатов и льда с бетонных покрытий: дисс. ...канд. тех. наук 05.05.04. Н.Новгород, 2002. –191 с.
5. **Шапкин, В.А.** Применение метода наименьших квадратов в нахождении статистических характеристик деформируемой опорной поверхности / ГПИ. - Горький, 1985. Деп. в ЦНИИТЭ 24.10.85. № 112-сд.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

Y. Koshelev, D. Sokolov, Y. Molev

**SUSPENSION OF WORKING BODY AND ITS INFLUENCE ON THE DEGREE
OF CLEANING THE SNOW-COVERED ROADS**

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

The article deals with the interaction of the working body of the plow utility vehicles with snow cover. The normal operation of a snowplow is only possible at a speed of less than 1 m / s. Received the dependencies between parameters and design solutions suspension of blade, the geometrical dimensions of the base machine and the amount of snow remaining on the road after passing the machines.

Key words: plow working body, snow-covered roads, the amount of uncollected snow.

УДК 629.113

В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, А.М. Беляев, А.В. Папунин, В.В. Беляков

ФОРМИРОВАНИЕ СНЕЖНОГО ПОКРОВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ЛАНДШАФТА МЕСТНОСТИ И ОЦЕНКА ПОДВИЖНОСТИ ТРАНСПОРТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН В ТЕЧЕНИЕ ЗИМНЕГО ПЕРИОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Дано определение подвижности транспортно-технологических машин. Рассматривается частная задача подвижности - проходимость машины в зимний период. Приведена математическая модель изменения характеристик снежного покрова в течение зимнего периода. Даны коэффициенты, учитывающие особенности ландшафта на глубину снега, определяемые его характером, растительностью, ветром, солнечной активностью и прочими факторами. Приводятся графики изменения глубины и плотности снега для снежной целины и леса. Проанализировано изменение силы сопротивления, силы тяги и запаса силы тяги в зависимости от времени. Также показано влияние ландшафта на эти параметры. Делается вывод о времени потери проходимости машины в течение зимнего периода и как следствие простоя транспортного средства. Исследования проведены при поддержке грантов Президента РФ.

Ключевые слова: подвижность, статистические характеристики, снег, ландшафт.

Одним из важнейших свойств, характеризующих транспортные средства, является подвижность. *Подвижность* – это интегральное эксплуатационное свойство транспортно-технологических машин (ТТМ), определяющее способность ТТМ выполнять поставленную задачу с оптимальной адаптивностью к условиям эксплуатации и состоянию самой машины. Можно выделить потерю подвижности по живучести и мобильности.

Живучесть (подвижность по живучести) – это отказная надежность транспортного средства (ТС). *Мобильность (подвижность по мобильности)* – эксплуатационная надежность ТС. При этом *проходимость* – это эксплуатационное свойство, определяющее возможность движения автомобиля в ухудшенных дорожных условиях, по бездорожью, которая относится к критическим условиям подвижности машины по мобильности [1–5, 15].

Проходимость транспортных средств по снегу определяется как конструкцией самой машины, так и характеристиками опорного основания. При оценке проходимости по снегу определяющими факторами являются глубина и плотность снега. На основании [16, 17] можно получить данные по вероятностным характеристикам рассматриваемых параметров.

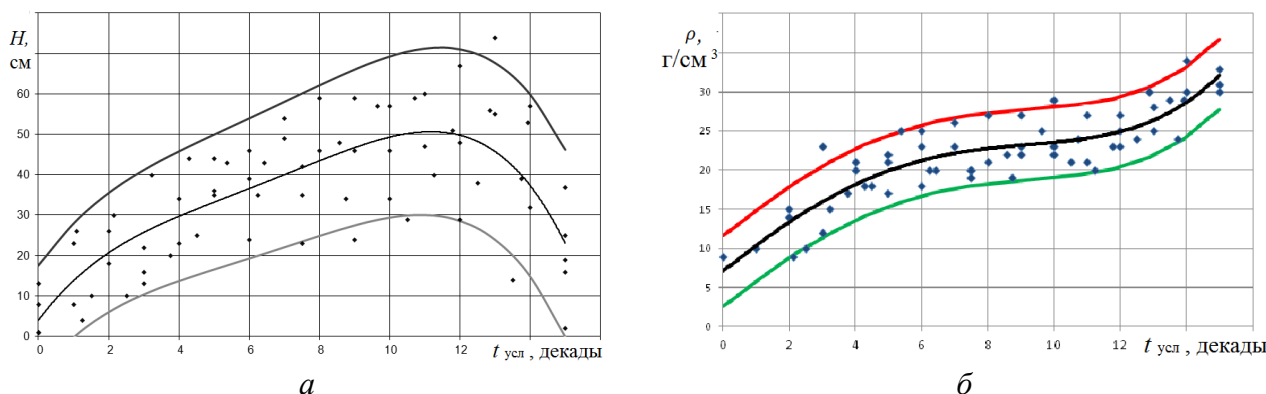


Рис. 1. Характеристики снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода по станции метеонаблюдения «Шахунья» Нижегородской области, полученные по результатам многолетних наблюдений:
а – глубина; б – плотность

Средние значения глубины снежного покрова определяются по зависимости

$$H = \sum_{i=0}^4 a_i t_{\text{усл}}^i,$$

где a_i – эмпирические коэффициенты; $t_{\text{усл}}^i$ – текущая условная продолжительность зимнего сезона с установившимся снежным покровом.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей глубин снежного покрова определяется по

$$H_{5(95)} = H \mp e^{0,5} \cdot \zeta \cdot \sigma,$$

где $\zeta = 15^{-1}(e - 2)t_{\text{усл}} - 1$ – эмпирический коэффициент; σ – среднеквадратичное отклонение для станции метеонаблюдения.

Средние значения плотности снежного покрова определяются по зависимости

$$\rho = \sum_{i=0}^4 b_i t_{\text{усл}}^i,$$

где b_i – эмпирические коэффициенты.

Зависимости для определения границ 5 и 95% вероятностей плотностей снежного покрова определяется по

$$\rho_{5(95)} = \rho \mp e^{0,5} \cdot \sigma,$$

где σ – среднеквадратичное отклонение для станции метеонаблюдения.

Сроки залегания установившегося снежного покрова можно принять 14 ± 2 декады. Для связи реальных сроков залегания установившегося снежного покрова и условных предложена зависимость

$$t_{\text{усл}} = \frac{T_{\text{усл}}(t - 1)}{T - 1} + 1,$$

где t – текущая декада; T – число декад продолжительности залегания снежного покрова.

Однако для прогнозирования подвижности на местности необходимо создание математических моделей, учитывающих особенности ландшафта, так как зависимости на рис. 1 и рис. 2 даны для мерных участков, соответствующих ровным полям.

Для адекватности модели необходимо добавить соответствующие коэффициенты, учитывающие районирование:

$$\begin{aligned} H_{\text{действ}} &= H k_H^{\text{местн}}, \\ \rho_{\text{действ}} &= \rho k_\rho^{\text{местн}}, \end{aligned}$$

где $H_{\text{действ}}$, $\rho_{\text{действ}}$ – глубина и плотность снега с учетом особенностей ландшафта; $k_H^{\text{местн}}$, $k_\rho^{\text{местн}}$ – коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину и плотность снега, полученные на основании экспериментальных данных.

Изменение параметров глубины и плотности снега связано с характером ландшафта местности, растительностью, ветром, солнечной активностью и прочими факторами

На основании исследований, проведенных авторами работы, а также [18] можно выделить некоторые характерные участки, на которых формирование снега происходит с учетом предложенных зависимостей и поправочных коэффициентов.

В работе [18] приводятся следующие данные о влиянии ландшафта на глубину залегания снежного покрова (табл. 1).

Таблица 1

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину снега

Тип ландшафта	Коэффициент
Целина	1
Открытая ледяная поверхность озер	0,4-0,5
Пашня	0,9
Холмистые районы	1,2
Крупные лесные массивы	1,3-1,4
Речные русла	3
Заросли камыша на озерах	3
Лесные колки шириной 100-200 м и лесные опушки	3,2-3,4

Однако данные, приведенные в этом исследовании, показывают только изменение глубины снежного покрова. Как показали исследования авторов, для характерных участков плотность снега также меняется, например, для снежных покровов лесов (исключая лесные опушки и узкие лесополосы) значения предлагаемых коэффициентов равны: $k_H^{\text{местн}} = 1,3 - 1,4$; $k_\rho^{\text{местн}} = 0,85 - 1$.

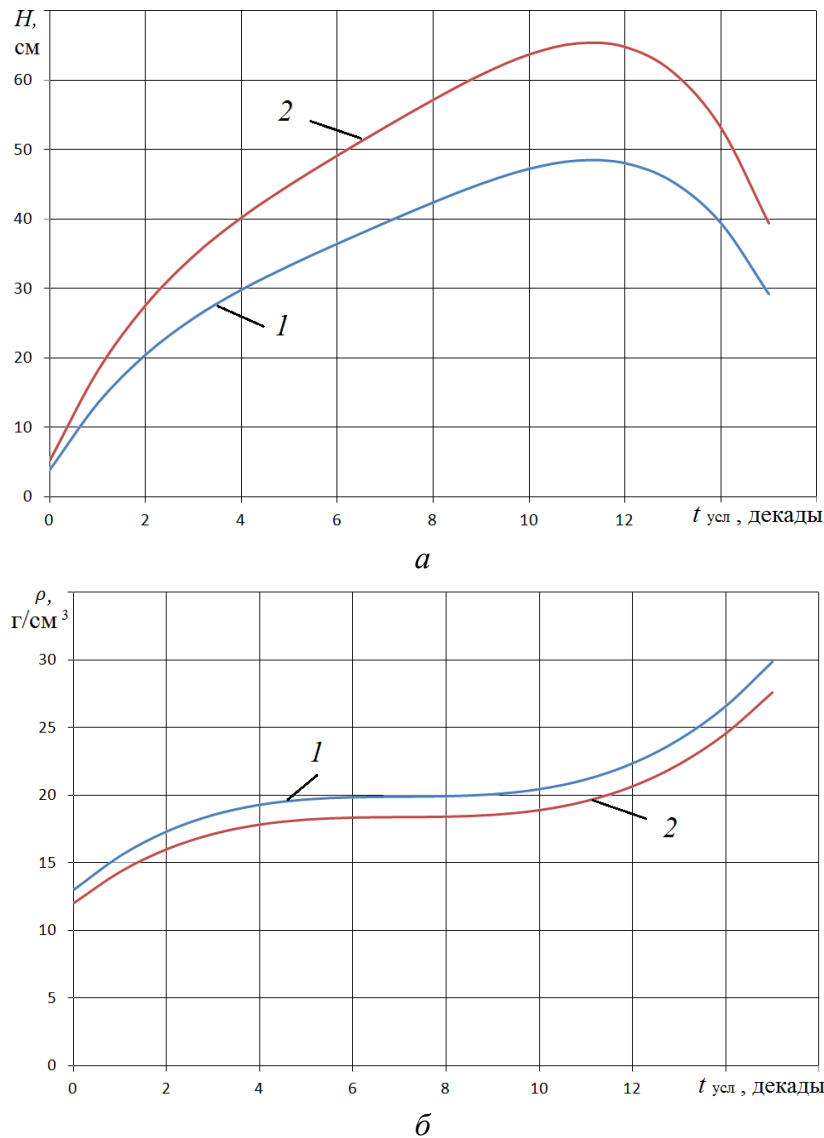


Рис. 2. Пример влияния ландшафта на характеристики снежного покрова в зависимости от условной продолжительности зимнего периода для целины (1) и леса (2):
a – глубина; *б* – плотность

Полученные данные позволяют спрогнозировать характеристики снежного покрова с учетом особенностей ландшафта и характеристик дорожно-грунтового основания [6, 8, 10], необходимые при оценке подвижности движения колесных машин по снегу.

Значения прочих параметров, необходимых для оценки подвижность ТТМ по снегу, могут быть найдены по зависимостям из работ [12, 14].

Для того чтобы наглядно оценить возможность движения ТТМ в течение зимы, воспользуемся критерием запаса силы тяги в зависимости от времени.

$$\Delta F_\varphi = F_\varphi - F_f,$$

где F_φ - сила тяги, развиваемая ТТМ; F_f - сопротивление движению.

Сопротивление движению при передвижении колесной машины по снегу включает в себя следующие составляющие [7, 9, 11, 13]:

$$F_f = F_{f_c} + F_{f_{бэб}} + F_{f_{эб}} + F_{f_{фг}} + F_{f_{дн}} + F_{f_{кр}} + F_{f_{\alpha}} + F_{f_w},$$

где F_{f_c} - сила сопротивления, обусловленная деформацией снежного полотна пути колесом машины; $F_{f_{бэб}}$ - приведенная сила сопротивления от экскавационно-бульдозерных эффектов с внешней стороны колеса; $F_{f_{эб}}$ - сила сопротивления от экскавационно-бульдозерных эффектов; $F_{f_{фг}}$ - сила сопротивления движению от фрезерования настовой корки и внутримассивных ледяных прослоек; $F_{f_{дн}}$ - сила сопротивления, возникающая при погружении движителя, превышающем дорожный просвет; $F_{f_{кр}}$ - сила сопротивления движению от крюковой нагрузки; $F_{f_{\alpha}}$ - сила сопротивления разгону, F_{f_w} - сила сопротивления воздуха.

Построим зависимости силы тяги, силы сопротивления и запаса силы тяги на основании средних значений глубины и плотности снежного покрова, меняющихся в течение зимнего периода с установившимся снежным покровом.

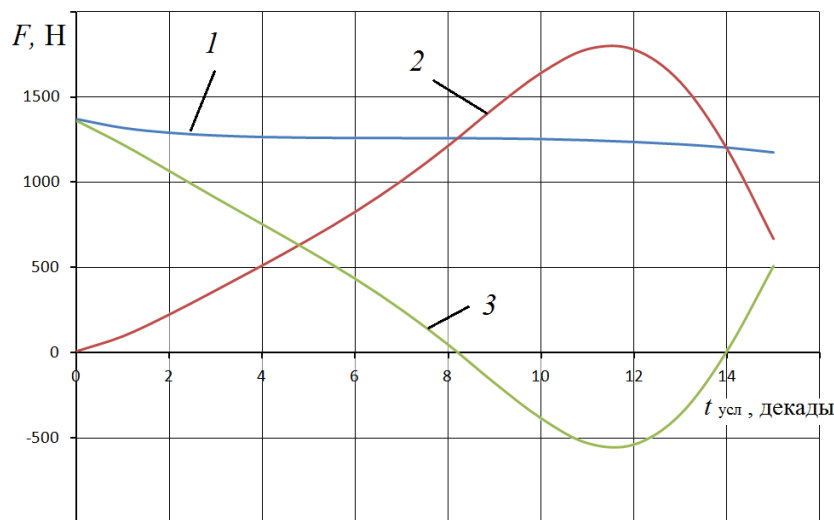


Рис. 3. Изменение силы тяги (1), силы сопротивления (2) и запаса силы тяги (3) в зависимости от условной продолжительности зимнего периода

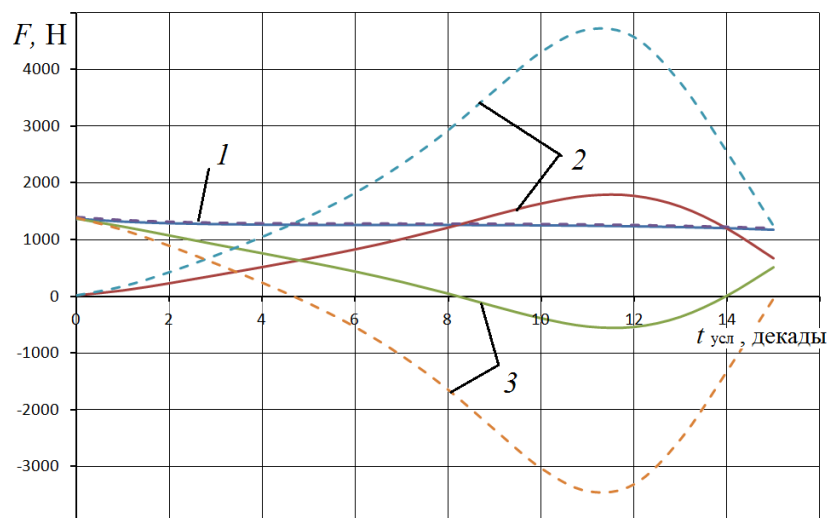


Рис. 3. Влияние ландшафта (пунктирная линия) на силу тяги (1), силу сопротивления (2) и запас силы тяги (3) в зависимости от условной продолжительности зимнего периода

По зависимостям на рис. 3 можно судить о времени, когда ТТМ теряет свою проходимость в течение зимнего периода. Приведенные графики характерны для движения по снежной целине. Рассмотрим, как влияет характер ландшафта на подвижность машины.

На приведенных графиках показаны зависимости для снежной целины (линия) и леса (пунктир). Таким образом, можно оценить не просто подвижность и проходимость ТТМ по снегу, а учесть характер распределения снежного покрова в течение зимы, а также специфику влияния ландшафта на эти параметры.

Исследования проведены при поддержке грантов Президента РФ.

Библиографический список

1. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментально-теоретические исследования опорной проходимости многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №3. С. 162–170.
2. **Барахтанов, Л.В.** Экспериментальные исследования поворота многоосных колесных машин / Л.В. Барахтанов [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2012. №4. С. 175–181.
3. **Беляков, В.В.** 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.
4. **Беляков, В.В.** 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.
5. **Галкин, Д.А.** Влияние параметров шин на подвижность многоосных колесных машин / Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. www.science-education.ru/106-7882 (дата обращения: 24.12.2012).
6. **Галкин, Д.А.** Математическая модель преодоления разрушаемого уступа многоосной колесной машиной/ Д.А. Галкин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 28-29.
7. **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 № 6. С. 3–3.
8. **Гончаров, К.О.** Проведение замеров микропрофиля поверхности движения типа ровное поле/ К.О.Гончаров, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 29-30.
9. **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. № 12. С. 10-10.
10. **Зайцев, А.С.** Математическая модель преодоления рва многоосной колесной машиной / А.С. Зайцев [и др.] // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 39-40.
11. **Зезюлин, Д.В.** Влияние параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снегу / Д.В. Зезюлин [и др.] // Современные проблемы науки и образования. – 2012. № 5. www.science-education.ru/105-6927 (дата обращения: 17.09.2012).
12. **Зезюлин, Д.В.** Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу: дисс... канд. техн. наук / Зезюлин Д.В. 05.05.03. – Н. Новгород, 2013. –218 с.
13. **Зезюлин, Д.В.** Расчетный анализ влияния параметров движителей на показатели эффективности колесных машин при движении по снежному полотну пути / Д.В. Зезюлин, В.С. Макаров, В.В. Беляков // Леса России и хозяйство в них. 2012. Т. 1-2. № 42-43. С. 41-42.
14. **Макаров, В.С.** Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу: дисс... канд. техн. наук / Макаров В.С.: 05.05.03. – Н. Новгород, 2009. –161 с.
15. **Макаров, В.С.** Определение характеристик микропрофиля дорог, предназначенных для движения транспортно-технологических машин / В.С. Макаров [и др.] // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 5. <http://www.science-education.ru/105-7111> (дата обращения: 05.10.2012).
16. **Макаров, В.С.** Статистический анализ характеристик снежного покрова / Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1; URL: <http://www.science-education.ru/107-8289> (дата обращения: 05.02.2013).

- 17 **Макаров, В.С.** Оценка эффективности движения колесных машин на основании статистических характеристик снежного покрова / В.С. Макаров [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №1. С. 150–1571.
- 18 Снег: справочник: [пер. с англ.] / под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

V.S. Makarov, D.V. Zezyulin, A.M. Belyaev, A.V.Papunin, V.V. Belyakov

**FORMATION OF SNOW IN RELATION TO TERRAIN LANDSCAPE
AND EVALUATION MOBILITY OF TRANSPORT AND TECHNOLOGICAL
VEHICLE DURING THE WINTER PERIOD**

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

Subject/topic/purpose: Experimental and theoretical studies of changes in the characteristics of the snow cover during the winter period.

Methodology of work: Assessing the impact of snow cover and terrain features on the mobility and permeability of transport and technological machines.

Results/application: Results are important for the activities of research laboratories and automotive companies involved in the development of wheeled transport and technological machines. Experimental and theoretical studies can be used to predict the mobility and permeability of the vehicle, with the possibility of his movement on snow-covered terrain.

Findings: It is concluded that the loss of time terrain vehicles during the winter and as a result of vehicle downtime.

Key words: mobility, statistical characteristics, snow, landscape.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 624. 042:629.5.024

В.И. Сутырин¹, Е.И. Короткая²

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МЕТОДИКА ДОСТИЖЕНИЯ НОРМАТИВНОГО КАСКАДНОГО ПЕРЕПАДА ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРАЦИИ АМОРТИЗИРОВАННОГО СУДОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Балтийский федеральный университет им. И. Канта, г. Калининград¹,
Балтийская государственная академия рыбопромыслового флота, г. Калининград²

В работе предложена и реализована расчетно-экспериментальная методика достижения нормативного каскадного перепада характеристик вибрации амортизированного судового оборудования. Основная задача состоит в определении каскадной жесткости, возвращающей систему амортизации оборудования в пределы нормативного каскадного изменения параметров вибрации. Решение такой задачи возможно расчетно-экспериментальным способом, основанном на методе структуризации квазистатической модели. Этот метод заключается в построении преобразованной расчетной схемы, объединяющей ограниченное число расчетных узлов исходного конечно-элементного разбиения анализируемого объекта. Приводятся и анализируются результаты решения тестовых задач. Проведенные исследования подтвердили возможности сохранения высокой точности получаемого результата.

Ключевые слова: Анализ колебаний, корпусные конструкции, метод конечных элементов, квазистатическая модель, прием конденсации.

Судовое оборудование и механизмы (двигатели, генераторы, и др.) крепятся с целью снижения вибрации к корпусу судна через амортизирующие элементы-амортизаторы различных конструкций (рис. 1). В случае применения двухкаскадной амортизации амортизируемый объект 2 через амортизаторы первого каскада опирается на промежуточную опорную раму 3, которая, в свою очередь, через амортизаторы второго каскада – на палубу 1, платформу или днище судна.

При сдаче судна инструментальным путем замеряется каскадный перепад вибрационных характеристик (амплитуд, виброускорений). Если он не достигает нормативных значений, то возникает проблема изменения параметров виброзащитной системы. Задача заключается в том, чтобы определить новую каскадную жесткость, возвращающую систему амортизации оборудования в пределы нормативного каскадного изменения параметров вибрации, не прибегая к экспериментальному подбору амортизаторов на судне и исключая возможные резонансы системы на заданных частотах вынуждающих внешних сил.

Поскольку наибольший интерес представляют, как правило, вертикальные колебания системы, решение задачи в первом приближении обычно строится на основе трехмассовой модели (рис. 2), объединяющей M_2 – массу опорной платформы; M_1 – массу оборудования; C_1, C_2 – каскадные жесткости (их значения могут оказаться неизвестными); M_3 и C_3 – массу и жесткость, приведенные к месту закрепления оборудования (А) со стороны корпуса. Учитывается, что первая масса находится под действием гармонической вынуждающей силы с амплитудой F и частотой изменения ω . Для максимального упрощения математического описания колебательного процесса в настоящей статье рассматривается вариант опирания обо-

рудования на амортизаторы пружинного типа. Вопросы, связанные с учетом демпфирования колебаний, предполагается рассмотреть в отдельной публикации.

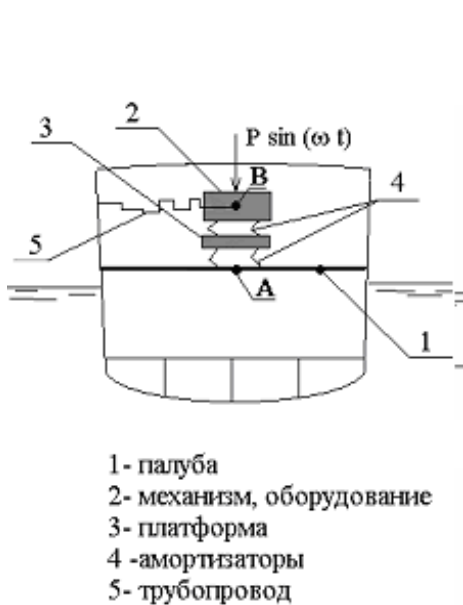


Рис. 1. Двухкаскадная амортизация

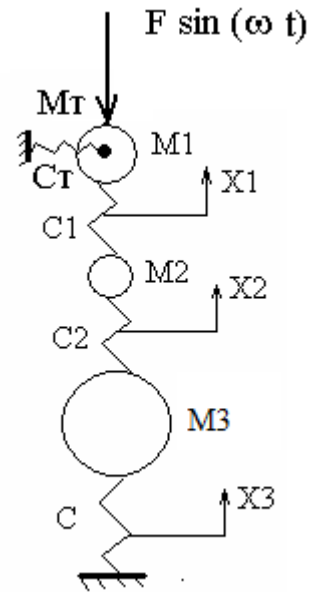


Рис. 2. Трехмассовая модель

При подсоединении к оборудованию трубопровода 5 в расчет вводятся дополнительные обобщенные коэффициенты массы M_T и жесткости C_T первого каскада, получаемые путем предварительного приведения массы и жесткости [1] трубопровода к точке его соединения с оборудованием (B) в соответствии с равенствами [2, 3]:

$$\begin{aligned}
 C_T &= r_B - \{R_{B\Omega}\} \cdot \|R_{\Omega\Omega}\|^{-1} \cdot \{R_{\Omega B}\}; \\
 M_T &= m_B + \{G\}\{G\}^T; \\
 \{G\} &= -\{L\}^T \cdot \|M_{\Omega\Omega}\|^{-\frac{1}{2}}; \quad \{L\} = -\|R_{\Omega\Omega}\|^{-1} \cdot \{R_{\Omega B}\},
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где r_B, m_B – коэффициенты жесткости и массы точки B в исходных матрицах трубопровода; $\|R_{\Omega\Omega}\|$ и $\|M_{\Omega\Omega}\|$ – блок-матрицы коэффициентов жесткости и массы исключаемых узлов (области модели Ω) трубопровода; $\{R_{B\Omega}\}$ и $\{R_{\Omega B}\} = \{R_{B\Omega}\}^T$ – векторы коэффициентов жесткости взаимного влияния узлов.

На первом этапе решения задачи определяются, если это необходимо, жесткости каскадов системы существующей амортизации. Система разрешающих уравнений имеет вид:

$$\begin{vmatrix}
 C_1 + C_T & -C_1 & 0 \\
 & C_1 + C_2 & -C_2 \\
 \text{симм.} & & C_2 + C_3
 \end{vmatrix}
 - \omega^2
 \begin{vmatrix}
 M_1 + M_T & 0 & 0 \\
 & M_2 & \\
 \text{симм.} & & M_3
 \end{vmatrix}
 \begin{vmatrix}
 X_1 \\
 X_2 \\
 X_3
 \end{vmatrix}
 =
 \begin{vmatrix}
 F \\
 0 \\
 0
 \end{vmatrix},
 \tag{2}$$

где $X = \{X_1, X_2, X_3\}^T$ – вектор амплитуд колебаний масс.

Переход к алгебраическому виду и последующие преобразования позволяют получить зависимости для определения каскадных жесткостей C_1 и C_2 :

$$C_1 = \{F + X_1 \cdot [\omega^2 (M_1 + M_T) - C_T]\} \cdot (X_1 - X_2)^{-1};
 \tag{3}$$

$$C_2 = [X_2 \cdot (\omega^2 \cdot M_2 - C_1)] \cdot (X_2 - X_3)^{-1}.$$

Для определения числовых значений C_1 и C_2 необходимо и достаточно экспериментально измерить амплитуды колебаний масс X_1 , X_2 и основания X_3 . Если колебаниями основания можно пренебречь, то амплитуду X_3 следует положить в (3) равной нулю.

На втором этапе осуществляется подбор новых каскадных жесткостей для максимизации отношения амплитуд (X_1 / X_3) вплоть до нормативного значения и выше. В случае, когда колебания основания (корпуса) могут оказать существенное влияние на результат решения системы (2), необходимо дополнительно определить обобщенные коэффициенты C_3 и M_3 .

В зависимости от конкретных условий определение обобщенной массы и обобщенной жесткости возможно расчетно-экспериментальным способом. Он заключается в использовании конечно-элементной модели конструкции корпуса либо ее фрагмента. Фрагмент выбирается в таких границах, чтобы дальнейшее их расширение не сказывалось существенным образом на получаемом результате, т.е. не изменяло результат за пределы допустимой погрешности. Затем выполняется прямой расчет конструкции на действие вертикальной единичной силы, приложенной в месте опирания оборудования A (рис. 1).

Обобщенная жесткость C_3 может быть получена как обратная величина податливости конструкции в точке приложения силы. Экспериментальный путь определения C_3 предполагает непосредственное измерение податливости относительно выбранной (несмещаемой) базы экспериментальными средствами. Аналогичный экспериментальный способ можно применить и для определения C_T . В этом случае, устанавливая вибратор массой M_V в точку B отсоединенного трубопровода и определяя амплитуду X_B , можно определить и M_T :

$$M_T = (C_T X_B \cdot (-F)) \cdot \omega^{-2} - M_V. \quad (4)$$

Из (2) также следует:

$$M_3 = [X_3 \cdot (C_2 + C_3) - C_2 \cdot X_2] \cdot X_3^{-1} \omega^{-2}. \quad (5)$$

Найденные значения C_2 , C_3 и M_3 позволяют определить жесткости и произвести подбор амортизаторов при условии $(X_1/X_3) = f(C, M, F, \omega) \rightarrow \max > (X_1/X_3)_{\text{доп}}$, для заданной области допустимых значений перемещений и жесткостей $C_i^{\min} < C_i < C_i^{\max}$, ($i=1,2$); $\omega^{\min} < \omega < \omega^{\max}$, где $(X_1/X_3)_{\text{доп}}$ – нормативное (допускаемое) значение каскадного перепада амплитуд колебаний. Вариация частоты ω при решении системы (2) с новыми каскадными жесткостями обеспечивает оценку и контроль резонансных частот системы.

В общем случае объекты колебательной системы могут иметь более сложную структуру, что предопределяет необходимость достаточно сложного в реализации расчетного анализа пространственных деформаций конструктивных элементов оборудования (механизмов), промежуточных рам и корпусных конструкций судна (рис.5). Пространственные расчетные модели приводят к существенному усложнению расчетного анализа. Поэтому в указанном случае целесообразно построить преобразованную расчетную схему колебательной системы, объединяющую ряд узлов приведения, назначаемых в местах опирания, концентрации масс и приложения изменяющейся внешней нагрузки. В зависимости от характера решаемой задачи в узлах приведения необходимо сохранять от 1 до 6 степеней свободы.

Матричные равенства (1) позволяют распространить изложенную расчетную методику на указанный случай. С этой целью их можно представить в следующем виде [3-4]:

$$\|C_{\rho\rho}\| = \|R_{\rho\rho}\| - \|R_{\rho\Omega}\| \cdot \|R_{\Omega\Omega}\|^{-1} \cdot \|R_{\Omega\rho}\|; \quad (6)$$

$$\|M_{pp}\| = \|M_{pp}\| + \|G\| \cdot \|G\|^T; \quad (7)$$

$$\|G\| = -\|L\|^T \cdot \|M_{\Omega\Omega}\|^{-\frac{1}{2}}; \quad \|L\| = -\|R_{\Omega\Omega}\|^{-1} \cdot \|R_{\Omega p}\|,$$

где $\|C_{pp}\|$ и $\|M_{pp}\|$ – матрицы коэффициентов жесткости узлов приведения; $\|R_{pp}\|$, $\|M_{pp}\|$ – аналогичные матрицы коэффициентов в исходных матрицах колебательной системы; $\|R_{\Omega\Omega}\|$, $\|M_{\Omega\Omega}\|$ – блок - матрицы коэффициентов жесткости и массы исключаемых узлов (области модели Ω) системы; $\|R_{p\Omega}\|$ и $\|R_{\Omega p}\| = \|R_{p\Omega}\|^T$ – блок- матрицы коэффициентов жесткости взаимного влияния узлов.

Равенства (6)–(7) позволяют решить проблему граничных условий, поскольку узлы приведения могут назначаться в местах опирания на амортизирующие устройства (в том числе на податливую промежуточную опорную раму), а также по границам рассматриваемых фрагментов (перекрытий) корпуса судна.

В случае гармонического внешнего возбуждения средством структуризации системы могут служить матрично-векторные равенства, объединяющие динамические матрицы жесткости конструкции:

$$\|C_{np} - \omega^2 \cdot M_{np}\| = \|C_{pp} - \omega^2 \cdot M_{pp}\| - \|C_{pn} - \omega^2 \cdot M_{pn}\| \cdot \|C_{nn} - \omega^2 \cdot M_{nn}\|^{-1} \cdot \|C_{pn} - \omega^2 \cdot M_{pn}\|^T, \quad (8)$$

где $\|C_{pp}\|$, $\|M_{pp}\|$ – матрицы приведенных коэффициентов жесткости и массы; p , n обозначают соответственно сохраняемые и исключаемые степени свободы ($p \ll n$); T – знак транспонирования. Применение матричных равенств типа (6)–(8) значительно расширяет спектр решаемых задач, поскольку позволяет учитывать жесткостные и инерционные свойства всех компонент колебательной системы, включая корпус судна.

На рис. 3 показана двухкаскадная система виброизоляции электродвигателя, массой 50 кг, состоящая из основной и промежуточной опорных плит (массой 80 кг каждая) и восьми амортизаторов (жесткостью 316667 н/м).

На рис.4 приведена расчетная схема системы, установленной на консольно закрепленной платформе, состоящей из 80 стержней, длиной 0,1м с моментами инерции относительно главных центральных осей $I_z = 3,33E-9 \text{ м}^4$, $I_x = 5,33E-8 \text{ м}^4$, $I_y = 5,33E-8 \text{ м}^4$. Материал – сталь с модулем Юнга $E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, коэффициентом Пуассона $\mu = 0,3$. В расчетах рассматривалось гармоническое (синусное) силовое воздействие на систему (рис. 4). Расчет выполнялся с применением специализированной программы «Парус-2000».

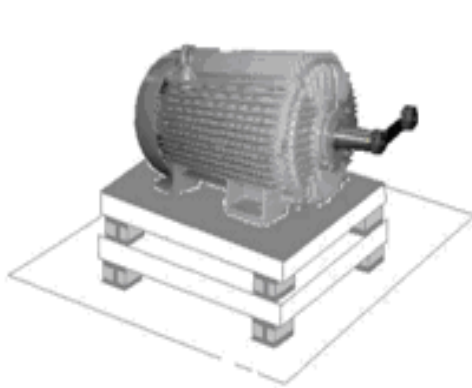


Рис. 3. Виброизоляция электродвигателя

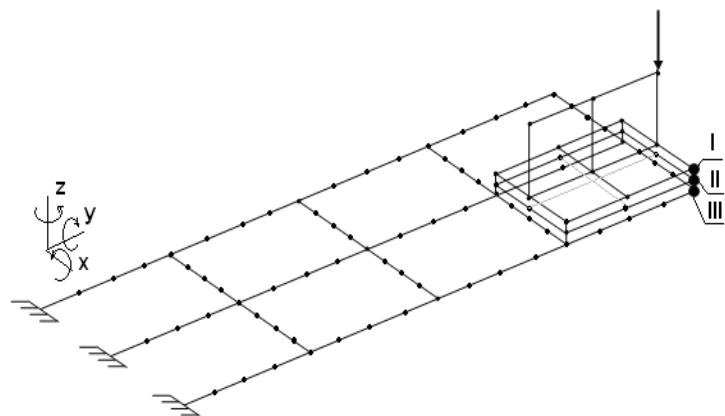


Рис. 4. Расчетная схема перекрытия

Преобразованная расчетная схема объединяла вертикальные перемещения крайних узлов I, II и III (рис. 4) конструкции. На рис. 5 представлены графики гармонического отклика системы в указанных узлах в диапазоне частот 10–40 Гц.

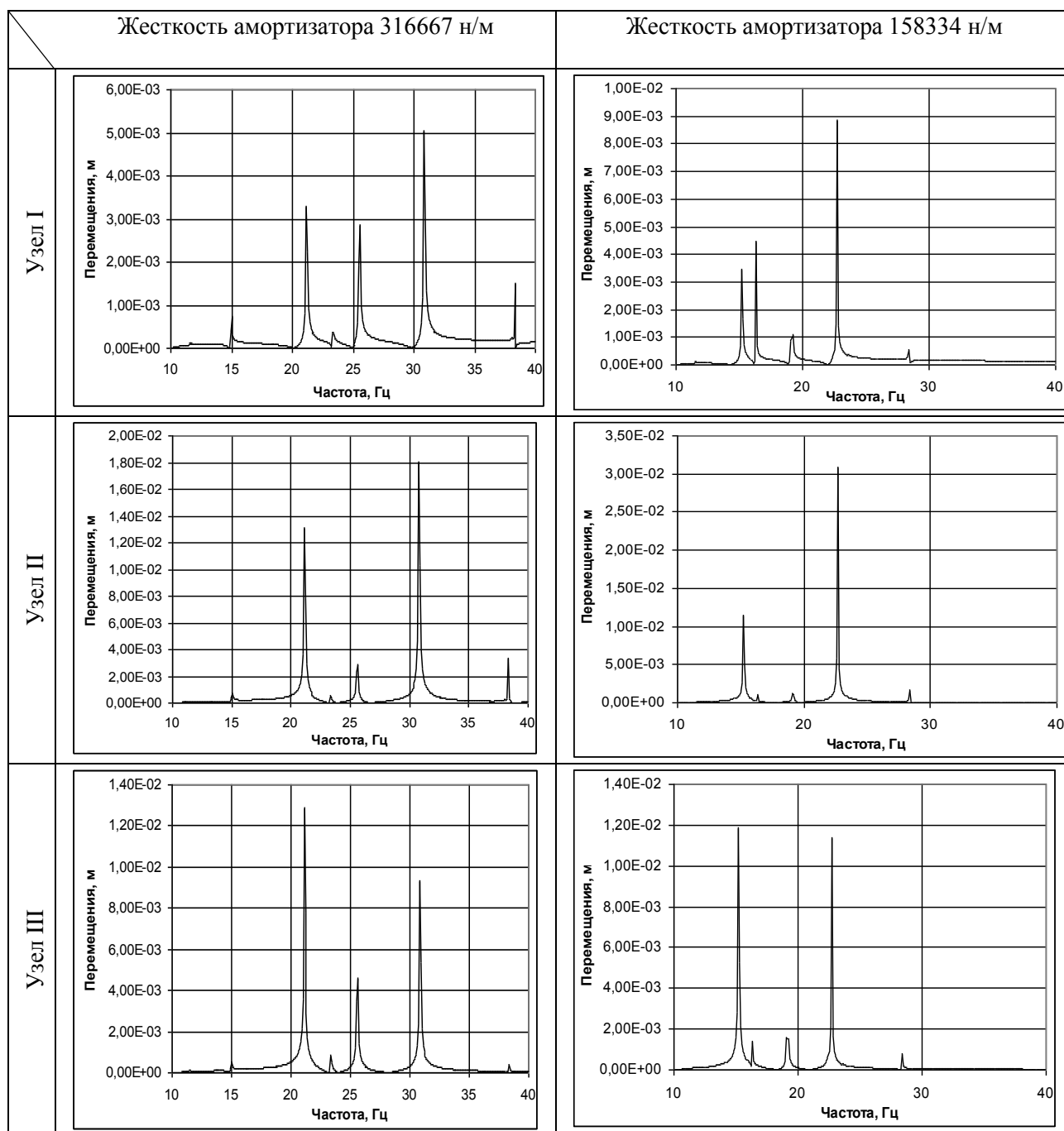


Рис. 5. Графики гармонических откликов конструкции в узлах I, II, III при действии единичной гармонической вынуждающей силы от электродвигателя с эксцентриком

Результаты сопоставления гармонических откликов конструкции показывают, что уменьшение жесткости амортизаторов приводит к смещению спектра резонансных частот рассматриваемой системы в сторону уменьшения, каскадные перепады амплитуд колебаний при этом увеличиваются (рис. 6).

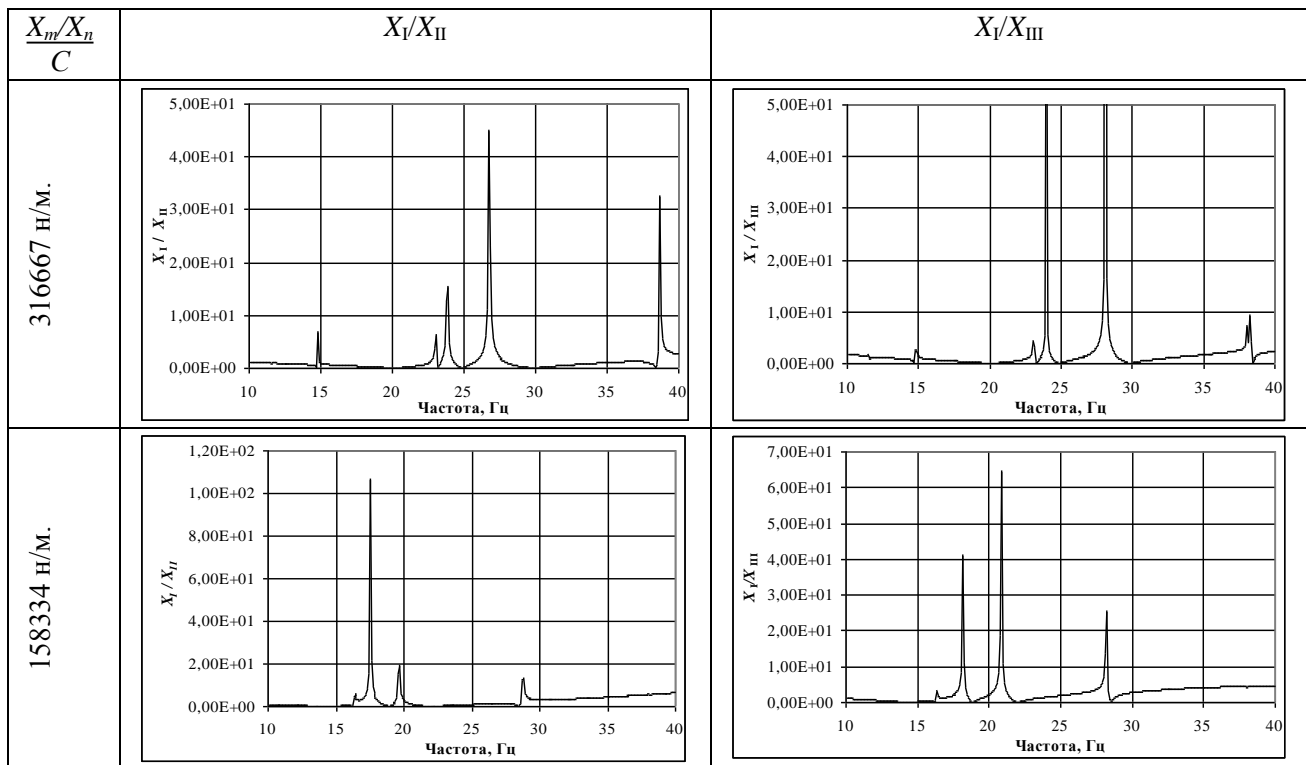


Рис. 6. Каскадные перепады амплитуд (X) вынужденных колебаний конструкции в узлах I, II и I, III

Таким образом, преобразования расчетной схемы обеспечивают существенные преимущества при проведении расчета динамики сложной конструкции. Преимущества состоят в сокращении порядка разрешающей системы уравнений, определении граничных условий для отдельных конструктивных узлов (после чего указанные узлы могут рассматриваться отдельно), получении передаточных функций и откликов (реакций) системы на внешнее воздействие в ряде предварительно назначенных точек (например, в местах установки датчиков при экспериментальных исследованиях вибрации), а также в сохраняющейся возможности расширения экспериментальных данных на конструкцию в целом. Целью дальнейших исследований является эффективная программная реализация матричных равенств (6)–(8) [5], а также оценка влияния на вибрацию системы жесткостных и демпфирующих свойств амортизаторов с различным конструктивным исполнением.

Библиографический список

1. Шиманский, Ю.А. Динамический расчет судовых конструкций / Ю.А. Шиманский. – Л.: Судпрогиз, 1948. – 407 с.
2. Сутырин, В.И. Варианты конденсации в практике расчетов динамики конструкций методом конечных элементов // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №8. С. 7–11.
3. Сутырин, В.И. Применение способа фронтальной конденсации в расчетах динамики судовых корпусных конструкций // Судостроение. 1996. №7. С. 10–14.
4. Сутырин, В.И. Метод приведения в практике расчетов корпусных конструкций // Судостроение. 2008. №4. С. 17–22.
5. Сутырин, В.И. Методология конечно-элементного анализа судовых корпусных конструкций при их проектировании // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. №2 (81). С. 171–174.

Дата поступления
в редакцию 19.04.2013

V.I. Sutyryn¹, E.I. Korotkaya²

**THE SETTLEMENT-EXPERIMENTAL TECHNIQUE OF ACHIEVE STANDARD
CASCADE DIFFERENCE OF VIBRATION INSULATION
FOR THE AMORTIZED SHIP EQUIPMENT**

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad¹,
Baltic State Academy of Fishing Fleet, Kaliningrad²

The settlement-experimental technique of achieve standard cascade difference of vibration insulation for the amortized ship equipment is offered and realized in given paper. Main goal consists of finding of cascade rigidity which returns system of the amortized equipment in limits of standard cascade change of vibration parameters. Solution of such task is possible by settlement and experimental way which is based on a structural quasistatic model. This method consists of construction of the transformed settlement scheme and unites limited number of checkouts of initial final-element splitting in analyzed object. Also results of the solution test tasks are presented and analyzed in paper. The made researches confirmed possibilities of preservation of high precision received result.

Key words: Fluctuation analysis, ship hull structures, finite elements method, quasistatic model, condensation reception.

УДК 629.12:539.3

В.Д. Вешуткин

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ РАЗБОРНОГО ПОНТОНА ПЛАВУЧЕЙ БУРОВОЙ УСТАНОВКИ НА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены результаты экспериментального исследования напряженного состояния узла соединения отдельных блоков блочно-разборного понтона плавучей буровой установки (ПБУ). Исследование проводилось на тензометрической модели, изготовленной из органического стекла. Для определения максимальных напряжений в узле предлагается эмпирическая формула. По масштабам подобия результаты пересчитываются на натурное соединение.

Ключевые слова: напряженное состояние, тензометрическая модель, органическое стекло, понтон, плавучая буровая установка, тензорезисторы.

Освоение запасов нефти и газа под дном крупных озер Среднего Приобья ставит задачу создания плавучих оснований под буровое оборудование. Обеспечение требований, предъявляемых к плавучему основанию условиями Западной Сибири, приводит к необходимости создания разборных ПБУ, приспособленных для транспортировки в условиях бездорожья. Соединение отдельных блоков между собой должно производиться просто, без применения сложного оборудования и в любых климатических условиях.

При проектировании плавучих буровых оснований, состоящих из отдельных элементов, важно обеспечить общую продольную и поперечную прочность. Существующие методы расчета общей прочности, применяемые для судов внутреннего плавания, нельзя применить для мелкосидящей ПБУ с соотношением главных размерений $\frac{L}{H} = 26,3 > 22$,

$\frac{B}{H} = 24,4 > 5$ для судов технического флота класса «Р». Так как указанные соотношения выходят за регламентируемые Речным Регистром пределы. Корпуса блоков ПБУ соединяются в отдельных точках. Узлы соединения понтонов должны обеспечить общую продольную и поперечную прочность и надежность ПБУ. От работоспособности узла полностью зависит работа плавучего бурового основания.

Нагрузка может носить знакопеременный характер. Наиболее опасным случаем нагружения является продольное растяжение узла. В условиях изменяющихся нагрузок, низких температур, высокой концентрации напряжений в узле, обусловленной как конструктивными, так и технологическими факторами, возможно появление хрупких разрушений.

Перед экспериментальным исследованием прочности корпуса платформы и узла соединения блоков ставились задачи:

- определение характера распределения и величин нормальных напряжений в связях корпуса при различных положениях буровых вышек;
- определение упругих линий корпуса основания при различных положениях буровых;
- определение необходимого количества соединительных элементов в различных сечениях корпуса ПБУ;
- определение напряженно-деформированного состояния примыкающего к пазу участка палубы в районе гайки стяжного соединения;
- определение максимальных величин нормальных напряжений, действующих в узле, и пересчет их на натурное соединение.

Для исследования были разработаны и изготовлены тензометрические модели из ор-

ганического стекла платформы и узла соединения понтонов между собой. Натурные плавучие платформы (базовая и предложенная), а также их тензометрические модели имели главные размерения и характеристики, приведенные в табл. 1.

Таблица 1

Основные размеры натуральных платформ и тензометрических моделей

Характеристика	Натура (предлагаемая)		Модель		Масштаб $\bar{\lambda}$
	Обозначение	Размер	Обозначение	Размер	
Длина расчетная, м	L_n	36,0 (42)	L_m	1,20 (1,4)	30
Ширина расчетная, м	B_n	39,0	B_m	1,30	30
Высота борта, м	H_n	1,6	H_m	0,059	30
Осадка расчетная, м	T_n	0,59	T_m	-	-
Водоизмещение, т	D_n	888	D_m	-	-
Клиренс, м	b_n	3,0	b_m	0,10	30
Размеры отдельного понтона					
Длина, м	L_{nn}	18,0	L_{nm}	0,600	30
Ширина, м	B_{nn}	5,97	B_{nm}	0,200	29,9
Высота, м	H_{nn}	1,6	H_{nm}	0,059	30
Количество понтонов, шт.	n_n	12 (14)	n_m	12 (14)	1

Примечание: без скобок указаны размеры базовой платформы, а в скобках - предложенной

Тензометрические модели ПБУ выполнены условно-конструктивно подобными по отношению к натурному судну [3]. В моделях осуществлен основной набор корпуса (флоры, кильсоны, карлингсы, рамные бимсы и рамные шпангоуты борта), легкие продольные балки днища. Шпангоуты и холостые бимсы не устанавливались. Легкие продольные балки палубы для упрощения технологии сборки модели устанавливались на палубе сверху. Продольные и поперечные фермы корпуса заменялись переборками с вырезами. Соединение отдельных блоков модели между собой для базовой модели осуществлялось вертикальной полосой в местах установки разъемных соединителей. В предлагаемом варианте конструкции ПБУ соединение выполнялось полосой по всей ширине понтона, установленной по палубе и днищу, так как был предложен новый способ быстроразъемного соединения.

Таблица 2

Основные толщины связей платформ и тензометрических моделей

Наименование связей	Толщина натурального судна, мм			Толщина модели, мм	Масштаб подобия толщин $\bar{\tau}$
	Пластина	Набор	Приведенная		
Днище	8,0	0,7	8,7	3,0	2,9
Палуба	6,0	-	6,0	2,0	3,0
Борт	4,0	-	4,0	1,5	2,7
Поперечные переборки	4,0	-	4,0	1,5	2,7
Транцы	8,0	-	8,0	2,5	3,2
Верхний пояс моста	24,0	0,2	24,2	8,0	3,0
Нижний пояс моста	24,0	0,2	24,2	8,0	3,0
Стенки моста	10,0	-	10,0	3,0	3,3
Среднее значение $\bar{\tau}$					3,0

В соответствии с методикой моделирования [3], принято два масштаба геометрического моделирования:

- масштаб подобия габаритных размеров $\bar{\lambda} = \frac{L_n}{L_m} = \frac{B_n}{B_m} = \frac{H_n}{H_m} = 30$;
- масштаб подобия толщин связей $\bar{\tau} = \frac{t_n}{t_m} = 3,0$.

Масштаб габаритных размеров указан в табл. 1, а масштаб толщин связей – в табл. 2.

Масштаб подобия упругих свойств материала $\bar{\varepsilon} = \frac{E_n}{E_m} = \frac{2,0 \cdot 10^5}{2,33 \cdot 10^3} \approx 90$,

где $E_n = 2,0 \cdot 10^5$ МПа – модуль упругости стали, $E_m = 2,33 \cdot 10^3$ МПа – модуль упругости органического стекла. Для тонкостенных конструкций геометрические характеристики сечения линейно зависят от толщины связей. Кильсоны, карлингсы, легкие балки палубы, флоры и бимсы смоделированы по площади с масштабом $\bar{\lambda} \cdot \bar{\tau}$, шпангоуты и стойки транцевых переборок по моменту инерции с масштабом $\bar{\lambda}^3 \cdot \bar{\tau}$.

Схема формирования платформы из блоков приведена на рис. 1 в базовом и на рис. 2 – в предложенном варианте соединения блоков. В предложенном варианте узлы соединения блоков между собой расположены в районах с меньшими значениями изгибающих моментов. Для дальнейшего снижения действующих нормальных напряжений рекомендуется установить дополнительный соединительный мост на миделе платформы. Дополнительная масса конструкций компенсируется дополнительными силами поддержания за счет установки дополнительных блоков (понтонов).

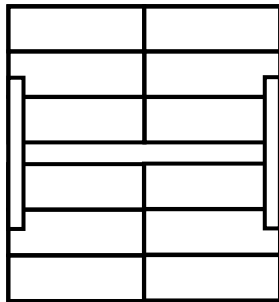


Рис. 1. Схема расположения блоков для базового варианта

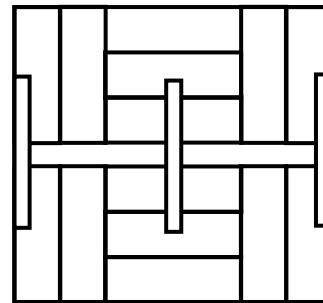


Рис. 2. Схема расположения блоков для предложенного варианта

Исследовалось напряженное состояние корпуса от сил веса буровых вышек при их различном положении относительно миделя судна. В состав подвижных грузов были включены статьи нагрузки (табл. 3).

Таблица 3

Массы, включенные в состав перемещаемых грузов

Наименование статей нагрузки	Масса, т	Плечи, м		Моменты, тм	
		x	y	M_y	M_x
Вышечно-лебедочный блок	226	0	0,58	0	130
Лестницы и площадки	5,0	0	0	0	0
Тележки	60	0	0	0	0
Суммы	291	0	0	0	130

Для пересчета нагрузки с природы на модель были приняты следующие значения: $P_n=291$ т, $y_n=0,44$ м. Для моделирования сил поддержания со стороны воды использовалась подушка из пенополиуретана (поролон). График просадки поролон под действием давления приведен на рис. 3. Для определения прогибов в различных точках модели устанавливались рейки с милли-

метровыми делениями. Схема расстановки реек показана на рис. 4. Перемещения точек модели фиксировались с помощью нивелира. В кружках на схеме указаны номера реек.

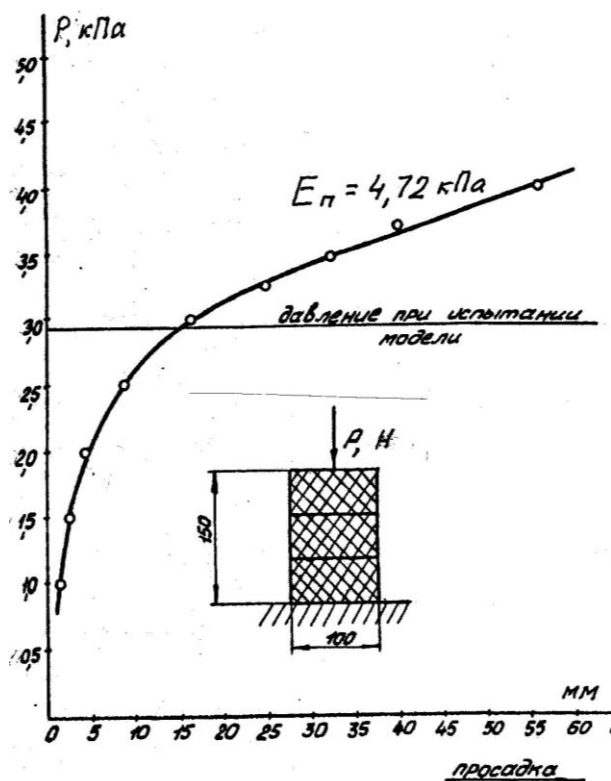


Рис. 3. График просадки поролона

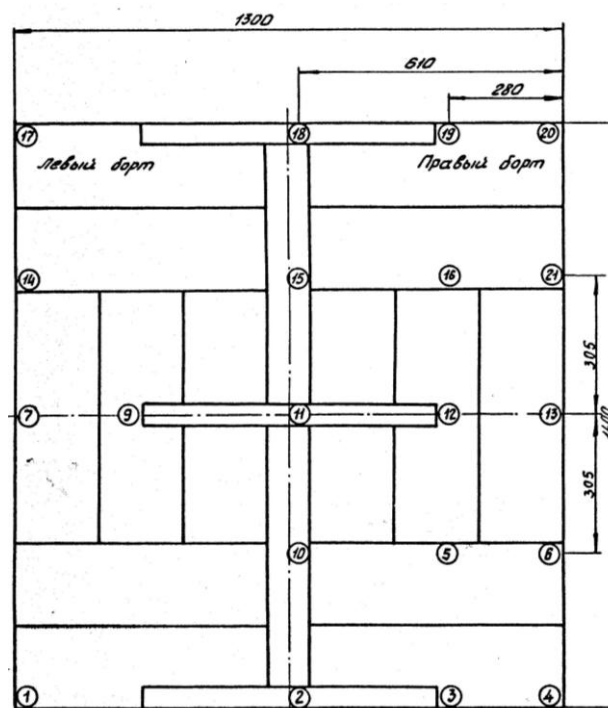


Рис. 4. Схема установки реек для определения прогибов

Для экспериментального исследования разъемного соединения узла для стяжки блоков была спроектирована и изготовлена геометрически подобная тензометрическая модель из органического стекла толщиной 1,5 и 3 мм в масштабе $\lambda = 2,7$. Модель состояла из части цилиндрического паза, приклеенных в его плоскости листов, имитирующих транец понтона и поперечной диафрагмы (перпендикулярно пазу), имитирующей палубу понтона.

Конструкция натурального соединения блочно-разборного понтона ПБУ показана на рис. 5, конструкция модели узла — на рис. 6. Детали склеивались между собой клеем на основе смолы СММ-1. Тензометрическая модель узла испытывалась в специальном стенде, в котором она устанавливалась на две роликовые опоры (рис. 7). Нагружение модели осуществлялось путем подвешивания калиброванных грузов к стержню, имитирующему стяжку. Нагрузка прикладывалась ступенями по 5 кг до максимальной величины 20 кг.

Перед каждой серией испытаний модель подвергалась двукратному приложению нагрузки, на 10% превышающей максимальную испытательную нагрузку с целью приработки приборов. Деформации элементов модели измерялись методами тензометрии. Проволочные тензорезисторы (ТР) имели базу 5 мм и начальное сопротивление 100 Ом. Они наклеивались на предварительно подготовленную поверхность клеем на циакриновой основе. Схема размещения ТР на модели узла приведена на рис. 8. Для измерения деформаций использовался цифровой измерительный тензометрический мост ИТЦ-03-32. Коэффициент тензочувствительности ТР равен $S=2,07$ с погрешностью $\delta=1,7\%$.

Деформации элемента конструкции в месте установки ТР для всех моделей по его направлению определялись по формуле $\epsilon = \Delta N \cdot C_\epsilon$, где $\Delta N = N_i - N_0$ разность показаний прибора при текущей и нулевой нагрузке, где C_ϵ коэффициент, полученный при градуировке ТР. Схема размещения ТР на модели ПБУ (предложенный вариант) приведена на рис. 9.

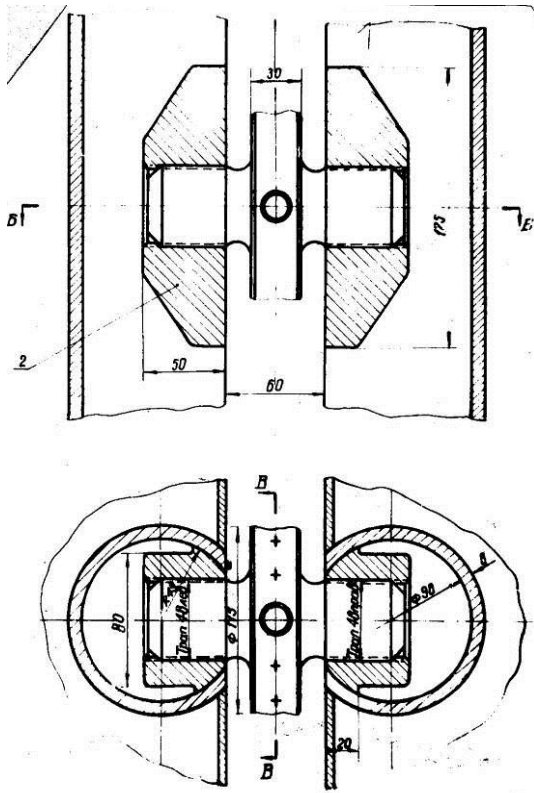


Рис. 5. Конструкция натурального узла

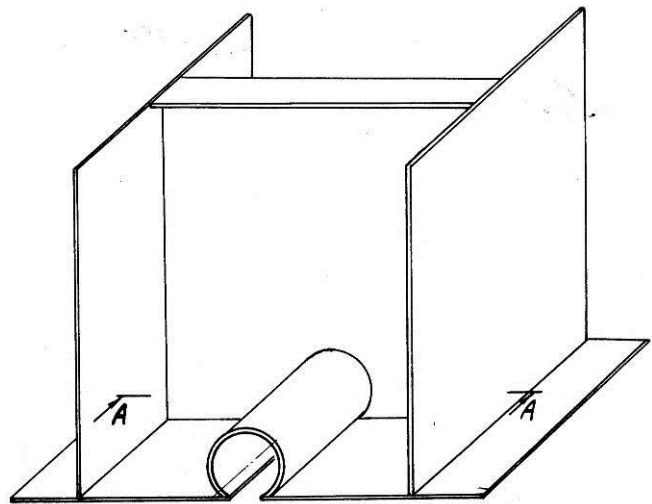


Рис. 6. Конструкция модели узла

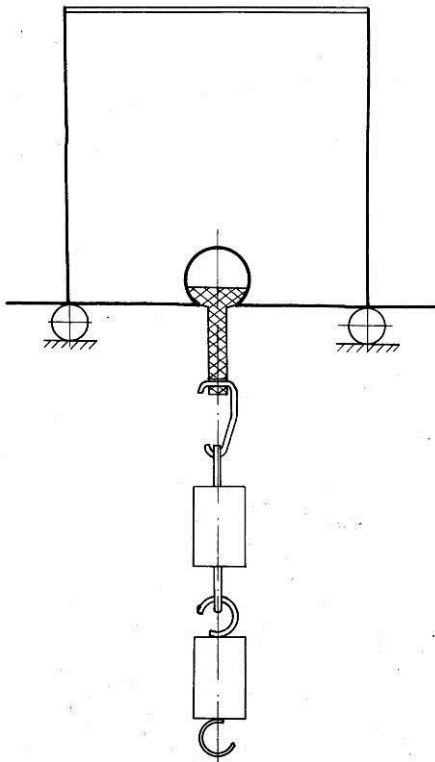


Рис. 7. Схема нагружения модели узла

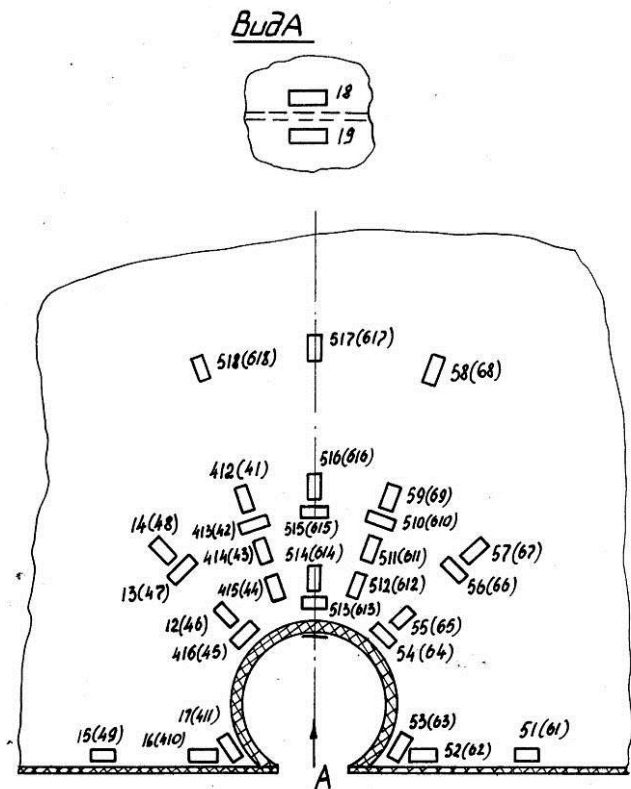


Рис. 8. Схема размещения ТР на модели узла

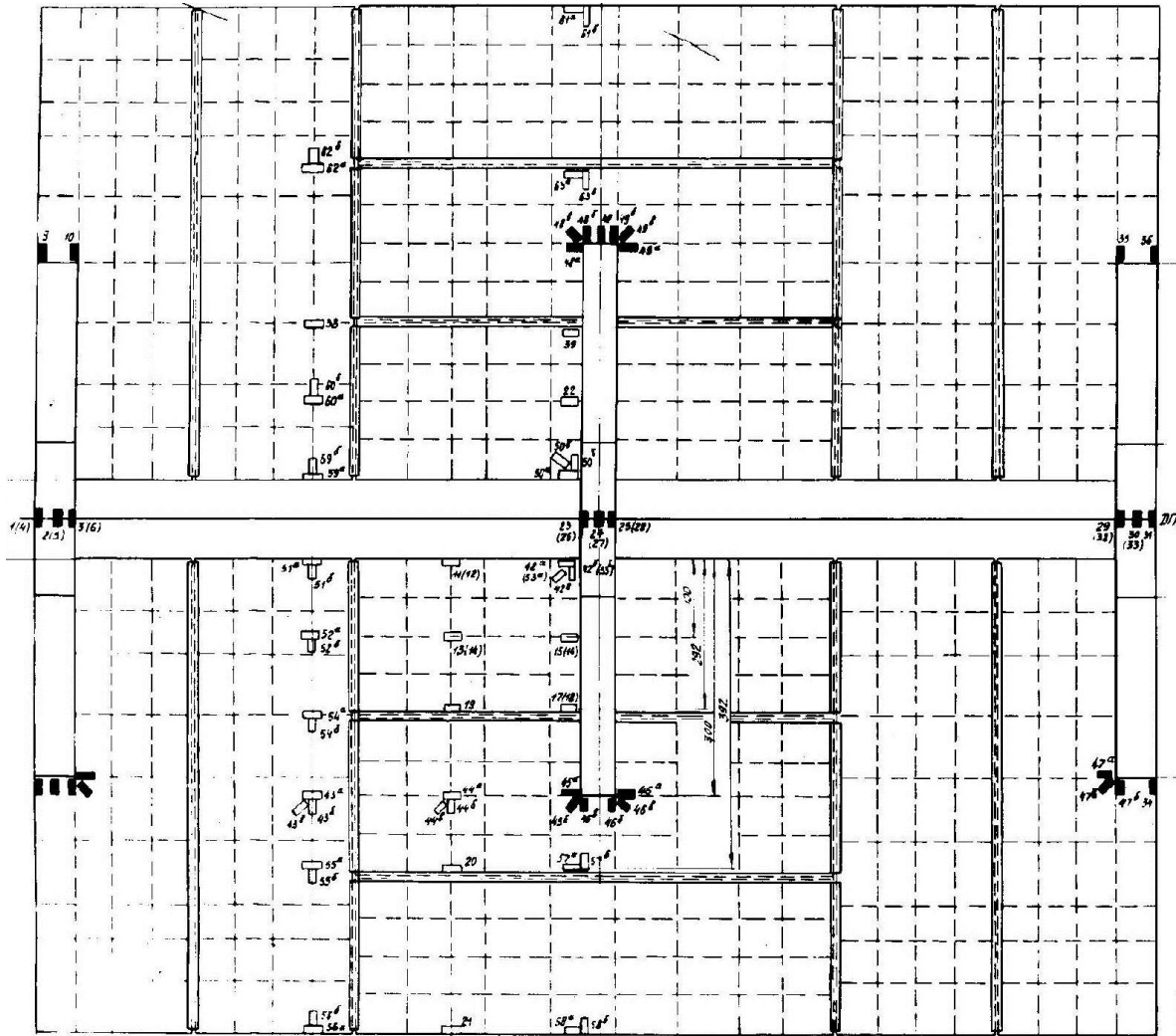


Рис. 9. Схема размещения ТР на модели ПБУ (предложенный вариант)

Нагрузка на модели ПБУ прикладывалась в соответствии с рис.10, 11. На рис.10 показано симметричное нагружение от массовых нагрузок бурильных вышек, а на рис. 11 – несимметричное нагружение.

По полученным значениям напряжений для модели узла построены эпюры в радиальном и окружном направлениях, которые приведены на рис. 12 и рис. 13.

По результатам испытаний модели ПБУ построены эпюры прогибов модели для всех случаев нагружения, а также получены величины нормальных и касательных напряжений. На основании анализа распределения нормальных напряжений по длине и ширине палубы при различном положении буровых вышек можно заключить:

- влияние несимметричности нагрузки сказывается незначительно; характер распределения нормальных напряжений для обоих случаев практически совпадает;
- поперечные нормальные напряжения достигают максимума в верхнем пояске среднего соединительного моста (5,9 МПа); при пересчете на натурное судно получим 105 МПа, где масштаб силового подобия равен $\bar{\rho} = 1600$;
- одной из наиболее нагруженных деталей в ПБУ является кница нижней части соединительного моста в которой максимальные напряжения достигают величины 101 МПа;
- характер упругих линий напоминает характер изгиба пластин соединенных перемышками.

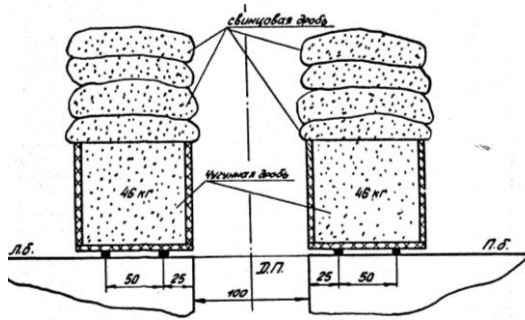


Рис. 10. Симметричное нагружение модели ПБУ

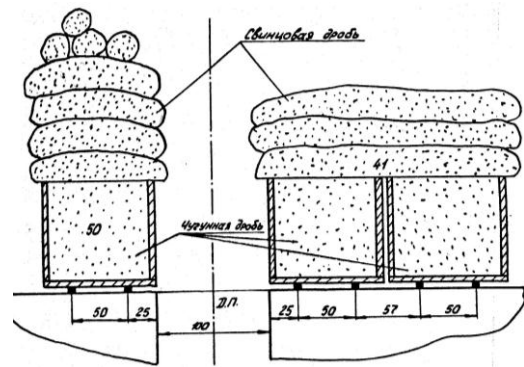


Рис. 11. Несимметричное нагружение модели ПБУ

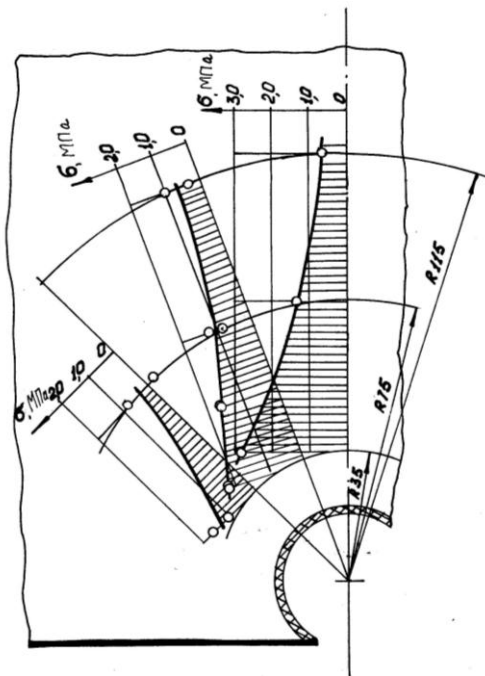


Рис. 12. Распределение нормальных радиальных напряжений по радиальному направлению

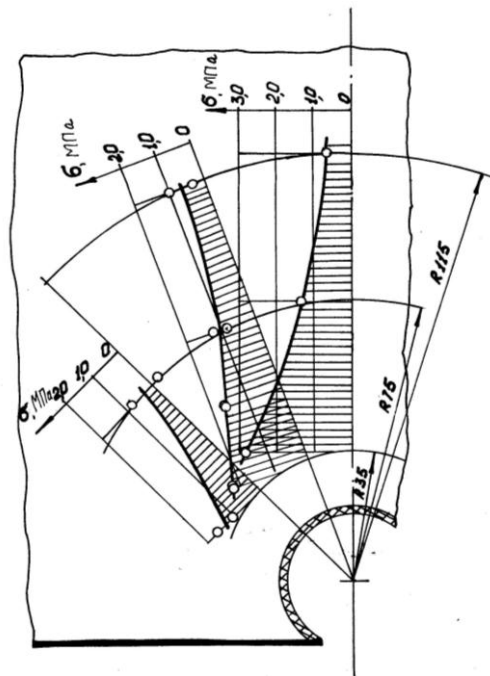


Рис. 13. Распределение нормальных радиальных напряжений по круговому направлению

Ранее было определено максимальное усилие, действующее на соединение и равное $T_n=270$ кН. Масштаб силового подобия в этом случае будет равен

$$\bar{\rho} = \frac{T_n}{T_m} = \frac{270}{0,175} = 1550,$$

где $T_m=0,175$ кН нагрузка при испытаниях модели. Нормальные напряжения пересчитываются по формуле

$$\sigma_n = \sigma_m \frac{\bar{\rho}}{\lambda^2} = \sigma_m \frac{1550}{2,7^2} = 210 \cdot \sigma_m.$$

Максимальная величина нормальных напряжений в наиболее нагруженной точке составит

$$\sigma_n = 210 \cdot 2,84 = 596 \text{ МПа.}$$

Напряжения в палубе у паза будут несколько выше замеренных напряжений. Если воспользоваться правилом «угла 30°», а силу условно приложить в точке пересечения плоскости палубы с осью паза, тогда можно получить простую расчетную формулу в точках, лежащих на линии действия силы (рис. 7)

$$\sigma_B = \frac{P}{2r \cdot \operatorname{tg} 30^\circ \cdot \delta} = \frac{P}{1,15 \cdot r \cdot \delta}, \quad (1)$$

где P – нагрузка на соединение; r – расстояние от центра паза до точки определения напряжений; δ – толщина обшивки.

Сравнение напряжений, вычисленных по предлагаемой формуле, с экспериментальными значениями выполнено в табл. 4.

Таблица 4

Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными

Нормальные напряжения σ , МПа	r , мм		
	35	75	115
Экспериментальные	2,84	1,34	0,62
Теоретические	2,90	1,35	0,78
Расхождение, %	2,1	0,8	26

При расчете по формуле (1) максимальные нормальные напряжения в узле будут составлять

$$\sigma_{\max} = \frac{270 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 0,06 \cdot 0,006} = 655 \text{ МПа,}$$

где $r=6,0 \text{ см}=0,06 \text{ м}$; $\delta=6 \text{ мм}=0,006 \text{ м}$; $P=270 \text{ кН}$.

При пределе текучести стали равном $\sigma_T=235 \text{ МПа}$ необходимо усиление конструкции. Это может быть осуществлено либо увеличением толщины листа, либо снижением нагрузки, приходящейся на соединение. При невозможности снижения нагрузки необходимо толщину прилегающего листа увеличить до толщины

$$\delta = \frac{270 \cdot 10^{-3}}{1,15 \cdot 0,06 \cdot 190} = 655 = 0,0206 \text{ м} = 20,6 \text{ мм} \cong 22 \text{ мм}.$$

По результатам работы можно сделать выводы:

- работа узла соединения блоков носит сложный характер;
- для предварительных расчетов напряжений в узле можно пользоваться формулой (1);
- толщину палубы и днища в районе дискретных соединений необходимо увеличить до значений 22–24 мм;
- необходимы дальнейшие исследования прочности и надежности узла соединения как при статических, так и при переменных нагрузках, для оценки его надежности и долговечности, так как надежность узла влияет на надежность и работоспособность плавучего основания в целом (особенно при пониженных температурах).

Библиографический список

1. Дорюфеев, Б.А. Предварительные результаты проектирования опытной установки для разбуривания кустов скважин на озерных площадях / Б.А. Дорюфеев, В.К. Борисенко, А.Н. Воевода // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1973. Вып. 17.
2. Дорюфеев, Б.А. динамический расчет плавучего свайного основания буровой установки / Б.А. Дорюфеев [и др.] // Проблемы нефти и газа Тюмени. 1974. Вып. 21.

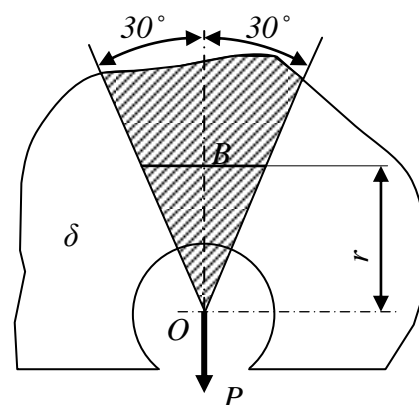


Рис. 14. Условное теоретическое распределение нормальных напряжений

3. **Перлин, А.А.** Исследование прочности судовых конструкций на тензометрических моделях / А.А. Перлин, М.К. Шалкин, Ю.К. Хрящев. – Л.: Судостроение, 1967.
4. **Российский Речной Регистр.** Правила классификации и постройки судов внутреннего и смешанного плавания. М., 2008. Т. 1, 2.
5. **Давыдов, В.В.** Прочность судов внутреннего плавания: справочник / В.В. Давыдов [и др.]. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

V.D. Veshutkin

STUDY OF STRESS STATE CONNECTION UNIT BLOCK-MADE PONTOON FLOATING DRILLING PLATFORM

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

The results of the pilot study the stress state of the pontoons AR collected from individual units, adjusted for transportation and assembly combination of these individual units. The study was conducted on strain-gauge models made of Plexiglas. AR models were manufactured in two versions floating base formation. According to the results of the pilot study conclusions about the nature of the elastic base lines and the distribution of normal stresses in the base and the bridge deck. To investigate the connection node block was made such a strain gauge model. To determine the maximum stress in the node is proposed empirical formula. The scale of the similarity results are translated to full-scale connection.

Key words: stress, strain gauge model, organic glass, pontoon, floating drilling rig, strain gages.

УДК. 629.12.011

В.Ф. Кулепов, Ю.А. Двойченко

ЛЕДОКОЛЬНАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛАВАЮЩИХ ЛЕДОРЕЗНЫХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Плавающие ледорезные машины (ПЛРМ) имеют широкий спектр использования, в который входит возможность разрушения льда не только резанием, но и ломка его корпусом с прокладкой канала в ледяном поле относительно тонкого льда. Это требует достоверной оценки ледокольной способности каждой из типоразмерного ряда машин, необходимых при их проектировании, как плавающих инженерных сооружений (судов).

Методология: Используются данные и результаты экспериментального исследования опытов по разрушению ледяного покрова и полуэмпирический способ определения разрушающих нагрузок подобный применяемому в теории проектирования судов.

Результаты: Получена зависимость для проектирования ПЛРМ по определению толщины разрушаемого льда машинами разной массы и размеров.

Значение исследования: Полученные результаты необходимы для придания надлежащих ледокольных качеств ПЛРМ при выработке тактики и стратегии технологических операций, проводимых с ледяного покрова с их помощью.

Новизна/ценность: Применены новые способы, расширяющие методологию проектирования и применения эмпирических и теоретических методов оценки ледоразрушающей способности. Полученные результаты дают возможность разработки проектов и обуславливают уверенную эксплуатацию плавающих ледорезных машин на ледяном покрове.

Ключевые слова: проектирование плавающих машин, прокладка канала во льду, разрушение льда для плавания, ледопроездимость, амфибийные машины, ледорезные машины.

В условиях нашей страны большую роль играют технологические операции, производимые с ледяного покрова (гидротехническое строительство, прокладка подводных трубопроводов, кабельных линий и пр.). Эти операции обеспечиваются плавающими ледорезными машинами (ПЛРМ), характеристики типоразмерного ряда которых дан в [1]. Возможные области применения таких машин, оснащенных рабочими органами различного типа показаны на рис. 1.

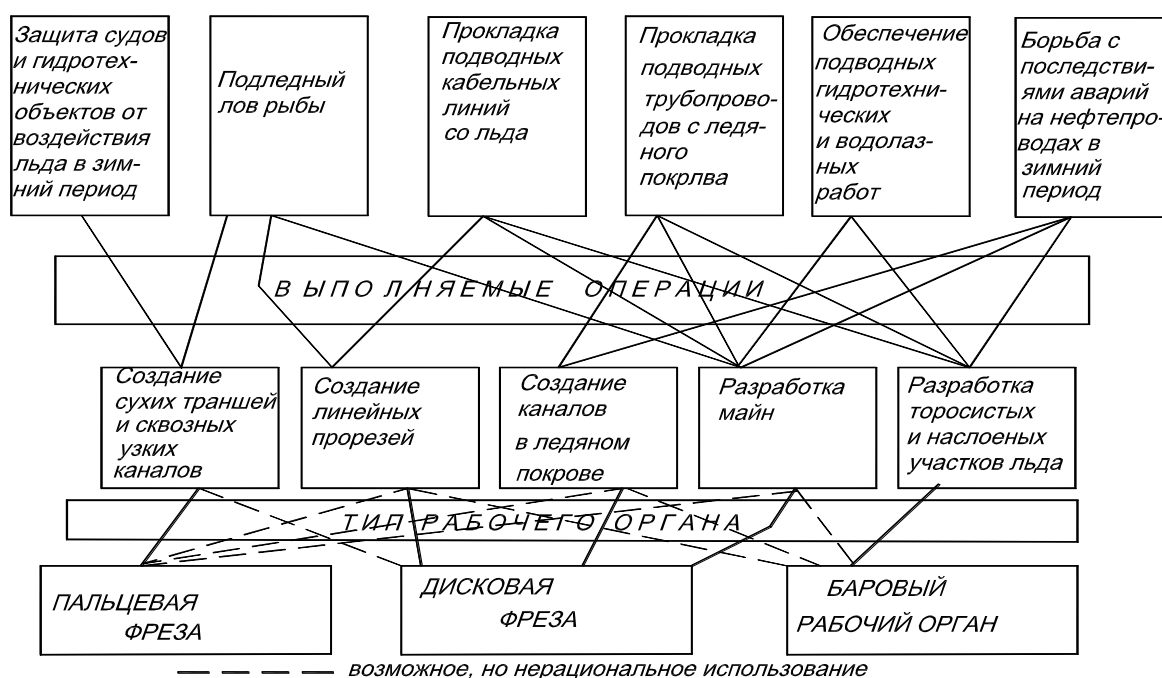


Рис. 1. Области применения ПЛРМ с различными рабочими органами

Кроме того, что эти машины могут делать сквозные прорезы в ледяном покрове толщиной от 0.18 до 2.6 м, у них имеется еще одно важное качество – возможность разрушения льда собственным корпусом, обусловленная плавучестью, остойчивостью, формой корпуса ПЛРМ и наличием буксирной лебедки на палубе машины.

Необходимость прокладки канала в тонком льду впервые возникла при ликвидации аварии на подводном переходе нефтепровода через реку Белую в январе 1995 г. [2]. Толщина льда в районах сбора ликвидации разлившейся нефти составляла от 3 до 30 см. Наибольшую сложность вызывал загрязненный тонкий лед, поскольку не выдерживал веса человека. Его разрушали пешнями и баграми, используя лодку «Казанка». Толстый лед резали вручную, бензопилами, и это приводило к возгоранию на людях одежды, пропитанной нефтью.

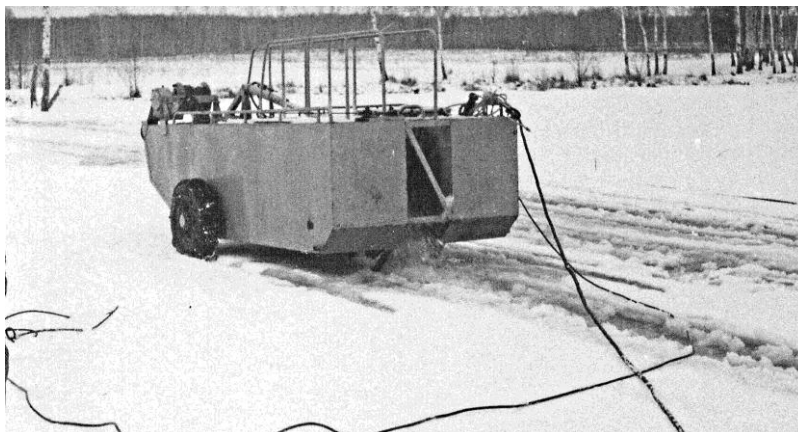


Рис. 2. Прорезание льда ледорезной машиной ЛФМП-1

Таблица 1

Характеристики ЛРМ ЛФМП-1

Массогабаритные	Ширина прорези0.1 м
Длина.....3.65 м	Скорость прорезания (0.8 м).....620 м/ч
Ширина.....2.28 м	Скорость без прорезания3 км/ч
Высота в трансп. положении.....-1.89м	потребляемая мощность (3ф-380в).....30 квт
Масса в снаряж. состоянии.....2542 кг	Тяговая лебедка
Дорожный просвет.....0.3 м	Тяговое усилие.....47-30 кН
Минимальная толщина льда.....0.2 м	Скорость намотки троса.....5.5-8.6 м/мин
Производственно-технологические	Длина троса.....100 м
Толщина прорезаемого льда.....0.8 м	

Появление плавающих ледорезных машин и их типоразмерного ряда было обусловлено именно этой аварией. Благодаря детальному изучению всех особенностей работы на ледяном покрове, расчетным путем и методом модельного эксперимента была найдена форма и размерения корпуса машины, которые обеспечивали остойчивость на плаву, выход из воды на лед (рис. 3) и исключали опрокидывание при внезапном проломе льда и сваливании машины в воду с кромки ледяного покрова [4]. На основе системного подхода были выработаны требования к элементам многофункциональности, реализованные в конструктивных особенностях, благодаря которым машина может не только прокладывать прорезь во льду, но и образовывать во льду каналы и майны. Общий вид машины показан на рис. 2.

Она может расчищать майны от вырезанных ледяных блоков и карт как выемкой на ледяной покров, так и задвижкой притопленных ледяных карт под кромку майны. Эти качества были обоснованы расчетами и экспериментами, а также были подтверждены испытани-

ями спроектированной и построенной по заказу ОАО «Транснефть» машины ЛФМП-1 [1]. Так как на палубе ПЛРМ могут находиться от двух до десяти человек (в зависимости от типоразмера), они могут осуществлять сбор загрязненного льда и укладку его на следующее за машиной на буксире плавсредство.



Рис. 3. Выход ЛФМП-1 на лед из майны с помощью собственной лебедки

Исследования и рекомендации функциональных возможностей представленного типа машин описаны в ряде работ, где даются соответствующие зависимости [1,3,4]. В отличие от других, оценка ледокольных качеств ряда ЛФМП [1] была выполнена приближенно, без использования научных достижений в этой области. Это заставляет подробно рассмотреть аспекты взаимодействия корпуса ледорезной машины с ледяным покровом.

Вертикальное усилие на лед создается при выходе корпуса на кромку льда за счет силы тяги лебедки, установленной на палубе плавающего корпуса.

Прокладка канала в тонком льду производится следующим образом (рис. 4).

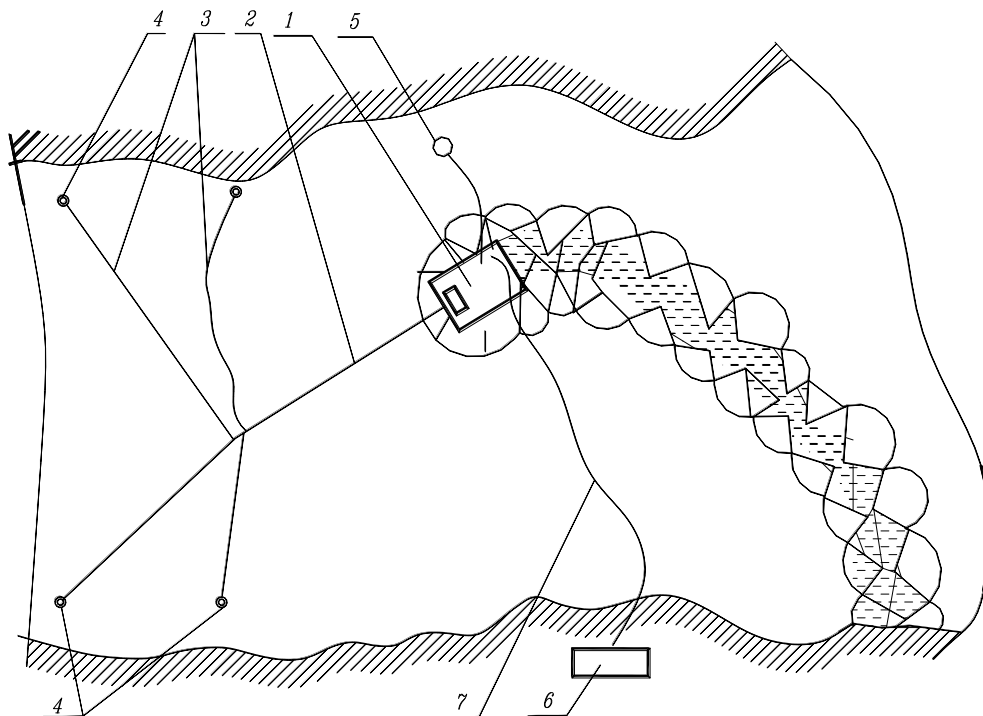


Рис. 4. Образование канала во льду буксировкой ПЛРМ:

1 – ПЛРМ; 2 - буксирный трос; 3 - оттяжки; 4 - ледовые якоря; 5 - оператор; 6 - электростанция; 7 - электрический кабель

Перед прокладкой канала разматывается буксирный трос лебедки и закрепляется в конечной точке будущего канала с помощью ледовых якорей. На местах изменения курса к тросу крепятся скользящие тросовые оттяжки. Оператор включает лебедку и контролирует перемещение плавающей машины при разрушении льда.

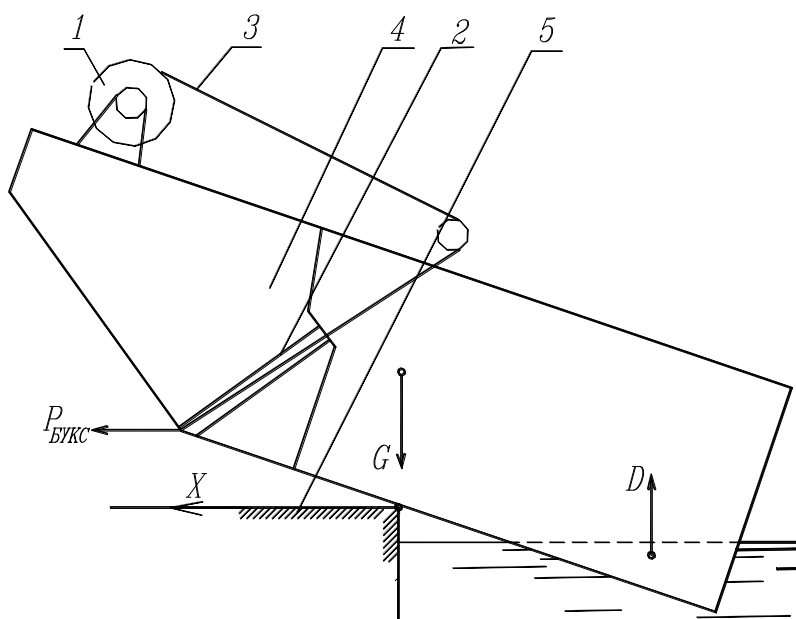


Рис. 5. Плавающая ледорезная машина на кромке льда:

1 - буксирная лебедка; 2 - буксирный клюз; 3 - буксирный трос; 5 - кромка льда

Разрушающая лед нагрузка при кратковременном действии зависит от толщины льда и площади ее приложения. Достаточно хорошо обоснованная эмпирическая формула имеет вид [5]

$$P_p = k_p \cdot \beta \cdot h_{\text{л}}^2, \quad (1)$$

где k_p – эмпирический коэффициент, имеющий размерность напряжения; $\beta = (1 + \alpha \sqrt{S})$ – коэффициент, учитывающий площадь приложения нагрузки; $\alpha = \sqrt[4]{12\rho_{\text{в}} \cdot g / Eh_{\text{л}}^3}$ – параметр изгиба льда; $\rho_{\text{в}}$ – плотность воды; E – модуль упругости льда; $h_{\text{л}}$ – толщина льда; S – площадь приложения нагрузки.

Для дальнейших выкладок принимаем $E = 5 \cdot 10^9$ Па, $\rho_{\text{в}} = 1000$ кг/м³. Как показали эксперименты [5], для случая приложения нагрузки (рис. 5).

$$k_p = 1.1 \pm 0.2 \text{ МПа}. \quad (2)$$

В опытах было выяснено, что эффективная длина приложения нагрузки из-за прогиба льда составляет $L \approx 0.2/\alpha$. Ширина нагрузки B равна ширине корпуса машины. В этом случае $S = L \cdot B = 0.2 \cdot B/\alpha$ и формула (1) преобразуется к виду

$$P_p = k_p \cdot (1 + \sqrt{0.2\alpha \cdot B}) \cdot h_{\text{л}}^2. \quad (3)$$

Для получения гарантированного разрушения льда следует принять значение верхнего предела изменения $k_p = 1.3$ МПа, так как не разрушив льда, машина выходит на его поверхность и разрушающая нагрузка значительно возрастает.

Используя формулу (3), получим данные в виде функции $P = f(h_{\text{л}}, B)$ для оценки толщины льда, в котором плавающая машина может прокладывать канал (рис. 6). Как видно из рис. 6, ледокольная способность на тонком льду слабо зависит от ширины корпуса. Имея массу плавающей машины P_p и ширину ее корпуса B (м), по графику можно определить, реально ли производить прокладку ледового канала в ледяном покрове машиной данного типоразмера.

Для оценки возможностей создания ледорезных машин прорезающих ледяной покров на всех внутренних и прибрежных акваториях РФ в работе [1] представлены характеристики параметрического ряда подобных машин, основные массогабаритные характеристики которых приведены в табл. 2.

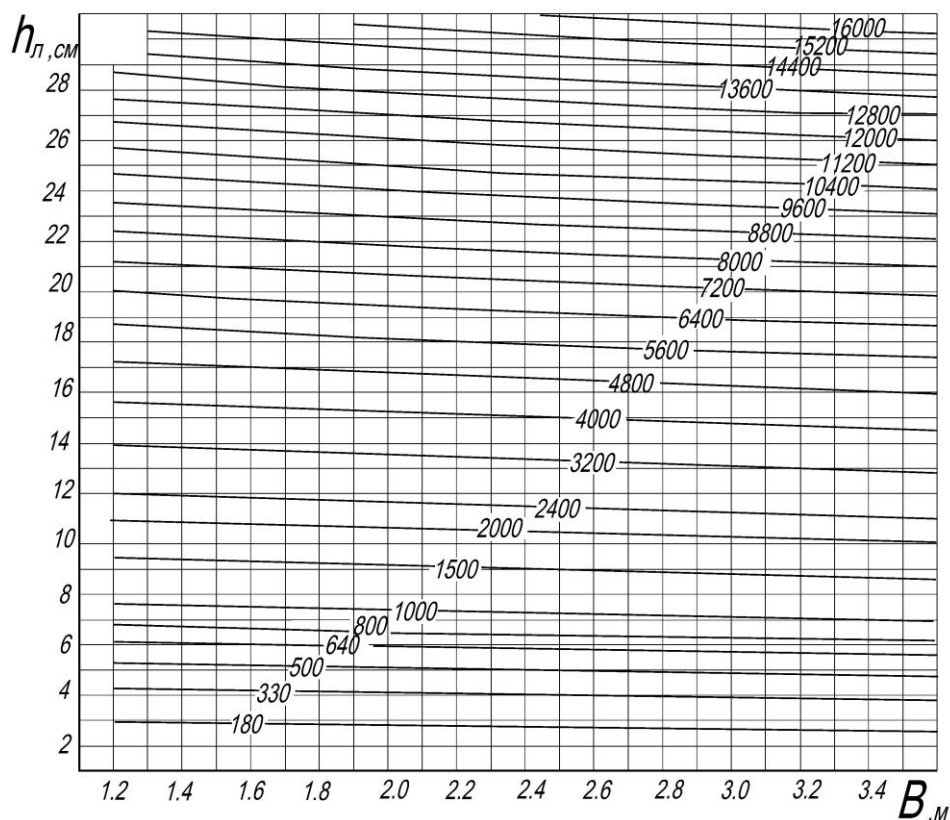


Рис. 6. Масса корпуса ПЛРМ (кг) необходимая для прокладки канала во льду

На основании результатов (рис. 6) в последней строке табл. 2 дана толщина льда, которую элементы ряда машин могут разрушать своим корпусом.

Таблица 2

Массогабаритные характеристики элементов параметрического ряда ледорезных машин типа ЛФМП-1

Наименование показателя	Элементы ряда				
	I – ЛФМП-1-I	II- ЛФМП-1	III ЛФМП-1-III	IV ЛФМП-1-IV	V ЛФМП-1-V
Габарит по ширине, м	1.68	2.3	2.3	2.3	3.25
Габариты корпуса, м	1.38x0.68x2.48	1.78x1.0x3.65	2.3x1.05x4.22	2.3x1.45x6.9	3.25x1.6x8.51
Потребляемая мощность, кВт	9.6	30	46.8	105.3	201.0
Масса машины, кг	813	2420	3804	8561	16388
Буксирное усилие лебедки, кН	5.5	18	26	63.5	122
Минимальная безопасная толщина льда при работе на кромке, м	0,12	0.2	0,39	0,60	0,83
Толщина льда разрушаемая корпусом, м	0,07	0.12	0,15	0,22	0,31

Кроме этого, когда машина находится на сплошном льду, она может не проламывать своим весом толщину льда (рис. 3), поскольку в формуле (1) для сплошного льда экспериментально получено $k_p = 1.9$ МПа, а с учетом верхней границы доверительного интервала следует принимать $k_p = 2.1$ МПа. Однако при прорезании машина проломит лед, если будет находиться на кромке прорези и далее придется разрушать лед так, как это делает ледокольное судно.

Полученные результаты применимы и для небольших понтонов прямоугольной формы, имеющих скос в носовой оконечности, которые могут использоваться в затонах и других акваториях. В период ледостава или недостаточных холодов выход на ненадежный лед людей для производства работ опасен, использование обычной лодки сильно затруднено. Прокладка канала понтоном, перемещаемым автомобильной лебедкой, позволит применять моторную лодку или другое плавсредство.

Библиографический список

1. Кулепов, В.Ф. Плавающие ледорезные машины для работы на ледяном покрове рек и прибрежных морских акваторий арктического шельфа / В.Ф. Кулепов, Ю.А. Двойченко, А.Л. Малыгин // Вопросы морской ледотехники: тр. ЦНИИ им. акад А.Н. Крылова. 2007. Вып. 34 (318). С. 171–191.
2. Кирнос, В.И., Особенности ликвидаций аварий на водных переходах в зимних условиях / В.И. Кирнос, В.Я. Сабитов, У.Н. Сабиров // Трубопроводный транспорт нефти. 1999. № 4. С. 12-18.
3. Кулепов, В.Ф. Разработка параметрического ряда ледорезных машин с дискофрезерным рабочим органом // Строительные и дорожные машины. 2002. № 11. С. 33–37.
4. Кулепов, В.Ф. Исследование влияния геометрических характеристик несущего корпуса понтона на обеспечение надежности и безопасности ледорезных машин в сложных условиях эксплуатации / В.Ф. Кулепов, Ю.А. Двойченко, А.Л. Малыгин // Труды НГТУ. Н. Новгород. 2004. Т.45. С. 110–114.
5. Зуев, В.А. Экспериментальные исследования разрушения ледяного покрова / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов, Ю.А. Двойченко // Вопросы теории, прочности и проектирования судов, плавающих во льдах: межвуз. сб. Горьков. политехн. ин-т. им. А.А. Жданова. Горький, 1984. С. 4–13.

Дата поступления
в редакцию 19.04.2013

V.F. Kulepov, Yu. A. Dvoychenko

ICEBREAKER ABILITY OF FLOATING ICE CUTTINGS MACHINES

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

Purpose: Floating ice-cuttings machines (FCIM) have a wide spectrum of the use in which enters possibility destructions of ice not only cutting but also fragile breaking of corps with the creation of channel in the icy field in relation to thin ice. It requires the reliable estimation of icebreaking ability for each types of sizes row of machines, necessary at their planning, as floating engineering's buildings (ships).

Methodology: Information and results of experimental research of experiments on destruction of icy cover and semi-empiric method of determination of the destroying loadings is utilized.

Results: Dependence information is got for planning of FCIM on determination of thickness of the destroyed ice by the machines of different mass and sizes.

Value of research: The got results are needed for giving proper icebreaker qualities FCIM at making of tactic and strategy of technological operations, conducted from an icy cover with their help.

Novelty/value: New methods, extending methodology of planning and application of empiric and theoretical methods of estimation of destructions of ice ability, are applied. The got results enable development of projects and determines sure exploitation of ice-cutting machines on an icy cover.

Key words: Designing floating machines, breaking of channel is in ice, destruction of ice for swimming, ice-braking possibility, amphibian machines, ice cuttings machines.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.331 :621.311.025

Л.А. Герман¹, А.С. Серебряков¹, Д.Е. Дулепов²

АНАЛИЗ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА ПРИ ВКЛЮЧЕНИИ УСТАНОВКИ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ В ТРИ ЭТАПА

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения¹,
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт²

Исследованы переходные процессы при включении установки поперечной емкостной компенсации (КУ) в три этапа. Цель исследований - определение оптимальных параметров демпфирующего резистора для повышения эксплуатационной надежности КУ при использовании несинхронизированных выключателей. Исследования проведены методом численного решения дифференциальных уравнений, описывающих процессы в установках емкостной компенсации. Показано, что при включении установок с демпфирующим резистором в три этапа значения перенапряжений на конденсаторах не превосходят 10%.

Область применения – электрифицированные железные дороги переменного тока.

Ключевые слова: поперечная емкостная компенсация, перенапряжения, коммутация, переходные процессы.

При включении на переменное напряжение установки поперечной емкостной компенсации (КУ), содержащей элементы C , L и R (рис. 1), возникает переходный процесс, во время которого напряжение на конденсаторе и ток через конденсатор могут значительно превосходить свои значения в установившемся режиме. Значения перенапряжений и сверхтоков зависят от начальных условий (НУ) и начальной фазы включения. Коэффициент перенапряжения K_U , равный отношению максимального значения напряжения в переходном периоде к установившемуся амплитудному значению $K_U = \frac{U_{\max}}{U_m}$, может составлять 1,7-2. Таким образом,

напряжение на конденсаторе может превысить установившееся амплитудное значение напряжения на 70–100%, что, безусловно, недопустимо, так это как ведет к повышенному износу конденсаторов и снижает их эксплуатационную надежность.

Поскольку установки емкостной компенсации в современных условиях переводятся в регулируемый режим с частыми включениями и отключениями, то указанные перенапряжения затрудняют их перевод в регулируемый режим. Коммутационные перенапряжения при включении КУ можно снизить, если при подключении КУ к сети последовательно с конденсатором и реактором включать демпфирующий (балластный) резистор R_g . Чем больше значение демпфирующего резистора, тем меньше коммутационные перенапряжения. При значении сопротивления демпфирующего резистора, равного значению волнового сопротивления контура емкостной компенсации, коэффициент перенапряжений практически становится равным единице. При большем значении сопротивления демпфирующего резистора коэффициент перенапряжений становится меньше единицы.

Таким образом, включение демпфирующего резистора позволяет значительно снизить и даже полностью исключить коммутационные перенапряжения и сверхтоки при включении КУ. Однако в этом случае возникают коммутационные перенапряжения при шунтировании

демпфирующего резистора, причем чем больше значение демпфирующего резистора, тем больше значение перенапряжений.

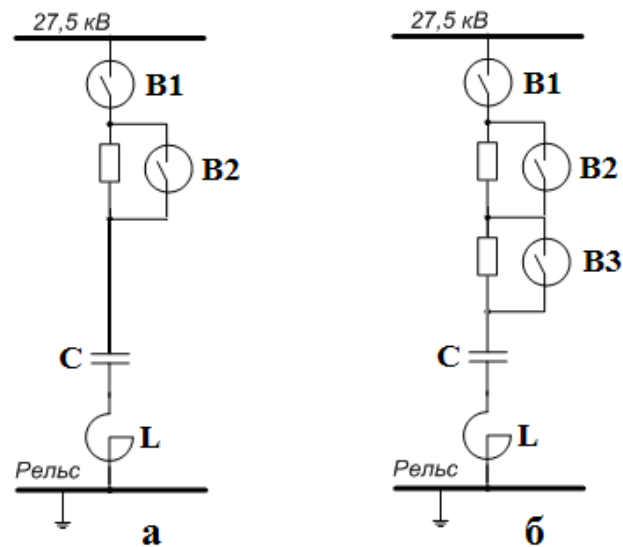


Рис. 1. Принцип включения КУ в два этапа

Кроме того, значения K_U зависят от начальной фазы тока в момент шунтирования демпфирующего резистора. Минимальные значения перенапряжения будут при шунтировании балластного резистора в момент прохождения тока через нуль, а максимальные – в момент прохождения тока через максимум.

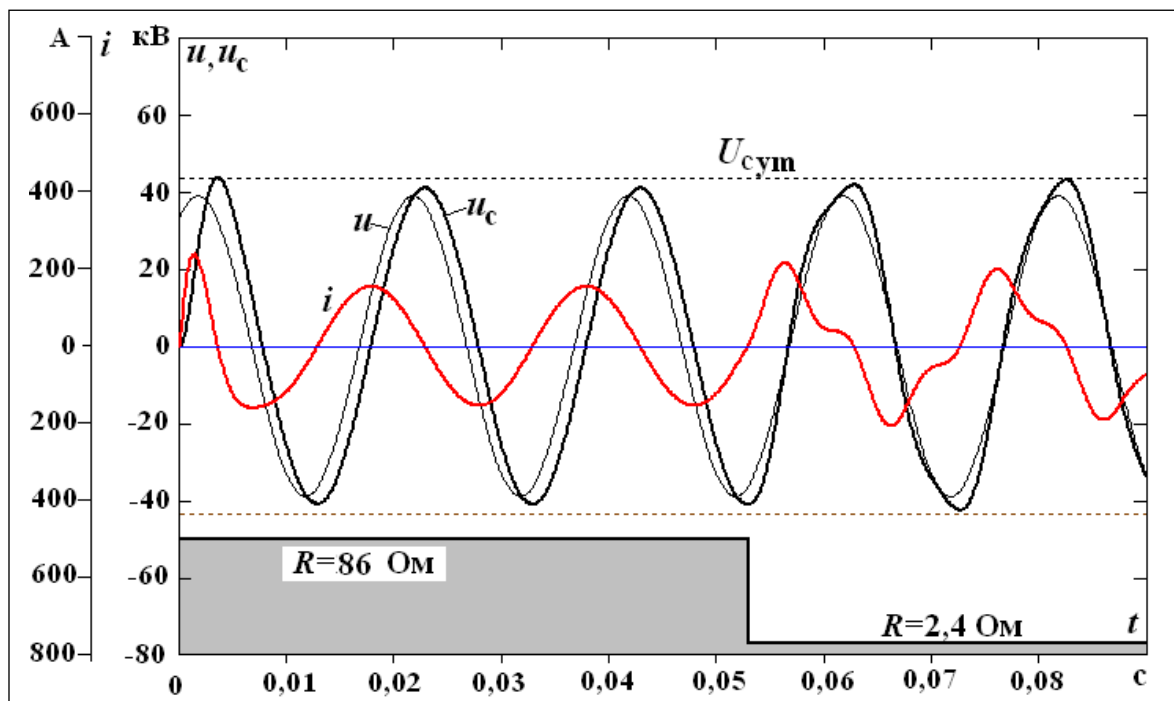


Рис. 2. Переходный процесс при включении КУ в два этапа и шунтировании демпфирующего резистора в нуль тока

Исследования авторов показали, что КУ можно включать практически без перенапряжений, по схеме на рис. 1, а, если значение демпфирующего резистора выбрать близким к значению волнового сопротивления резонансного контура CLR и шунтировать его в момент

прохождения тока через нуль (рис. 2). Это техническое решение требует одного несинхронизированного главного выключателя В1 и одного синхронизированного шунтирующего выключателя В2, который должен включаться в нуль тока. Как видно из рис. 2, перенапряжения в этом случае практически не возникают.

При использовании двух несинхронизированных выключателей полностью исключить перенапряжения нельзя, но можно свести их к минимуму. На рис. 3 приведены зависимости значений K_{U1} при включении КУ с демпфирующим резистором и K_{U2} при шунтировании демпфирующего резистора от значения его сопротивления, когда оба выключателя несинхронизированные и перенапряжения при каждой коммутации максимально возможные.

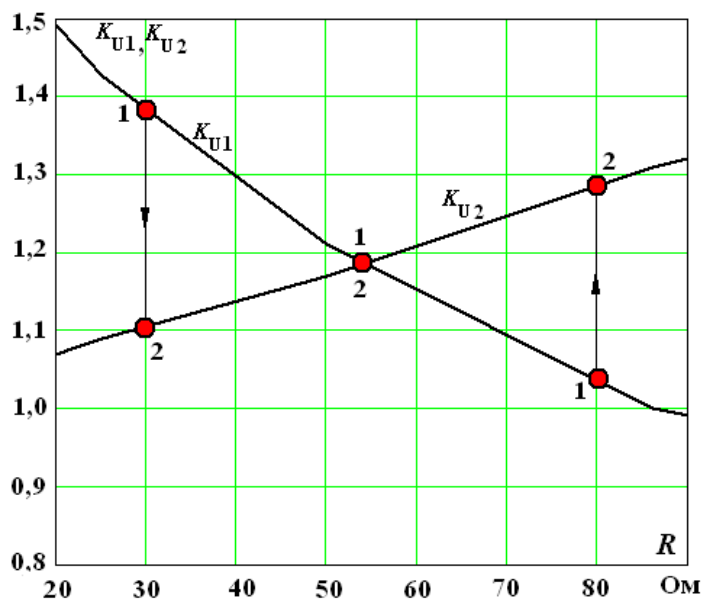


Рис. 3. Перенапряжения в КУ при включении ее в два этапа:

- 1 – при включении КУ с демпфирующим резистором;
- 2 – при шунтировании демпфирующего резистора

Как видно из рис. 3, при малых значениях $R_g=30$ Ом при включении K_{U1} составляет 1,39 (точка 1- первая коммутация), а при шунтировании резистора $K_{U2}=1,1$ (точка 2 - вторая коммутация). При большом значении $R_g=80$ Ом при включении K_{U1} составляет 1,03 (точка 1 - первая коммутация), а при шунтировании резистора $K_{U2}=1,28$ (точка 2- вторая коммутация). При значении $R_g=55$ Ом $K_{U1} = K_{U2}=1,18$ (точка 1, 2 - первая и вторая коммутации в одной точке). То есть и при первой, и при второй коммутации в этом случае получают одинаковые наименьшие коэффициенты перенапряжения и перенапряжения не превысят 18%. В действительности значение оптимального сопротивления демпфирующего резистора следует выбирать несколько меньшим, так как первое перенапряжение длится значительно меньше, чем второе. Постоянная времени затухания первой коммутации за счет включения демпфирующего резистора составляет 0,066 с, а второй – 0,00288 с.

На этом возможности схемы двухэтапного включения с несинхронизированными выключателями исчерпываются. Лучшие результаты можно получить, если шунтировать демпфирующий резистор не сразу, а по частям с помощью двух выключателей (рис. 1, б). В этом случае, например, при $R_d=70$ Ом и при шунтировании части резистора в 50 Ом (оставшаяся часть демпфирующего резистора 20 Ом) $K_{U2}=1,16$, а при третьей коммутации - шунтировании оставшейся части 20 Ом $K_{U3}=1,07$. При шунтировании половины сопротивления $K_{U2}=1,08$, а $K_{U3}=1,13$. Естественно, судя по рис. 4, можно подобрать значения оставшегося после второй коммутации сопротивления так, чтобы при всех трех коммутациях коэффициенты перенапряжений были бы равны и не превосходили бы значение 1,1 (рис. 5).

Заметим, что для схемы трехэтапного включения можно сделать коэффициенты перенапряжений при коммутациях не только равными, но и минимальными (рис. 6).

На рис. 6, кроме зависимости K_{U2} перенапряжений при полном шунтировании демпфирующего резистора, приведена зависимость перенапряжений K_{U2}^1 при частичном шунтировании резистора.

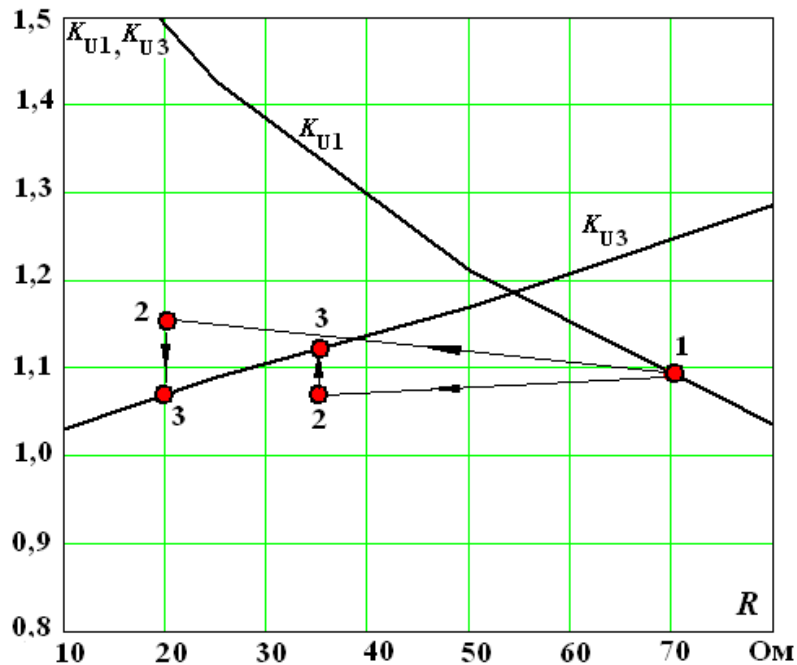


Рис. 4. Перенапряжения в КУ при включении ее в три этапа. Коэффициенты перенапряжений при коммутациях не равны

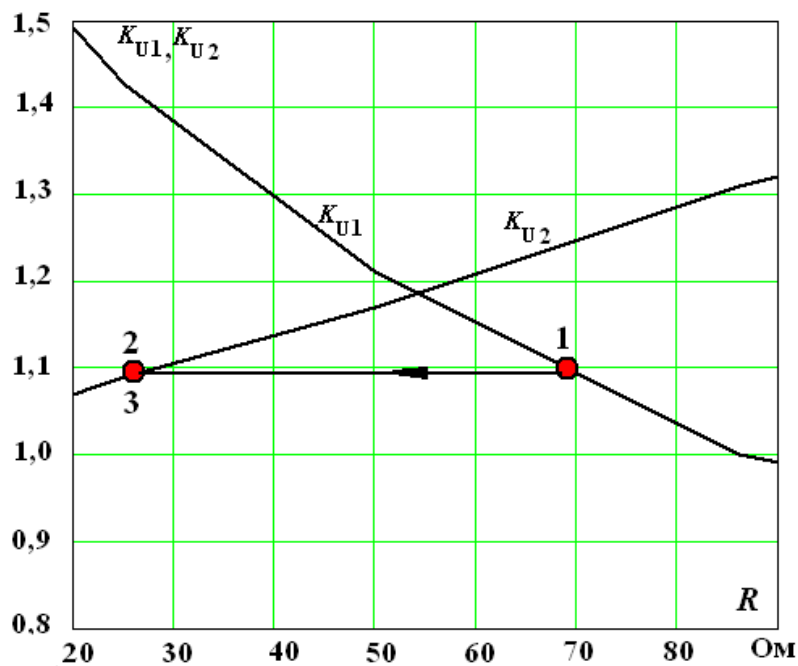


Рис. 5. Перенапряжения в КУ при включении ее в три этапа. Коэффициенты перенапряжений при коммутациях равны

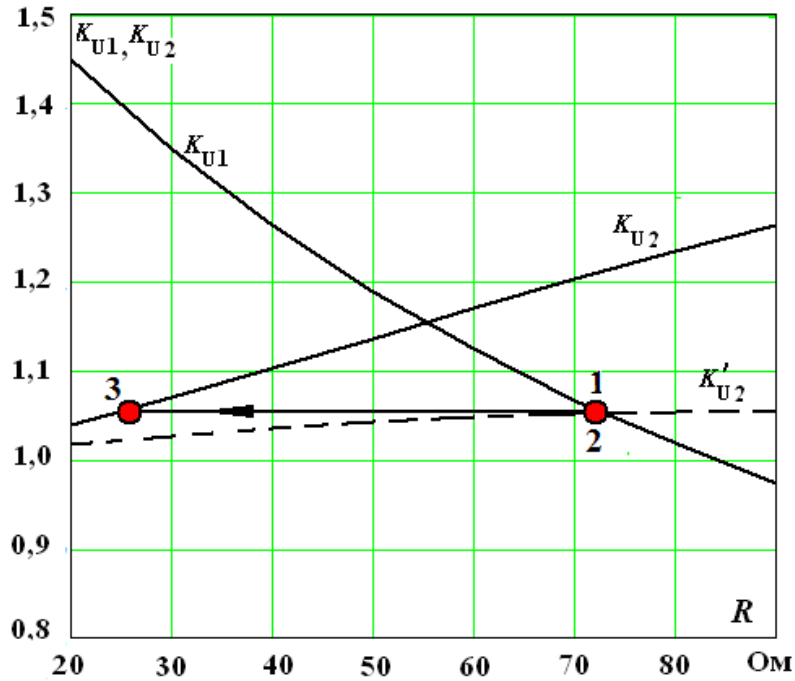


Рис. 6. Перенапряжения в КУ при включении ее в три этапа. Коэффициенты перенапряжений при коммутациях равные и минимальные

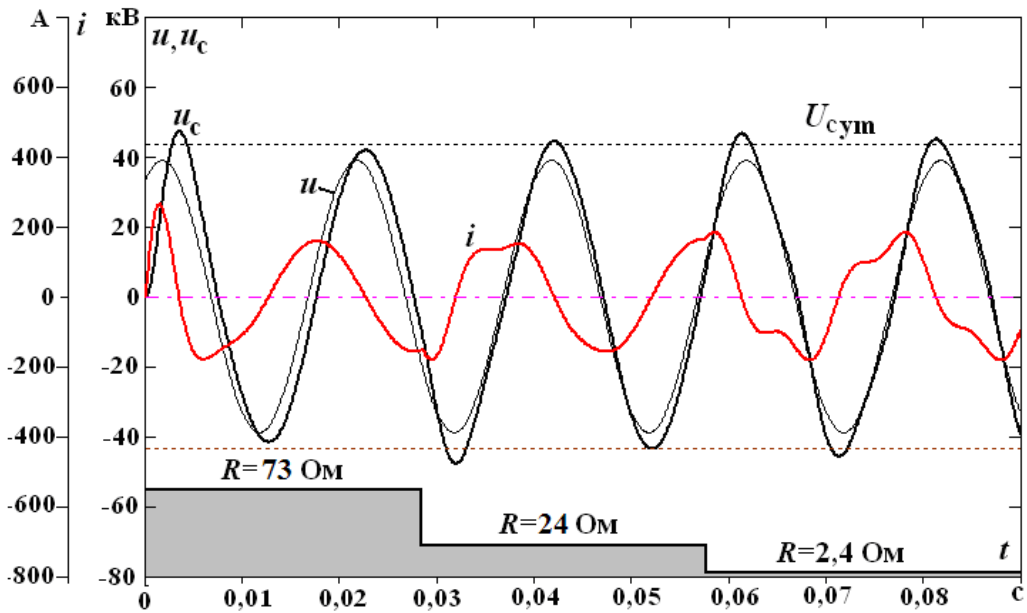


Рис. 7. Переходный процесс при трехэтапном включении

Если демпфирующий резистор шунтируется не полностью, то зависимость коэффициента перенапряжений K_{U2}^1 от значения демпфирующего резистора пойдет ниже зависимости K_{U2} . Чем больше остается не выключенная часть резистора, тем ниже идет зависимость K_{U2}^1 . На рис. 6 зависимость K_{U2}^1 приведена для значения оставшегося сопротивления демпфирующего резистора, равного $0,32R_g$. Как видно из рис. 6, в точке пересечения кривых K_{U2} и K_{U2}^1 (точка 1, 2) при значении демпфирующего резистора $R_g=73$ Ом коэффициенты перенапряжения при первой и второй коммутациях будут равны 1,05. Оставшаяся часть сопротивления

демпфирующего резистора будет равна $0,32 \cdot 73 = 23$ Ом. По зависимости K_{U2} для $R=23$ Ом находим $K_{U2}=1,05$. Все три коэффициента перенапряжений будут равны. В относительных единицах для трехэтапного включения сопротивление демпфирующего резистора следует брать равным 0,85 от волнового сопротивления КУ, а после второго этапа оставлять 0,25-0,3 от волнового сопротивления. На рис. 7 показаны временные диаграммы для этого случая.

Выводы

Эксплуатационную надежность регулируемых установок поперечной емкостной компенсации с несинхронизированными выключателями можно повысить, применив схему трехэтапного включения. Значение демпфирующего резистора на первом этапе включения должно составлять 0,85 от волнового сопротивления КУ, а на втором этапе – 0,25–0,3 от волнового сопротивления. Перенапряжения в этом случае не превосходят 5% от номинального значения напряжения на конденсаторах.

Библиографический список

1. **Бородулин, Б.М.** Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б.М. Бородулин, Л.А. Герман, Г.А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983. – 183 с.
2. **Герман, Л.А.** Синхронизированные выключатели для регулирования поперечной емкостной компенсации / Л.А. Герман [и др.] // Локомотив. 2011. №1. С. 41-43.
3. Правила устройства системы тягового электроснабжения железных дорог Российской Федерации, ЦЭ-462. – М.: МПС РФ, 1997. – 79 с.
4. **Берковский, А.М.** Мощные конденсаторные батареи / А.М. Берковский, Ю.И. Лысков. – М.: Энергия, 1967. – 168 с.
5. **Герман, Л.А.** Поперечная емкостная компенсация в тяговой сети железных дорог // Промышленная энергетика. 2009. № 10. С. 30–35.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

L.A. German¹, A. S.Serebryakov¹, D.E. Dulepov²

THE ANALYSIS OF TRANSIENT PROCESS AT INCLUSION OF INSTALLATION CROSS-SECTION CAPACITOR COMPENSATIONS IN THREE STAGES

Nizhny Novgorod branch of the Moscow State University of Railway¹,
Nizhny Novgorod State University of Engineering and Economics²

Transient processes are investigated at inclusion of installation of the cross-section capacitor compensation (compensator installation) in three stages. Objective of researches is definition optimum parameters of the dempffing resistor for increase of operational reliability of compensator installation at use of not synchronized switches. Researches are lead by a method of the numerical decision of the differential equations describing processes in installations of the capacitor compensation. It is shown, that at inclusion of installations with the dempffing resistor in three stages of value of overstrain on condensers do not surpass 10 %. Scope is the electrified railways of an alternating current.

Key words: the cross-section capacitor compensation, overstrain, switching, transients.

УДК 621.316.722

А.А. Асабин¹, С.Я. Верховский²**РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТИРИСТОРНОГО РЕГУЛЯТОРА ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ С ВОЛЬТОДОБАВОЧНЫМ ТРАНСФОРМАТОРОМ ПРИ ПООЧЕРЕДНОМ ДВУХЗОННОМ УПРАВЛЕНИИ**Институт прикладной физики Российской академии наук¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Описан способ двухзонного поочередного управления трансформаторно-тиристорным регулятором переменного напряжения с синхронизацией моментами перехода напряжения сети через нулевое значение. Данный способ позволяет реализовать автоматическую систему плавного регулирования и стабилизации напряжения нагрузки при глубоком изменении величины тока нагрузки на интервалах положительного и отрицательного направления потока мощности. Получены теоретические и экспериментальные выходные характеристики регулятора в различных рабочих режимах.

Ключевые слова: алгоритм управления, направление потока мощности, однозонное управление, интервал коммутации, стабилизация выходного напряжения.

Известные алгоритмы управления трансформаторно-тиристорных регуляторов переменного напряжения (ТТРН) при импульсно-фазовом методе регулирования подразделяются на две группы:

1. Алгоритмы, основанные на выделении знака потока мощности.
2. Алгоритмы, основанные на синхронизации моментами перехода напряжения сети через нулевое значение.

Алгоритмы, основанные на выделении знака мощности, строятся следующим образом [1]. По сигналам датчика тока нагрузки и сигналам датчика напряжения сети выделяются интервалы совпадения знаков тока и напряжения. Данные интервалы принято называть интервалами положительного направления мощности, так как в течение их энергия передается из сети в нагрузку. В интервалах с противоположными знаками тока нагрузки и напряжения сети энергия рекуперирована из нагрузки в сеть. Данные интервалы принято называть интервалами отрицательного направления мощности. В интервалах положительного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования α_1 , выполняют переключение на повышение напряжения. В интервалах отрицательного направления мощности с задержкой, равной углу регулирования α_2 , выполняют переключение на понижение напряжения. Изменяя значения углов α_1 и α_2 , регулируют выходное напряжение в пределах регулировочной ступени. Данный алгоритм, при совместном изменении углов регулирования на повышение и понижение напряжения, известен как алгоритм с одновременным двухзонным регулированием [2]. Он не обеспечивает устойчивой работы ТТРН при глубоком изменении тока нагрузки, например, при отключении нагрузки ток равен нулю и выделение интервалов направления мощности невозможно. В этом случае нарушаются регулировочные свойства ТТРН.

Известные алгоритмы [3], основанные на синхронизации моментами перехода напряжения сети через нулевые значения, предназначены в основном для регулирования напряжения в интервалах положительного направления мощности. В этом случае угол регулирования определяет только момент переключения на уровень повышенного напряжения. Переключения на понижение напряжения фиксированы и либо совпадают с моментом перехода напряжения сети через нулевое значение, либо происходят в момент смены знака тока нагрузки. Такое однозонное регулирование при смешанной нагрузке (активно-индуктивной или активно-емкостной) сопровождается появлением нерегулируемых интервалов в выходном напряжении регулятора. Длительность нерегулируемых интервалов совпадает с интервалами от-

рицательного направления мощности. Это приводит к ограничениям регулировочной характеристики и может стать причиной возникновения колебательных процессов в системе автоматической стабилизации выходного напряжения, поэтому рассматриваемые алгоритмы распространены в ТТРН, предназначенных для работы на выпрямительную нагрузку или нагрузку с высоким значением коэффициента мощности (активную).

На кафедре «Промышленная электроника» НГТУ разработан способ двухзонного поочередного управления ТТРН с синхронизацией моментами перехода напряжения сети через нулевое значение [4]. Данный способ не требует применения датчика тока, поэтому регулировочные свойства ТТРН сохраняются при глубоком изменении величины тока нагрузки. Он обеспечивает двухзонное регулирование, реализуемое в интервалах положительного и отрицательного направления мощности.

Следовательно, ограничения регулировочной характеристики отсутствуют и устраняются причины возникновения колебательных процессов в системе автоматической стабилизации напряжения нагрузки. Теоретические и экспериментальные исследования ТТРН с двухзонным поочередным управлением выполнялись при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6016 от 11.10.11 г.).

Схема исполнительного органа ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора $TV1$ приведена на рис. 1. Применяемый способ обеспечивает двухзонное поочередное регулирование выходного напряжения в интервалах положительного и отрицательного направления мощности. При этом используются три основных режима работы вольтодобавочного трансформатора (ВДТ): "вольтоотбавка" – включены тиристоры $V3, V4$ и $V5, V6$; "закоротка" – включены тиристоры $V1, V2$ и $V5, V6$; "вольтодобавка" – включены тиристоры $V1, V2$ и $V7, V8$. В режиме "вольтоотбавка" ВДТ включается по схеме понижающего автотрансформатора и напряжение нагрузки (u_H) ниже напряжения сети (u_C) на величину э.д.с. регулировочной ступени $u_H = u_C - e_{CT}$. В режиме "закоротка" ВДТ находится в режиме короткого замыкания (к.з.) и включен последовательно с нагрузкой (Z_H). В этом случае практически все напряжение сети приложено к сопротивлению нагрузки $u_H = u_C$, поскольку сопротивление к.з. трансформатора мало. В режиме "вольтодобавка" ВДТ включается по схеме повышающего автотрансформатора и напряжение нагрузки больше напряжения сети на величину э.д.с. регулировочной ступени $u_H = u_C + e_{CT}$.

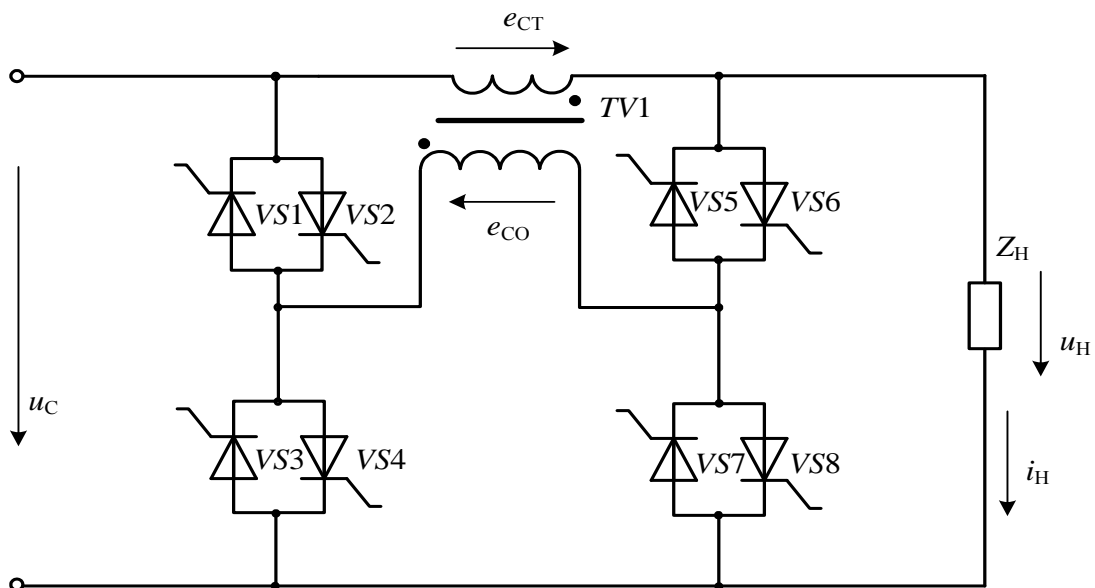


Рис. 1. ТТРН с двухзонным регулированием напряжения вольтодобавочного трансформатора

Переход из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка", согласно предложенному в [4] способу, начинается с увеличения угла регулирования на понижение напряжения α_2 от 0

до π при фиксированном значении угла регулирования на повышение напряжения $\alpha_1 = \pi$. Такое изменение α_2 позволяет реализовать регулирование выходного напряжения в интервалах отрицательного направления мощности. Далее реализуется регулирование в интервалах положительного направления мощности путем уменьшения значения угла регулирования α_1 от π до 0 при фиксированном значении $\alpha_2 = \pi$. Такое же поочередное двухзонное регулирование применяется и для плавного перехода из режима "закорotka" в режим "вольтдобавка". Плавный переход из режима "вольтдобавка" в режим "вольтотбавка" производится в обратной последовательности.

Диаграммы изменения напряжения (u_H) и тока (i_H) нагрузки при поочередном изменении углов регулирования α_1 и α_2 показаны на рис. 2. Моменты переключения тиристоров не всегда определяются значениями углов регулирования, поскольку они также зависят от фазового угла нагрузки (φ_H). Совпадение значений моментов переключения тиристоров на повышение напряжения с углом регулирования α_1 имеет место только в интервалах положительного направления мощности ($\varphi_H \leq \alpha_1 < \pi$). Моменты переключения тиристоров на понижение напряжения в данном режиме совпадают с моментом перехода тока нагрузки через ноль, т.е. определяются фазовым углом нагрузки φ_H .

Следовательно эффективное изменение угла α_1 в целях регулирования напряжения нагрузки находится в интервале $\varphi_H \leq \alpha_1 < \pi$ (рис. 2, а). Совпадение значений моментов переключения тиристоров на понижение напряжения с углом регулирования α_2 имеет место только в интервалах отрицательного направления мощности ($0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_H$). Моменты переключения тиристоров на повышение напряжения в данных режимах соответствуют заданному значению угла $\alpha_1 = \pi$. Поэтому эффективное изменение угла α_2 в целях регулирования напряжения нагрузки находится в интервале $0^\circ < \alpha_2 \leq \varphi_H$ (рис. 2, б).

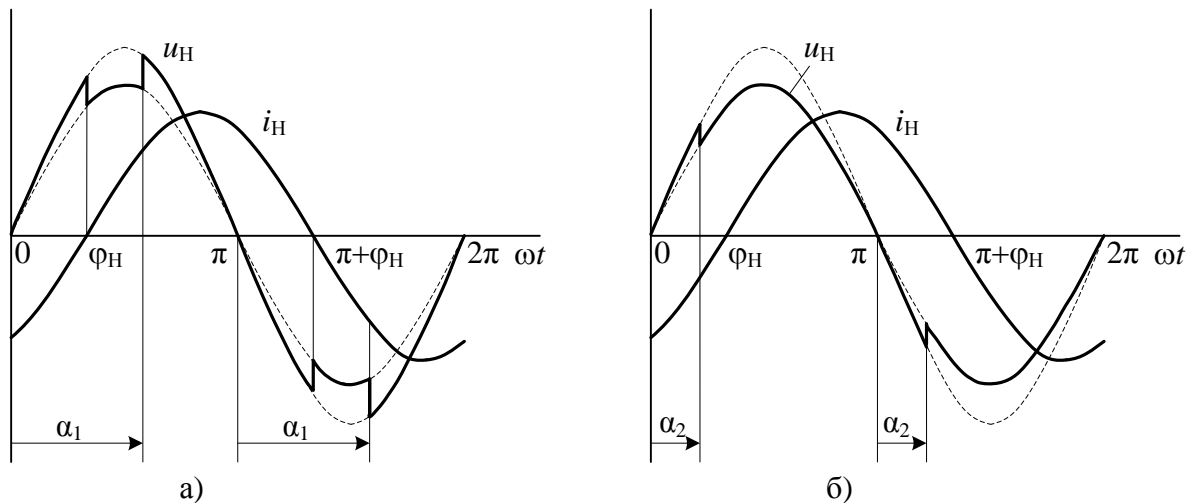


Рис. 2. Напряжение (u_H) и ток (i_H) нагрузки в интервалах:
 а – эффективного изменения угла регулирования α_1 на повышение напряжения;
 б – эффективного изменения угла регулирования α_2 на понижение напряжения

Анализ проводим с использованием метода припасовывания при идеализации вольт-амперных и динамических характеристик тиристоров. Пренебрегаем сопротивлениями магнитной цепи и обмоток ВДТ. При анализе принимаем, что нагрузка линейна и имеет активно-индуктивный характер как наиболее распространенная.

В процессе регулирования изменяется гармонический состав напряжения и тока нагрузки. Это может сместить момент перехода тока нагрузки через ноль относительно значения фазового угла нагрузки на дополнительный угол $\Delta\beta$. Данное обстоятельство может привести к смещению интервалов эффективного регулирования выходного напряжения ТТРН изменением углов α_1 и α_2 . Как показали результаты исследований, при рекомендуемом

в [5] значении коэффициента трансформации вольтодобавочного трансформатора $K_2=e_{CT}/e_{CO}=0.1$ во всем диапазоне регулирования дополнительный угол $\Delta\beta \leq 3^0$. Ввиду малости значений дополнительного угла $\Delta\beta$ в дальнейшем считаем, что моменты перехода тока нагрузки через ноль и интервалы эффективного регулирования определяются лишь фазовым углом нагрузки φ_H .

Регулировочные характеристики удобно выражать в относительных единицах. В качестве базисной величины примем номинальное действующее значение напряжения сети ($U_B=U_{H,НОМ}$). Относительные значения действующих и средних величин напряжений будем обозначать в дальнейшем символами со звездочкой, например U_H^* . В режиме "закоротка" все токи и напряжения ТТРН имеют синусоидальный характер, поэтому относительные значения действующих, амплитудных и средних величин напряжений нагрузки в этом режиме равны соответственно:

$$U_H^*=1, \quad U_{Hm}^*=\sqrt{2}, \quad U_{H,CP}^*=2\sqrt{2}/\pi. \quad (1)$$

Мгновенные значения напряжения нагрузки в относительных единицах, согласно рис. 1 и рис. 2, для перехода ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка" можно записать в следующем виде:

- в интервале эффективного изменения α_2 ($\alpha_1=\pi$)

$$u_H^* = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{1+K_2} \sin \omega t & \alpha_2 \leq \omega t \leq \pi \\ \sqrt{2} \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha_2; \end{cases} \quad (2)$$

- в интервале эффективного изменения α_1 ($\alpha_2=\varphi_H$)

$$u_H^* = \begin{cases} \frac{\sqrt{2}}{1+K_2} \sin \omega t & \varphi_H \leq \omega t \leq \alpha_1 \\ \sqrt{2} \sin \omega t & \alpha_1 \leq \omega t \leq \pi + \varphi_H \end{cases}. \quad (3)$$

Мгновенные значения напряжения нагрузки в относительных единицах для перехода ВДТ из режима "закоротка" в режим "вольтодобавка":

- в интервале эффективного изменения α_2' ($\alpha_1'=\pi$)

$$u_H^* = \begin{cases} \sqrt{2} \sin \omega t & \alpha_2' \leq \omega t \leq \pi \\ \sqrt{2}(1+K_2) \sin \omega t & \pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha_2'; \end{cases} \quad (4)$$

- в интервале эффективного изменения α_1' ($\alpha_2'=\varphi_H$)

$$u_H^* = \begin{cases} \sqrt{2} \sin \omega t & \varphi_H \leq \omega t \leq \alpha_1' \\ \sqrt{2}(1+K_2) \sin \omega t & \alpha_1' \leq \omega t \leq \pi + \varphi_H. \end{cases} \quad (5)$$

Так как кривые напряжений симметричны относительно оси абсцисс, действующие значения напряжения нагрузки определяем, используя выражение

$$U_H^* = \sqrt{\frac{T}{2} \int_0^{\frac{T}{2}} (u_H^*)^2 dt}.$$

Для перехода ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "закоротка" получим:

- в интервале эффективного изменения α_2

$$U_H^* = \sqrt{\frac{2\pi + (2K_2 + K_2^2)(2\alpha_2 - \sin 2\alpha_2)}{2\pi(1+K_2)^2}}; \quad (6)$$

- в интервале эффективного изменения α_1

$$U_{H*} = \sqrt{1 - \frac{(2K_2 + K_2^2)[\alpha_1 - \varphi_H - \sin(\alpha_1 - \varphi_H)\cos(\alpha_1 + \varphi_H)]}{\pi(1 + K_2)^2}}. \quad (7)$$

Для перехода ВДТ из режима "закоротка" в режим "вольтдобавка":

- в интервале эффективного изменения α'_2

$$U_{H*} = \sqrt{1 + \frac{(2K_2 + K_2^2)(2\alpha'_2 - \sin 2\alpha'_2)}{2\pi}}; \quad (8)$$

- в интервале эффективного изменения α'_1

$$U_{H*} = \sqrt{(1 + K_2)^2 - \frac{(2K_2 + K_2^2)[\alpha'_1 - \varphi_H - \sin(\alpha'_1 - \varphi_H)\cos(\alpha'_1 + \varphi_H)]}{\pi}}. \quad (9)$$

Среднее относительное значение выходного напряжения определяется так же интегрированием выражений (2)–(5) для напряжения нагрузки u_H^* на интервале, равном полупериоду напряжения сети.

Для перехода ВДТ из режима "вольтотбавка" в режим "закоротка" получим:

- в интервале эффективного изменения α_2

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[2 - \frac{K_2}{1 + K_2} (\cos \alpha_2 + 1) \right]; \quad (10)$$

- в интервале эффективного изменения α_1

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \left[2 - \frac{K_2}{1 + K_2} (\cos \varphi_H - \cos \alpha_1) \right]. \quad (11)$$

Для перехода ВДТ из режима "закоротка" в режим "вольтдобавка":

- в интервале эффективного изменения α'_2

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} [2 + K_2(1 - \cos \alpha'_2)]; \quad (12)$$

- в интервале эффективного изменения α'_1

$$U_{HCP*} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} [2 + K_2(2 - \cos \varphi_H + \cos \alpha'_1)]. \quad (13)$$

Анализируя полученные выражения (6)–(13), можно заметить, что при поочередном двухзонном управлении величины действующего и среднего значений выходного напряжения ТТРН зависят от фазового угла нагрузки φ_H , значений углов переключения на понижение α_2 и повышение α_1 напряжения, а также от величины коэффициента трансформации K_2 вольтдобавочного трансформатора.

Регулировочные характеристики, рассчитанные по аналитическим выражениям (6)–(13) при переводе ВДТ с рекомендуемым коэффициентом трансформации $K_2=0.1$ из режима "вольтотбавка" в режим "вольтдобавка" и значении фазового угла нагрузки $\varphi_H=90^\circ$, приведены на рис. 3. На регулировочных характеристиках совмещены интервалы эффективного изменения углов α_2 , α_1 , α'_2 , α'_1 . На рис. 3 штриховой линией показана регулировочная характеристика при однозонном регулировании. Из анализа характеристик видно, что при поочередном двухзонном управлении существует плавный переход напряжений из режима "вольтотбавка – закоротка" ВДТ в режим "закоротка - вольтдобавка", а при однозонном регулировании – скачкообразный.

В связи с этим, диапазон стабилизации при однозонном регулировании сокращается. Анализ регулировочных характеристик также показывает, что из-за наличия скачкообразного перехода с режима "вольтотбавка - закоротка ВДТ" на режим "закоротка ВДТ - вольтдобавка" при однозонном регулировании практически невозможна стабилизация выходного напряжения. Стабилизацию напряжения при однозонном регулировании можно осуществлять только при работе ТТРН отдельно в каждом из рассматриваемых режимов или при ча-

стичном совмещении этих режимов. В этих случаях искажение кривой выходного напряжения значительно выше, чем при двухзонном управлении.

Аналитические исследования подтверждены результатами моделирования ТТРН в пакете Matlab-simulink и экспериментальными испытаниями макета ТТРН мощностью 3,5 кВА. Экспериментальная зависимость действующего значения напряжения нагрузки, совмещенная в одной системе координат с рассчитанной по аналитическим выражениям и полученной на виртуальной модели ТТРН, приведена на рис. 4.

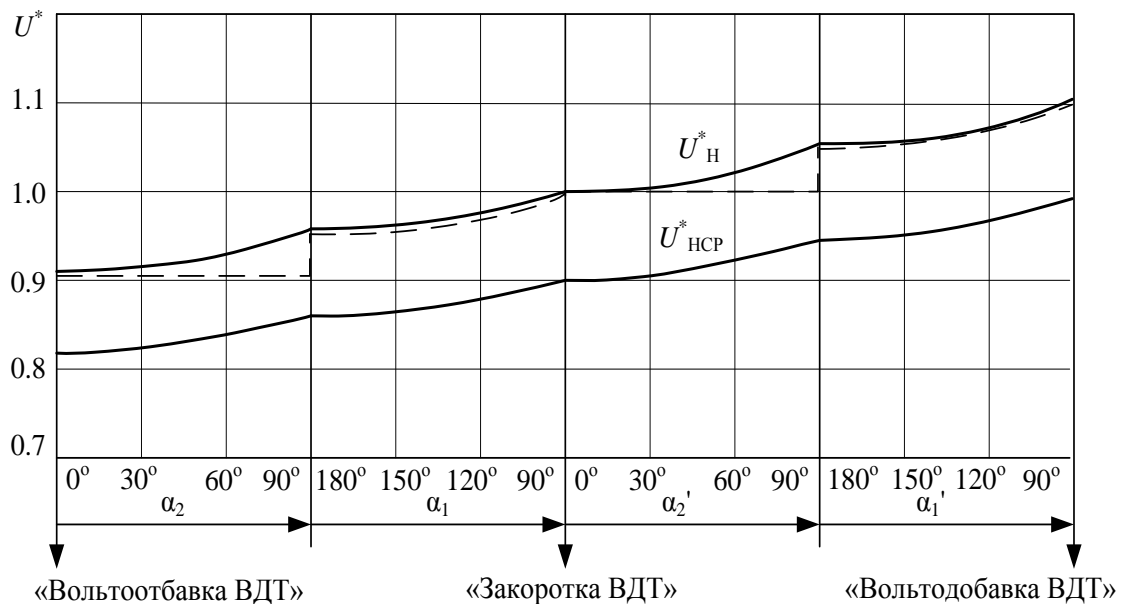


Рис. 3. Регулировочные характеристики при переводе ВДТ из режима "вольтоотбавка" в режим "вольтодобавка" ($K_2=0.1$, $\varphi_n=90^\circ$)

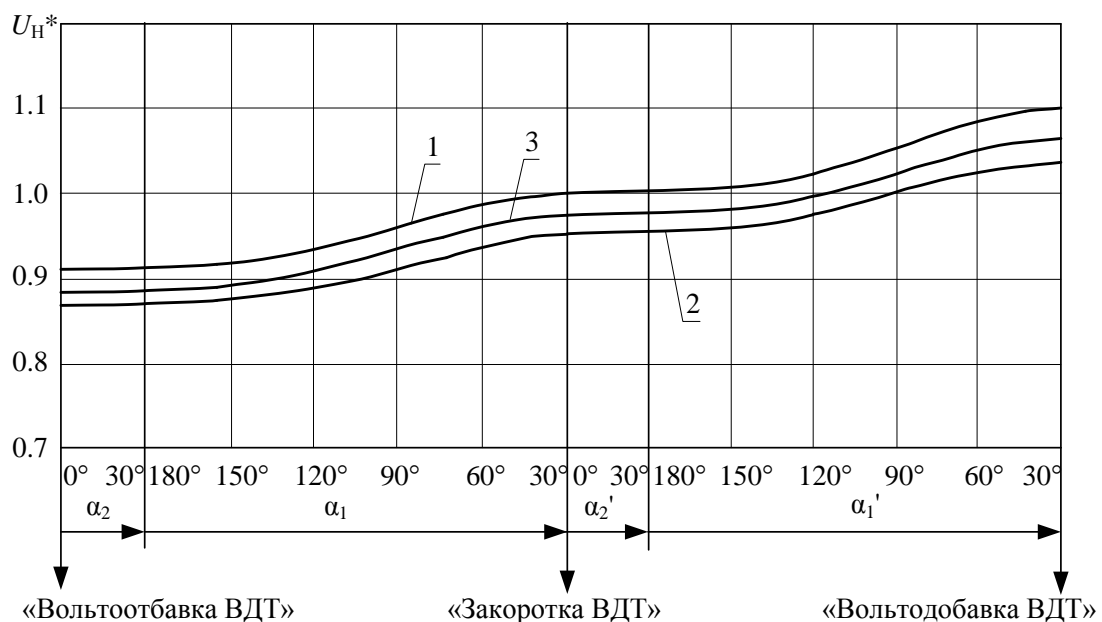


Рис. 4. Зависимость действующего значения напряжения нагрузки при переводе ВДТ из режима «вольтоотбавка» в режим «вольтодобавка» ($K_t=0.1$, $\varphi_n=30^\circ$)

Сопоставление экспериментальной зависимости действующего значения напряжения нагрузки (3) с рассчитанной по аналитическим выражениям (1) и полученной на виртуальной модели (2) позволяет сделать следующие выводы.

1. Форма и характер экспериментальной зависимости совпадает с формой и характером зависимостей, построенной по аналитическим выражениям и полученной на виртуальной модели.

2. Экспериментальная и уточненная зависимость, полученная на виртуальной модели, располагаются ниже, чем зависимость, рассчитанная методом припасовывания. Это объясняется учётом падений напряжений в линии питающей сети и на силовых элементах виртуальной модели ТТРН, а также учётом коммутационных интервалов, в течение которых напряжение нагрузки практически равно нулю.

3. Неполное совпадение экспериментальной и уточненной зависимостей объясняется тем, что при моделировании питающей сети принято максимально допустимое значение сопротивления короткого замыкания линии питающей сети. Это обусловило завышенные значения падений напряжения в линии питающей сети при моделировании, не соответствующие условиям эксперимента.

4. Наибольшее отклонение зависимости действующего значения напряжения нагрузки, рассчитанной по полученным аналитическим выражениям, от экспериментальной зависимости составляет 3%.

Библиографический список

1. Пат. 3621374 (США), МКИ G 05 F 1/30. Voltage regulator with zero static switching between taps for a regulator transformer/ General Electric Co.// Kestler Clarence J. 1971.
2. **Петров, Ю.Н.** Двухзонные трансформаторно-тиристорные стабилизаторы напряжения для электроустановок с активно-индуктивным сопротивлением: дисс. ...канд. техн. наук. – Горький, 1975. – 239 С..
3. А.с. 1003294 СССР, МКИ G 05 F 1/24. Способ управления регулятором напряжения и устройство для его осуществления/ Б.Ю. Алтунин, А.А. Асабин, Л.А. Зубов, Л.А., Соловьев, В.С. Шлентов// Оpubл. в Б. И., 1983. №9.
4. Пат. на изобретение RU №2398342 С1, МПК H02M5/12. Способ управления тиристорным регулятором напряжения трансформатора/ Асабин А.А.; Оpubл. 27.08.2010.
5. **Асабин, А.А.** Энергетические характеристики плавноступенчатого трансформаторно-тиристорного стабилизатора переменного напряжения с поочередным двухзонным регулированием / А.А. Асабин, К.А. Журинов // Тезисы докладов VI Международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2007.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

A.A. Asabin¹, S.Y. Verkhovskiy²

REGULATION CHARACTERISTICS IN THE TWO-ZONE CONTROL OF THE THYRISTOR AC VOLTAGE REGULATOR WITH BOOSTER TRANSFORMER

Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Purpose: Research and comparative analysis of the output characteristics of the thyristor AC voltage regulators in the two-zone control.

Design/methodology/approach: Implementation of a two-zone control alternating control algorithm for thyristor AC with transformer allows to create an automated system continuously stabilize the load voltage for deep change in the value of the load current at intervals of positive and negative direction of power flow.

Findings: The shape and character of the experimental output voltage dependence regulator coincide with the form and character of the relationships obtained by analytical expressions and the virtual model.

Research limitations/implications: Research limitations – electric power industry. Control algorithm is proposed and analyzed for the thyristor AC voltage regulator.

Originality/value: As a result, research has shown the effectiveness of the proposed method of alternating two-zone control thyristor AC regulator of power line voltage.

Key words: control algorithm, power flow direction, one-zone control, switching interval, output voltage stabilization.

УДК 621.316.72

А.И. Чивенков, В.В. Севастьянов

СИЛОВОЙ МОДУЛЬ ИНТЕГРИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ СЕТЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы, посвященные созданию и исследованию устройства для регулирования величины и направления межсетевых потоков мощности в составе интегрированной системы управления электрическими сетями распределенной энергосистемы. Предложен алгоритм работы системы управления устройством. Приведены результаты моделирования в различных режимах работы регулируемых электрических сетей.

Ключевые слова: гибкая система электропередачи, межсетевой поток мощности, компенсация реактивной мощности, регулируемый инвертор напряжения, силовой активный фильтр, синхронная система координат, имитационная модель.

В понятие «разработка типовых схем электрических сетей и распределительных устройств распределенной системы электроснабжения» все чаще вводится термин «интеллектуальные электрические сети» (Smart Grid) [1]. Под данным термином понимаются электросети, имеющие глубокую степень автоматизации, позволяющие управлять перетоками активной и реактивной мощностей, а также допускающие интеграцию малой и распределенной генерации в общую энергосистему. Данная система должна автоматически регулировать подачу электроэнергии в зависимости от режима потребления и требует разработки автоматизированной системы управления узлом нагрузки.

Одной из составляющих SmartGrid являются гибкие системы передачи переменного тока – Flexible Alternative Current Transmission System (FACTS) [2]. Эти системы направлены на регулирование величины и направления потоков мощности электрической энергии разветвленной сети единой энергетической системы, а также на улучшение параметров качества напряжения питающих цепей электроприемников. В свою очередь, системы FACTS для выполнения упомянутых функций базируются на таком техническом устройстве, как контроллер межсетевого потока мощности – Interline Power Flow Controller (IPFC) [3].

В соответствии с существующими тенденциями была поставлена задача исследования путей создания интегрированной системы управления электрическими сетями (ИСУЭС) распределенной энергосистемы. Вопросы взаимодействия традиционных и возобновляемых источников с сетью рассматривались в [4]. В последующих исследованиях они получили дальнейшее развитие. Работа выполнялась при финансовой поддержке министерства образования и науки РФ (ГК № 16.526.12.6016 от 11.10.11 г.).

В соответствии с существующими требованиями к силовому модулю и с учётом проведенного анализа возможных технических решений [5], наиболее целесообразной и перспективной схмотехникой силовой части была признана топология, построенная на базе трехфазного инвертора напряжения (ИН).

Исследования проводились с использованием имитационного моделирования в пакете прикладных программ MATLAB Simulink.

Имитационная модель силового модуля ИСУЭС приведена на рис. 1. В его состав входят два инвертора напряжения Inverter_1 и Inverter_2, объединенных общим емкостным накопителем C_1, C_2 (Series RLC Branch). Инверторы выполнены на базе трехфазного моста с IGBT- транзисторами (Universal Bridge) и индуктивно-емкостным фильтром (3-Phase Series RLC Branch) на выходе. Регистрация токов и напряжений в фазах инверторов выполняется измерителями M_inv_1 и M_inv_2 (Three-Phase V-I Measurement). На параллельную работу с сетью инверторы включаются коммутаторами Breaker_1 и Breaker_2 (Ideal Switch).

Дальнейшей задачей являлась разработка соответствующего алгоритма управления инверторами напряжения, позволяющего обеспечить взаимодействие инверторов между собой и соответствующими сетями в процессе регулирования потоков активной и реактивной мощности в узле нагрузки.

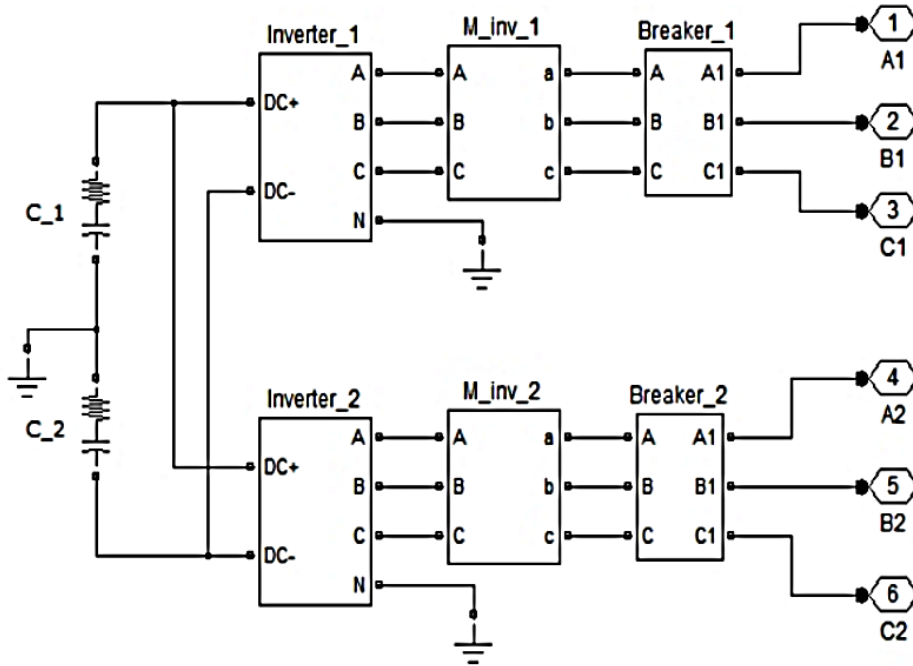


Рис. 1. Имитационная модель силового модуля ИСУЭС

В настоящее время наиболее часто используются два метода управления инверторами с функциями компенсации и регулирования составляющих мощности сети. Это метод «мгновенной мощности» и метод управления в синхронной системе координат путем преобразований Парка-Горева.

Метод «мгновенной мощности» основан на вычислении мощности нагрузки с использованием токов и напряжений нагрузки в стационарной ортогональной системе координат $\alpha - \beta$. Недостатком этого метода является непосредственное использование проекций обобщенного вектора напряжения сети при вычислении токов задания. В переходных режимах это может привести к колебательному процессу выходного тока и напряжения инвертора, что и наблюдалось в процессе имитационного моделирования.

Поэтому в дальнейшем был принят для реализации метод управления в синхронной системе координат. Метод основан на прямом и обратном преобразовании Парка-Горева. Прямое преобразование заключается в нахождении проекций обобщенного вектора тока или напряжения на оси ортогональной системы координат, вращающейся синхронно с вектором напряжения сети:

$$\begin{aligned}
 i_d &= \frac{2}{3} \left[i_a \cdot \sin \theta + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\
 i_q &= \frac{2}{3} \left[i_a \cdot \cos \theta + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\
 i_o &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где $\theta = \omega_1 \cdot t$ – значение угла поворота системы координат, вращающейся с частотой $\omega_1 = 2\pi \cdot f_1$, относительно неподвижной системы координат.

В синхронной системе координат постоянные составляющие проекций на оси $d-q$ будут соответствовать активной и реактивной составляющим тока первой гармоники.

Обратное преобразование Парка-Горева осуществляется в соответствии с выражениями:

$$\begin{aligned} i_a &= i_d \cdot \sin\theta + i_q \cdot \cos\theta + i_o ; \\ i_b &= i_d \cdot \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) + i_o ; \\ i_c &= i_d \cdot \sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_q \cdot \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) + i_o . \end{aligned} \quad (2)$$

Относительной трудностью в реализации данного метода является необходимость синхронизации с основной гармоникой напряжения сети сигналов $\cos\theta$ и $\sin\theta$. В данном случае для синхронизации принята система фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ).

Управление реализовано по методу одношагового прогноза [7]. Ток в фазах формируется как:

$$i_n(t) = \frac{1}{L} \int (u_c(t) - u_n(t)) dt ,$$

где $i_n(t)$ – ток инвертора, $u_c(t)$, $u_n(t)$ – фазное напряжение сети и инвертора, L – индуктивность дросселя фильтра инвертора.

Напряжение инвертора вычисляется на каждом такте модуляции с целью обеспечения равенства среднего значения генерируемого тока и тока задания:

$$\overline{u_n} = \overline{u_c} - L \frac{\overline{i_{ref}} - \overline{i_c}}{T_m} , \quad (3)$$

где T_m – период модуляции; $\overline{u_n}$, $\overline{u_c}$, $\overline{i_{ref}}$, $\overline{i_c}$ – обобщенные векторы соответственно напряжения инвертора, напряжения сети, тока задания и тока сети в синхронной системе координат $d-q$.

Таким образом, управление фазными токами инвертора осуществляется посредством формирования соответствующих напряжений.

Система управления инверторами, реализующая упомянутые ранее закономерности, приведена на рис. 2. Для преобразования трехфазных систем токов и напряжений сети (I_{gred} , U_{gred}) в двухфазную ортогональную синхронную систему координат $I_d - I_q$, $U_d - U_q$ построены блоки координатных преобразователей abc_dq0 и abc_dq1 . Они выполняют операции в соответствии с (1). Для работы координатных преобразователей необходимы сигналы синхронизации $\sin\theta$ и $\cos\theta$. Эти сигналы вырабатываются блоком фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) «PLL».

Для каждой из составляющих обобщенного вектора выделен свой канал обработки. Выбор составляющих обеспечивается селекторами сигналов $Selector1 \dots Selector4$ из библиотеки «*Simulink/Signal Routing*». Для выделения постоянных составляющих проекций по осям $d-q$, соответствующих активной и реактивной составляющим тока первой гармоники, построены фильтры низкой частоты $Filter_I$, $Filter_U$.

В соответствии с выражением (3), полученные токи сети I_d , I_q необходимо сравнить с токами задания I_{d_ref} , I_{q_ref} . Физически значениями данных переменных являются, соответственно, необходимая амплитуда активной составляющей и необходимая амплитуда реактивной составляющей тока сети. Для этого на каждом шаге модуляции определяется разность тока задания и текущего тока сети с помощью сумматоров «*Sum1*» и «*Sum2*» из библиотеки «*Simulink/Math Operations*».

Разность токов умножается на коэффициент, равный отношению L/T_m , формируемый блоками «Gain1» и «Gain2» из библиотеки «Simulink/Math Operations», где F_m – частота модуляции, L – индуктивность фильтра инвертора.

Далее, в соответствии с выражением (3) на базе сумматоров «Sum3» и «Sum4» вычисляются составляющие напряжения управления инвертором. Координатный преобразователь $dq0_abc$ выполняет обратное преобразование переменных из синхронной системы координат в трехфазную систему в соответствии с (2). Таким образом, получаем напряжение управления по каждой из фаз инвертора. Импульсы управления ключами формируются путем классической ШИМ в блоке *PWM_modulation*.

Для включения источника напряжения параллельно сети необходимо выполнить мероприятия по синхронизации с сетью. В данном случае равенство частот напряжений обеспечивается блоком ФАПЧ «PLL». В соответствии с алгоритмом управления в качестве задания инвертору указываются необходимые составляющие обобщенного вектора тока сети. Поэтому, если перед включением в параллель инвертору будет задан текущий ток сети, то инвертор не должен будет влиять на сеть. Это предполагает режим холостого хода, в котором инвертор генерирует напряжение, по амплитуде и фазе равное напряжению сети. Это позволяет подключить инвертор параллельно сети без уравнивающих токов.

Режим синхронизации поддерживается программной записью составляющих текущего тока сети в регистры Const1 и Const2. Этот режим продолжается до тех пор, пока внешний управляющий сигнал *Start* является пассивным. Если данный сигнал становится активным, то система переходит в режим отработки внешних заданий при параллельной работе с сетью.

В данном модуле ИСУЭС два инвертора напряжения имеют один общий емкостный накопитель. Для нормального функционирования модуля напряжение накопителя в процессе работы должно оставаться неизменным. Это делает режимы работы инверторов взаимозависимыми. Если один из инверторов предает мощность в сеть, параллельно с которой он работает, то он будет являться ведущим. Второй инвертор будет подчиненным, и его режим работы будет определяться условием постоянства напряжения на емкостном накопителе.

В процессе работы были определены области соответствующих режимов работы ведущего и подчиненного инвертора. Они приведены на рис. 3.

На диаграмме концы векторов обозначены дробью, числитель которой соответствует относительному значению активной составляющей, а знаменатель – реактивной составляющей тока инвертора. Режимы работы ведущего инвертора охватываются областью $0/0_1/0_1/-1_0/-1_0/0$. Соответствующие режимы работы подчиненного инвертора – областью $0/0_1/0_1/-1_0/1_0/0$. Определение токов задания подчиненного инвертора выполняется в соответствии с выражениями, в которых индекс «*master*» соответствует токам задания ведущего инвертора, а индекс «*slave*» – токам задания подчиненного инвертора:

$$\begin{aligned}
 I_{d_master} &= I_{d_ref} ; \\
 I_{q_master} &= I_{q_ref} ; \\
 I_{d_i1} &= -I_{d_ref} + 1 ; \\
 I_{q_i1} &= -I_{q_ref} - 1 ; \\
 I_{d_i2} &= -I_{d_i1} ; \\
 I_{q_i2} &= -I_{d_i1} - I_{q_i1} ; \\
 I_{d_slave} &= -I_{d_i2} + 1 ; \\
 I_{q_slave} &= -I_{q_i2} - 1 .
 \end{aligned}$$

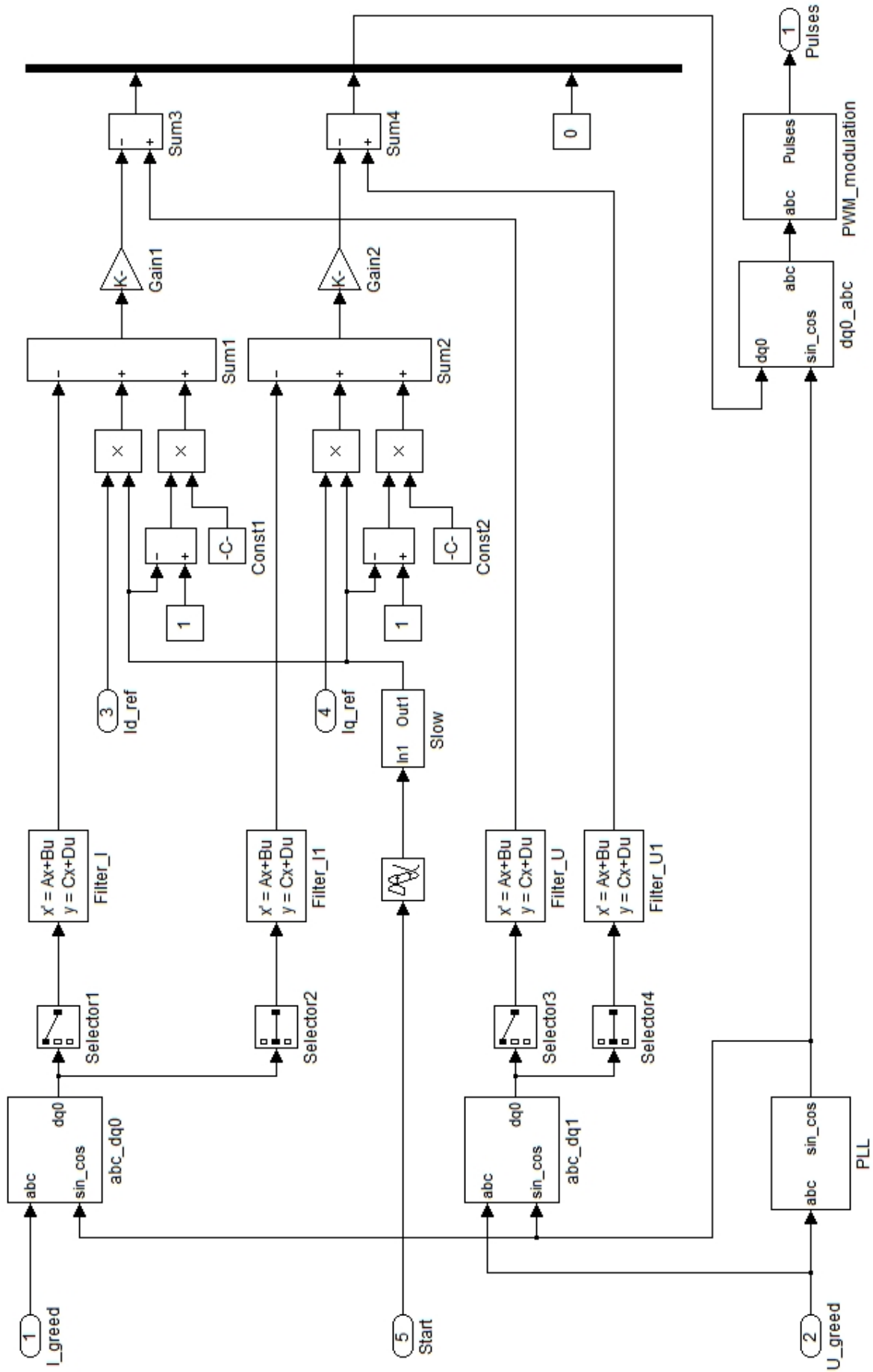


Рис. 2. Имитационная модель системы управления инвертором напряжения

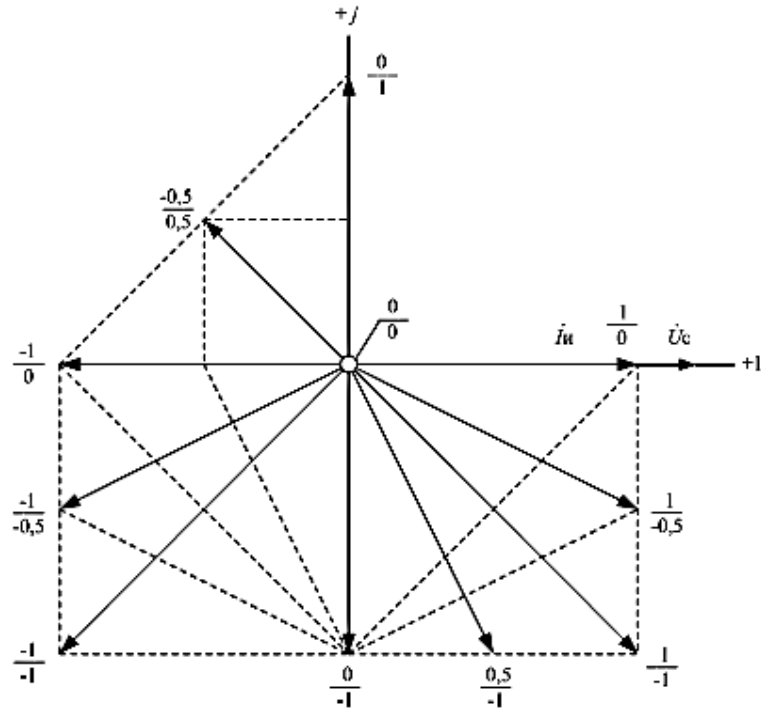


Рис. 3. Диаграмма соответствия токов ведущего и подчиненного инверторов

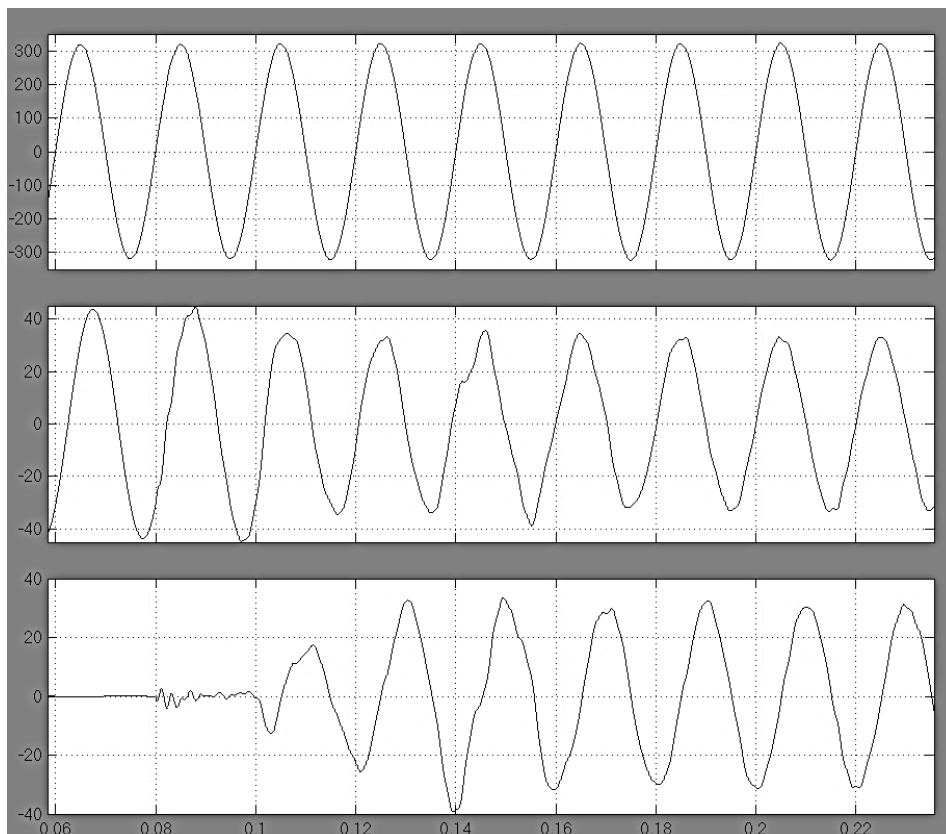


Рис. 4. Осциллограммы (сверху вниз) напряжения сети (В), тока сети (А) и тока инвертора (А) при генерации инвертором реактивного тока (задание $I_d = 1, I_q = 0$)

Для исследования разработанного силового модуля ИСУЭС проводилось имитационное моделирование переходных и стационарных режимов в процессе взаимодействия инверторов с соответствующими сетями.

Экспериментально проверялась работа инвертора в режиме генерации реактивного тока, равного реактивному току нагрузки: задание $I_d = 1$, $I_q = 0$. Это соответствует компенсации реактивной мощности сети. Осциллограммы данного режима приведены на рис. 4.

До включения инвертора (0,08 секунды) ток сети был активно-индуктивным в соответствии с параметрами нагрузки. После включения инвертора и выхода его на заданный режим (после 0,18 секунды) ток сети становится чисто активным, а ток инвертора носит чисто индуктивный характер.

Исследовалась работа инвертора в режиме генерации активного тока, равного активному току нагрузки: задание $I_d = 0$, $I_q = 1$. Это соответствует разгрузке сети по активной мощности. Осциллограммы данного режима приведены на рис. 5.

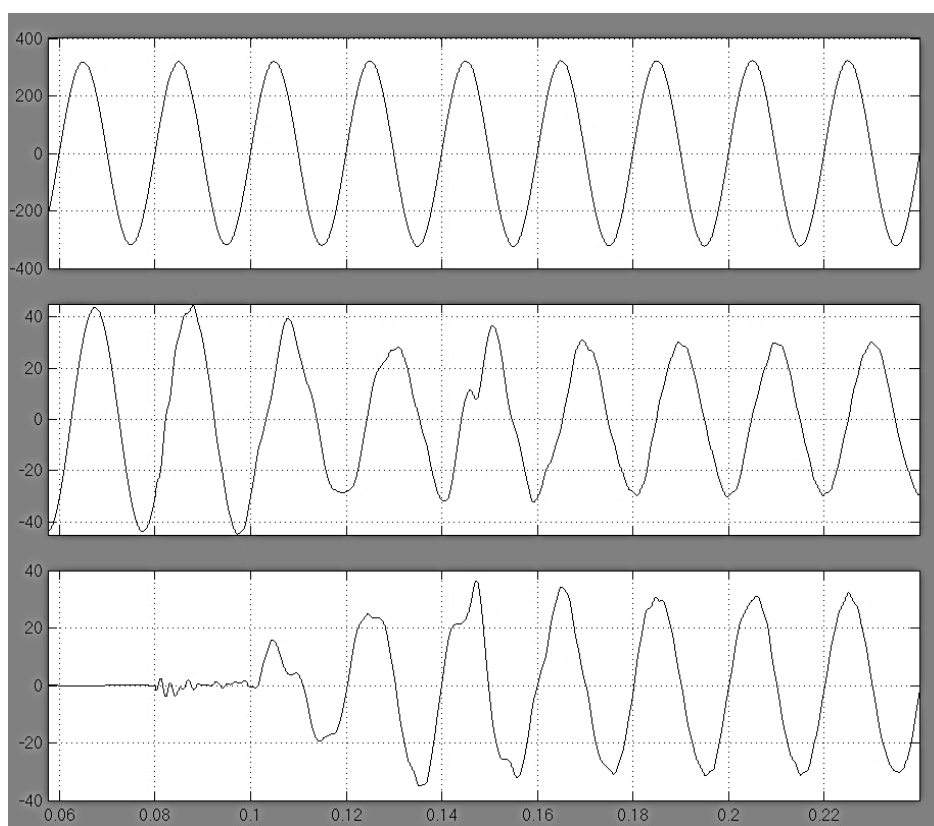


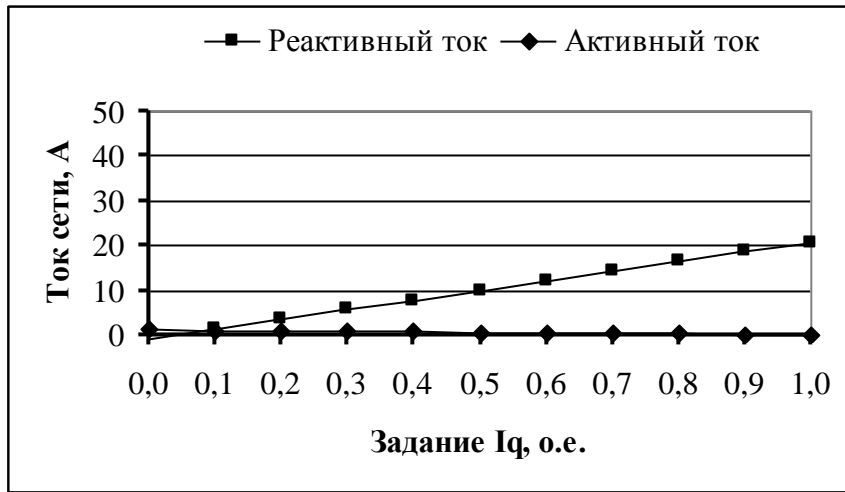
Рис. 5. Осциллограммы (сверху вниз) напряжения сети (В), тока сети (А) и тока инвертора (А) при генерации инвертором активного тока (задание $I_d = 0$, $I_q = 1$)

В рамках экспериментального исследования были получены регулировочные характеристики при изменении задания по реактивной и активной составляющим тока сети.

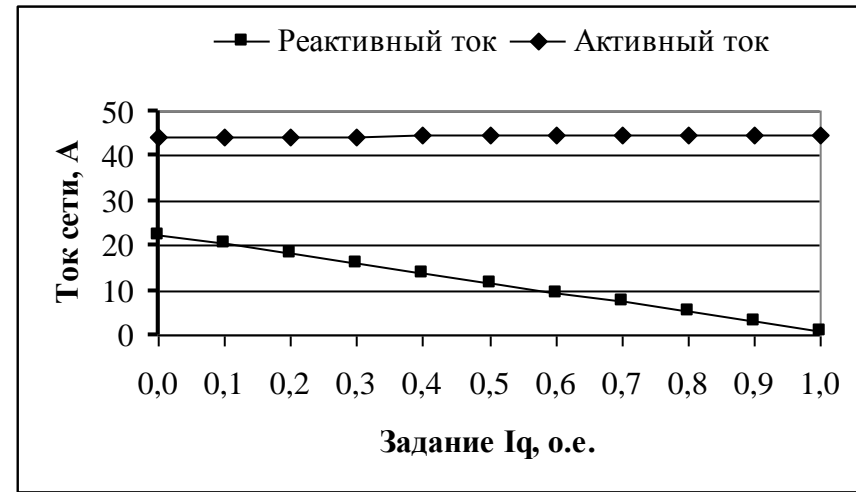
Графические зависимости при изменении задания по реактивному току для основной и вторичной сети приведены на рис. 6. Характеристики показывают наличие регулируемого потока реактивной мощности из вторичной сети в основную.

Графические зависимости при изменении задания по активному току для основной и вторичной сети приведены на рис. 7. Характеристики показывают наличие регулируемого потока активной мощности из вторичной сети в основную.

В ходе выполнения работ подтверждены начальные предпосылки возможности регулирования величин и направлений потоков мощностей в соответствии с установленными параметрами управления качеством электроэнергии распределенной системы электроснабжения интеллектуальных электрических сетей.

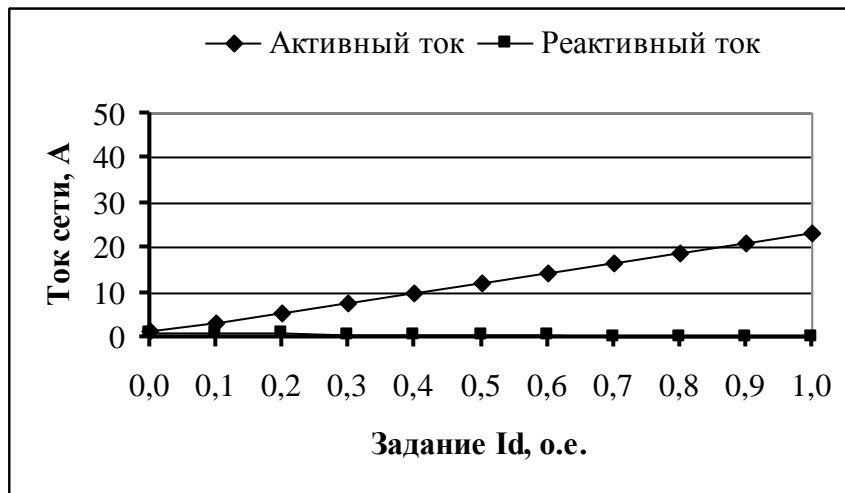


а)

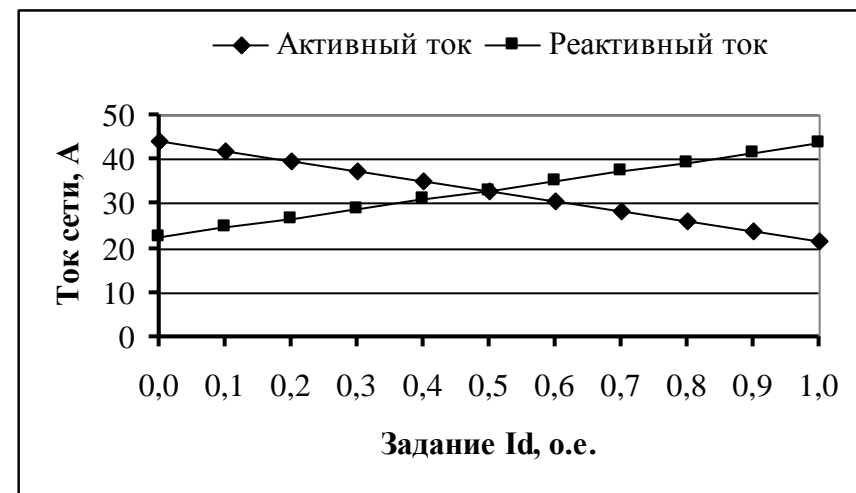


б)

Рис. 6. Регулировочные характеристики основной сети (а) и вторичной сети (б) по реактивному току задания



а)



б)

Рис. 7. Регулировочные характеристики основной сети (а) и вторичной сети (б) по активному току задания

Библиографический список

1. Интеллектуальные сети: российский взгляд. Энергоэксперт. 2009. № 4.
2. **Padiyar, K. R.** FACTS controllers in power transmission and distribution / K.R. Padiyar. – New Age International (P) Ltd. Publishers, 2007. – 532 с.
3. **Sasan Salem, Sood V. K.** Simulation and controller design of an Interline Power Flow Controller in EMTP RV / Sasan Salem // International Conference on Power Systems Transients in Lyon, France on June 4-7, 2007.
4. **Чивенков, А.И.** Определение структурной схемы устройства сопряжения модульного типа / А.И. Чивенков [и др.] // Известия академии инженерных наук им. А.М. Прохорова. Малая энергетика, Т. 23. 2008. С. 211-219.
5. **Зиновьев, Г.С.** Силовая электроника: учеб. пособие, углубленный курс / Г.С. Зиновьев. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Издательство Юрайт, 2012. – 667 с.
6. **Черных, И.В.** Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И.В. Черных. – М.: ДМК Пресс, 2011. – 288 с.
7. **Смирнов, М.И.** Пуско-регулирующее устройство на базе статического компенсатора реактивной мощности // Автореферат дис. на соиск. уч. степ. к.т.н. / М.И. Смирнов. – М.: МЭИ, 2007. – 20 с.

Дата поступления

в редакцию 19.04.2013

A.I. Chyvenkov, V.V. Sevastyanov

THE POWER MODULE OF INTEGRATED CONTROL SYSTEM BY POWER GRIDS

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

Purpose: Creation and research of device for interline power flow control in load nodes of the distributed electric networks.

Design/methodology/approach: The power module uses two current source converters that share a common dc-link. Each current source converters injects a current - with controllable amplitude and phase angle - into the power transmission line. Each current source converters provides parallel reactive power compensation for an individual line and it can also supply/absorb active power to/from the common dc-link.

Findings: Offered hardware facilities and control system algorithm of device for interline power flow control. Demonstrated simulation results in differently power module and power grids regimes.

Research limitations/implications: Research limitations – electric power industry. The study of an IPFC system with two parallel lines has demonstrated the flexible control of active/reactive power to assist in the transmission system.

Originality/value: Thus, the power module has an additional degree of freedom to control active power flow in the power system when compared to a traditional compensator. This capability makes it possible to transfer power from over- to under-loaded lines, reduce the line resistive voltage drop, and improve the stability of the power system.

Key words: flexible transmission system, interline power flow, reactive power compensation, adjustable voltage inverter, power active filter, synchronous reference frame, simulation model.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74.041

В. А. Изотов, Н. А. Родионова

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ ЗАПОЛНЕНИЯ ПОЛОСТИ ЛИТЕЙНОЙ ФОРМЫ ПРИ ЛИТЬЕ ТОНКОСТЕННЫХ ОТЛИВОК ИЗ СТАЛИ МЕТОДОМ ЛИТЬЯ ПО ГАЗИФИЦИРУЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П. А. Соловьева

Представлена зависимость загрязненности отливок типа «плита» от значения критерия Рейнольдса, обеспечивающая выбор максимально возможной скорости заполнения, также показана математическая зависимость для выбора минимально возможной скорости заполнения, позволяющие определить оптимальную скорость заполнения полости формы и расчет исполняемых размеров литниковой системы.

Ключевые слова: литье по газифицируемым моделям, минимально допустимая скорость заполнения, максимально допустимая скорость заполнения, «газовая пористость», критическое значение критерия Рейнольдса.

При получении тонкостенных отливок из углеродистых сталей по газифицируемым моделям приходится использовать достаточно высокие скорости заполнения полостей форм. При этом продукты деструкции материала модели могут захватываться расплавом, особенно при условии турбулизации потока. В результате в отливках появляется брак – «газовая пористость». Выбор необходимых скоростей заполнения тонкостенных полостей форм затруднен, так как при недостаточной скорости может возникнуть брак «спай». Это определяет задачу выбора оптимальной скорости заполнения, а если это невозможно, то и выбора необходимого типа литниковой системы: решается проблема определения зоны заполняемости полости литейной формы [1], которая ограничивается максимально возможной скоростью заполнения при отсутствии турбулизации потока и минимально возможной скорости заполнения, которая ограничивается охлаждением фронта потока и возникновением брака «спай». Выбрав оптимальную скорость заполнения, определяем исполняемые размеры литниковой системы.

Для определения правой границы заполняемости полости литейной формы, т. е. оптимально возможной скорости, были проведены работы, которые заключались в заливке экспериментальных блоков, состоящих из пластин различной толщины $\delta = 6, 8, 10$ мм (схема блока представлена на рис. 1). Длина пластин составила $l = 300$ мм, ширина $b = 100$ мм.

Заливка блока производилась из стали марки 35Л, температура заливки составила 1580 °С, разрежение в форме – 50 кПа. Блок после заливки и выбивки представлен на рис. 2.

Загрязненность отливки оценивалась отношением площади газовых включений к площади поверхности пластины, на которой они расположены:

$$Z = S_{г.п}/S_{пл} \quad (1)$$

Опытная отливка с газовыми дефектами на фрезерованной поверхности показана на рис. 3. Результаты по определению степени загрязненности пластин представлены в табл. 1.

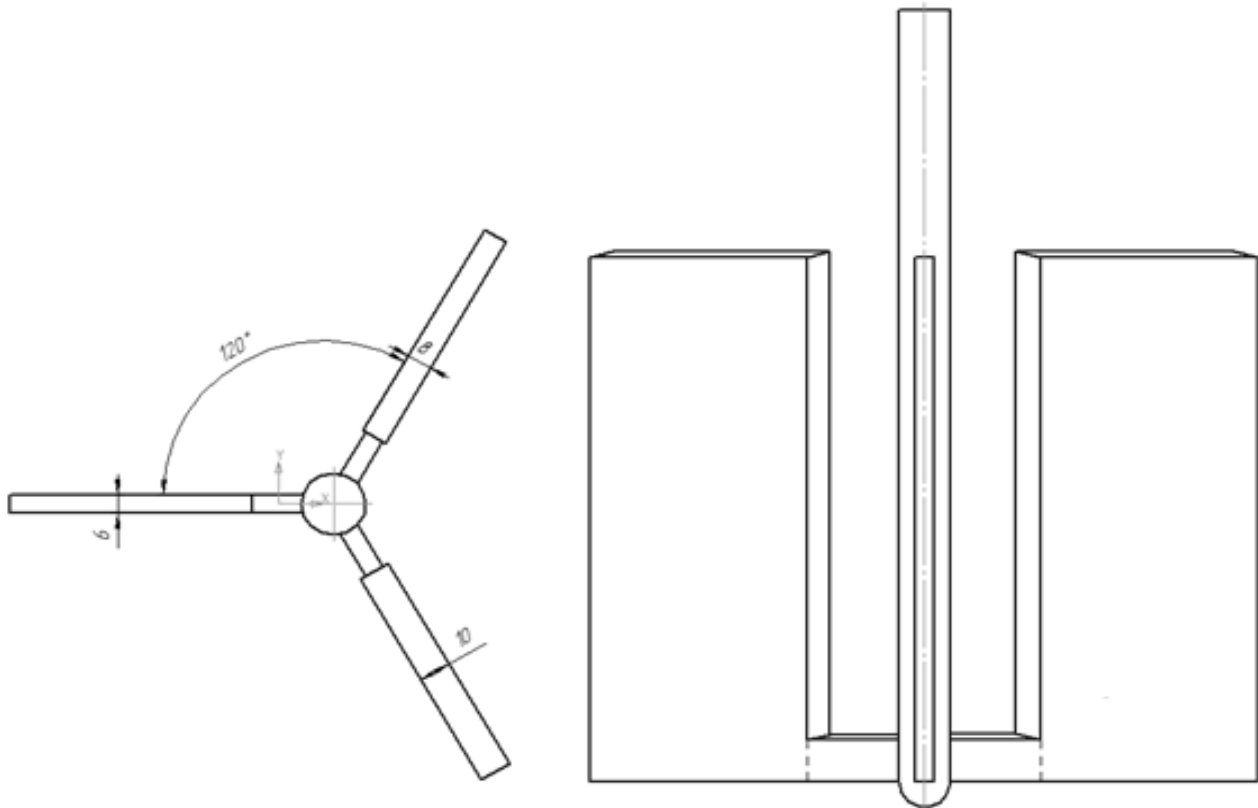


Рис. 1. Схем экспериментального блока



Рис. 2. Залитый блок

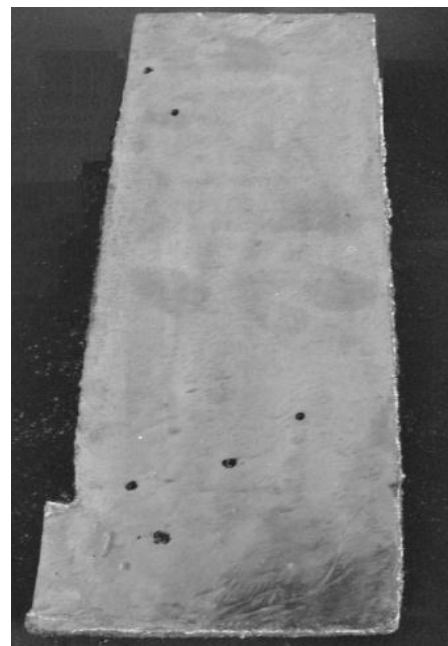


Рис. 3. Пластина с газовыми включениями

Таблица 1

Степень загрязненности пластин газовыми дефектами

Толщина пластины, δ , мм	Скорость заполнения полости формы расплавом, ω , м/с	Степень загрязненности поверхности пластин, Z , %*10 ⁻⁴
6	0,05	0,045
8	0,05	0,110
10	0,05	0,100
6	0,035	0,030
6 (подвод металла с торца)	0,022	0,024

Для определения оптимально допустимого значения скорости заполнения полости формы воспользуемся оценкой турбулентности потока с помощью критерия Рейнольдса по формуле:

$$Re = \frac{\omega \cdot l}{\nu}, \tag{2}$$

где ω – скорость подъема металла в полости литейной формы, м/с; l_0 – приведенный размер отливки ($l_0 = \delta/2$), мм; ν – кинематическая вязкость расплава, м²/с.

Расчетные результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

Значения критерия Рейнольдса для различных пластин

Толщина пластины, δ , мм	Значение критерия Рейнольдса, Re
6	300
8	400
10	500
6	210
6 (подвод металла с торца)	132

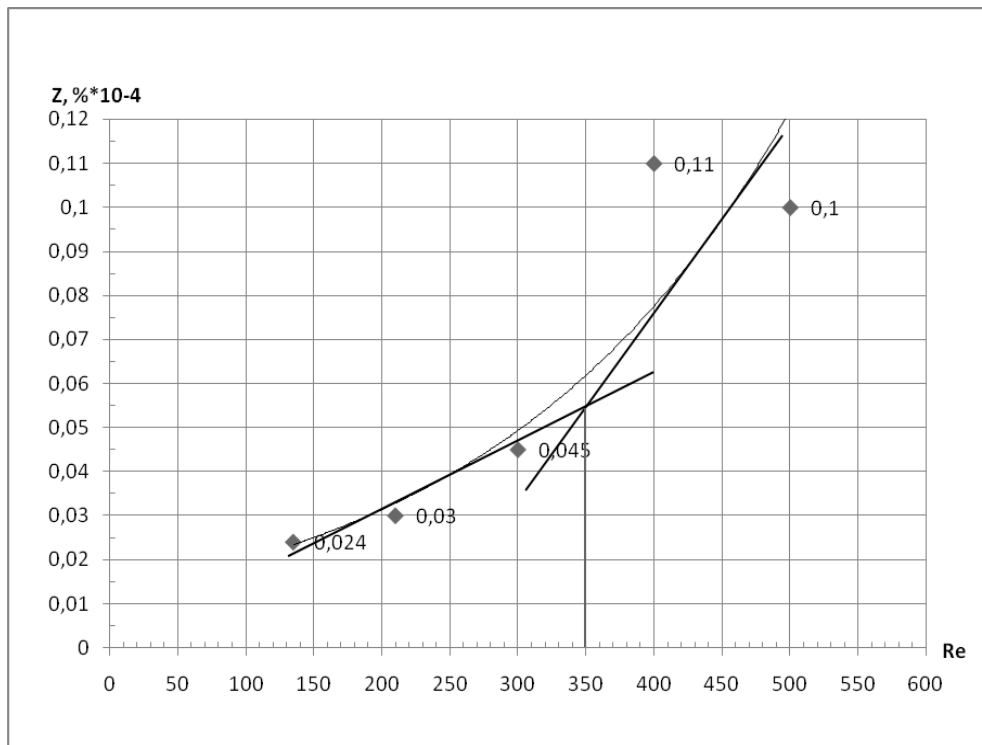


Рис. 4. Зависимость загрязненности пластин газовыми дефектами (Z) от числа Рейнольдса (Re)

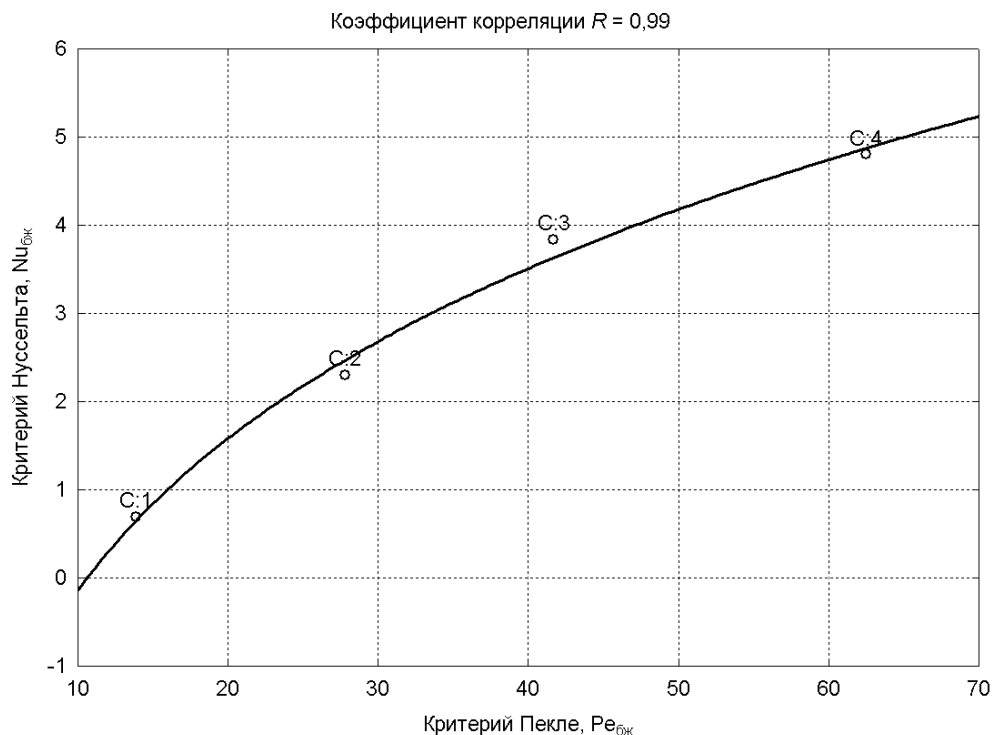


Рис. 5. Зависимость $Nu - Pe$

По результатам экспериментальных данных построена зависимость загрязненности отливок типа «пластина», залитых из стали марки 35Л, газовыми дефектами от числа Рейнольдса (рис. 4) и определено его критическое значение.

Для определения максимальной скорости заполнения необходимо рассчитать приведенные размер полости литейной формы и по критическому значению найти максимально возможную скорость заливки.

Для определения минимально возможной скорости заполнения полости литейной формы воспользуемся ранее полученной математической зависимостью [2]:

$$Nu_{\delta ж} = 9,9 \cdot Pe_{\delta ж}^{0,16} - 14,6; \quad R = 0,99, R^2 = 0,98, Pe_{\delta ж} < 70. \quad (3)$$

График зависимости представлен на рис. 5.

С помощью полученной зависимости определяется минимально возможная скорость заполнения полости формы [3]:

$$\omega = \frac{y}{\frac{c \cdot \rho \cdot l_0}{\alpha} \cdot \left(1 + \frac{b_m}{b_\phi}\right) \cdot \ln \frac{T_{\text{зал}} - T_{\text{ф.н}}}{T_{\text{л}} - T_{\text{ф.н}}}}. \quad (4)$$

Оптимальную скорость заполнения выбираем из области, образованной минимальной и максимальной скоростями, и по ней рассчитываем исполняемые размеры литниковой системы. Если область заполняемости стремится к нулю, то необходимо менять тип литниковой системы.

Библиографический список

1. **Чистяков, В.В.** Методы подобия и размерности в литейной гидравлике / В.В. Чистяков. – М.: Машиностроение, 1990. – 224 с.

2. **Родионова, Н. А.** Охлаждение фронта потока в полости литейной формы при литье по газифицируемым моделям / Н. А. Родионова, В. А. Изотов // Взаимодействие науки и литейно-металлургического производства: материалы IV Всероссийской научно-технической конференции. – Самара, 2012.
3. **Изотов, В. А.** Технология литейной формы. Литье в песчаные формы: учеб. пособие / В. А. Изотов, А. А. Акутин, А. С. Равочкин. – Рыбинск: РГАТА им. П. А. Соловьева, 2011. – 116 с.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

V. A. Izotov, N. A. Rodionova
**THE OPTIMAL MOLD CAVITY FILLING SPEED DEFINITION UNDER THE THIN
WALL STEEL CASTING
BY MOLDING ON INSTALLED GAS MODELS**

Rybinsk state aviation technical university n.a. Solovyov

The dependence of impurity of castings type “plate” depending on Reynolds criterion is submitted. It is provide to choose a maximum possible filling speed. The mathematic dependence of minimum possible filling speed allow getting optimal mold cavity filling speed and calculation executable sizes of gate.

Key words: molding on installed gas models, minimum possible filling speed, maximum possible filling speed, “gas porosity”, critical value of Reynolds criterion.

УДК 621.74:669.018.9

А.А. Панфилов, Е.С. Прусов, В.А. Кечин

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ПРОИЗВОДСТВА И ПРИМЕНЕНИЯ АЛЮМОМАТРИЧНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ СПЛАВОВ

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых

Рассмотрены основные проблемы, возникающие при получении композиционных сплавов в процессах жидкофазного совмещения. Показаны потенциальные сферы применения и перспективы развития алюмоматричных композиционных сплавов.

Ключевые слова: алюмоматричные композиционные сплавы, жидкофазная технология, межфазное взаимодействие.

Создание новых материалов конструкционного и функционального назначения с принципиально новым уровнем свойств является в настоящее время ключевой задачей в развитии таких отраслей, как автомобилестроение, энергомашиностроение, аэрокосмическая и оборонная промышленность, станкостроение, приборостроение и др. В последние годы наблюдается повышение внимания исследователей к разработке и исследованию металломатричных композитов (ММК), применение которых позволяет достичь значительного повышения уровня физико-механических и эксплуатационных свойств и расширения температурно-силовых интервалов работы изделий [1].

По данным BCS Research [2], глобальный рынок ММК оценивался в 4,1 тыс. тонн в 2007 г. и 4,4 тыс. тонн в 2008 г. Ожидаемое повышение объемов мирового производства ММК к 2013 г. должно составить около 5,9 тыс. тонн (рис. 1).



Рис. 1. Динамика развития объемов производства ММК по сегментам применения [2]

По прогнозам Global Industry Analysts (США), мировой рынок ММК превысит 322 млн долл. к 2017 г. Интенсивному росту объемов рынка ММК будут способствовать технологические инновации в сфере производства и механической обработки ММК, падение стоимости продукции и, как следствие, расширение применения ММК в высокотехнологичных отраслях промышленности [3].

Алюминий и сплавы на его основе получили наибольшее распространение в качестве матриц для получения композитов (рис. 2, [4]). Значительный интерес к алюмоматричным композиционным сплавам (АКС) обусловлен их высокой удельной прочностью, малой плотностью, хорошими технологическими свойствами.

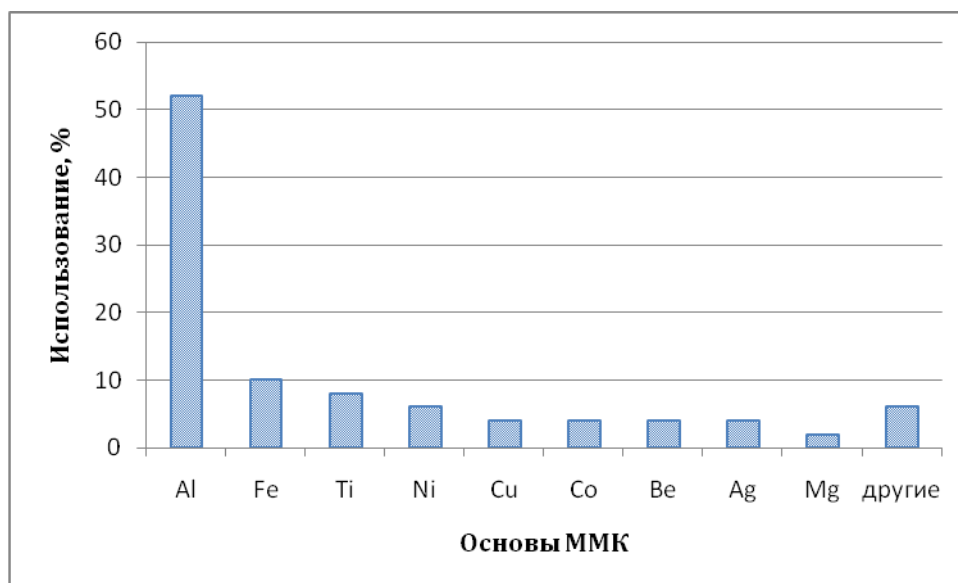


Рис. 2. Использование матричных материалов [4]

Активные исследования в области создания АКС и технологий их получения проводятся научными коллективами и организациями практически всех стран с развитой индустрией и высокой инновационной активностью, в т.ч. США, Германии, Японии, Китая, Индии, России, Украины и др.

Первые работы, направленные на получение литых алюмоматричных композитов, упрочненных частицами, начались в середине 60-х гг. XX в. под руководством проф. П. Рохатжи (США) [5]. Ранние эксперименты в этой области были нацелены на создание композиционных материалов систем Al-графит, Al-SiC и Al-Al₂O₃ механическим замешиванием армирующих частиц в расплав алюминия [6]. Значительный вклад в развитие теории и практики литья композиционных сплавов вносят работы американских ученых М. Флеминга и Р. Мерабяна [7-9], заложившие основы современных представлений о кристаллизации литейных композиций и направленные на получение литых композитов систем Al-графит и Al-Al₂O₃.

В Германии под руководством Р.Ф. Зингера (Университета им. Фридриха-Александра г. Эрланген-Нюрнберг) достигнуты значительные успехи в получении алюмоматричных композиционных сплавов, армированных углеродными нанотрубками [10]. Масштабные исследования композиционных сплавов в Японии проводятся с конца 80-х гг. XX в. при поддержке Министерства международной торговли и индустрии (MITI) [11].

Активные разработки по созданию композиционных сплавов ведутся в Китае. Объем инвестиций на исследования композитов в Китае ежегодно увеличивается, а китайский рынок композитов считается одним из крупнейших и занимает третье место в мире после американского и европейского [12].

Работы в области исследования литейных композитов успешно проводятся в Индийском институте технологий (г. Ропар) под руководством проф. М. Сураппы и направлены на получение дисперсно-упрочненных алюмоматричных композиционных материалов и изучение их трибологического поведения [13, 14].

Литые композиционные сплавы на основе алюминия, армированные дисперсными частицами, активно разрабатываются в Физико-технологическом институте металлов и сплавов

(ФТИМС) НАН Украины под руководством А.А. Щерецкого [15]. Разработаны технологии получения литых композитов с высоким содержанием (до 60 об.%) армирующих частиц графита, SiC и Al₂O₃ методом принудительной вакуумной пропитки и с низким содержанием армирующей фазы (до 5 об.%) лигатурным методом. В ФТИМС также проводятся работы по созданию литых макрогетерогенных композитов на основе медных сплавов под руководством С.С. Затуловского [16].

Существенные успехи в области получения литых композиционных сплавов достигнуты и у нас в стране. Основополагающими работами, послужившими своего рода фундаментом для перехода к разработке и освоению литейных композиционных материалов, следует считать работы по суспензионной разливке, возглавляемые А.А. Рыжиковым и В.А. Ефимовым [17]. Идеи и методы суспензионной разливки находят естественное развитие в исследованиях литейных композиций и особенно важным здесь является накопленный опыт изучения взаимодействия жидкой и твердой фаз, опыт ввода твердых частиц в расплавы и др.

В настоящее время работы по созданию АКС и технологий их производства проводятся в ряде российских вузов и научных организаций, в том числе ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН, НИТУ «МИСиС», ОАО «РУСАЛ ВАМИ», СПбГПУ, СФУ, ВлГУ, СамГТУ и др.

Одними из первых (с 1973 г.) исследования в области теории и технологии получения литейных композиций начали проводить сотрудники Владимирского государственного университета под руководством И.В. Гаврилина [18, 19]. Значительный вклад в развитие материаловедческих основ создания АКС триботехнического назначения и изделий из них вносят работы научного коллектива под руководством Т.А. Чернышовой (ИМЕТ им. А.А. Байкова РАН) [20, 21]. В ОАО «РУСАЛ ВАМИ» под руководством В.Г. Борисова разработаны технологические процессы получения композиционных сплавов на алюминиевой основе методом плазменной инъекции порошковых компонентов в матричные низкотемпературные расплавы [22]. В СамГТУ проводятся исследования по использованию метода самораспространяющегося высокотемпературного синтеза для получения модифицирующих лигатур и композиционных сплавов систем Al-Ti, Al-Ti-B, Al-Ti-C [23].

Можно констатировать, что на сегодняшний момент накоплен значительный объем теоретических и экспериментальных данных по разработке технологий получения и исследованиям свойств и характеристик АКС. Как отмечалось, исследования в этой области проводятся активно во всех развитых странах, в том числе и в России, однако уровень потребления АКС в нашей стране еще не достиг уровня западных стран. Таким образом, российский рынок композиционных сплавов пока находится в начальной стадии становления и развития. Отдельные предприятия производят металломатричные композиты на уровне лабораторных образцов или опытных партий изделий, чего явно недостаточно для решения потенциальных в перспективе проблем импортозамещения продукции из композиционных сплавов.

К настоящему времени на производственном уровне освоены и успешно используются АКС, содержащие в качестве армирующей фазы частицы SiC, Al₂O₃, TiC, TiB₂, B₄C [24]. Выпуском АКС и продукции из них занимаются такие зарубежные компании, как 3M Company, Alcoa Inc., Metal Matrix Cast Composites LLC (США), Aerospace Metal Composites Ltd. (Великобритания), Alloytic Co. Ltd. (Корея), Deutsche Edelstahlwerke GmbH (Германия), Hitachi Metals Ltd. (Япония) и др.

Хорошие триботехнические свойства обуславливают эффективное применение АКС для изготовления деталей, работающих в условиях интенсивного износа и повышенных температур. Применение АКС позволяет снизить массу изделий, повысить ресурс работы и мощности машин и агрегатов, создать принципиально новые узлы, детали и конструкции. Известны примеры успешного использования АКС в узлах трения различного технологического оборудования (металлорежущие станки, кузнечно-прессовое оборудование, компрессоры, насосы высокого давления и др.), автомобильной, дорожно-строительной технике и других областях взамен традиционных антифрикционных сплавов на медной, цинковой или

алюминиевой основе. Типовая номенклатура изделий из АКС для этих применений включает вкладыши, втулки, подшипники скольжения и др.

Актуальной проблемой в двигателестроении является снижение интенсивности износа деталей цилиндропоршневой группы. Один из подходов к решению этой проблемы основан на использовании АКС для изготовления безгильзовых блоков цилиндров, что позволяет, помимо повышения износостойкости, добиться снижения массы двигателя и улучшения условий охлаждения за счет высокой теплопроводности АКС [25]. АКС успешно применяются многими зарубежными автомобилестроительными компаниями для изготовления поршней дизельных и бензиновых двигателей, шатунов, толкателей клапанов и других высоконагруженных деталей.

Имеется положительный опыт применения АКС в тормозных системах автомобилей и железнодорожного транспорта в США и европейских странах. Тормозные диски из дискретно-армированных АКС в настоящее время используются на автомобилях Volkswagen Lupo 3L и Audi A2, а также на скоростных немецких поездах InterCity Express [26]. Как правило, для этих целей используются АКС на базе стандартных сплавов систем Al-Mg и Al-Si с содержанием частиц SiC и Al₂O₃ не менее 20 об.%. Отмечается, что применение тормозных дисков из АКС взамен чугуновых позволяет достичь значительного снижения массы и максимальной температуры нагрева узлов трения.

Как показано в работе [15], одним из перспективных применений АКС является их использование для изготовления скользящих электромеханических контактов. Для подвижных токосъемников городского электротранспорта взамен угольно-графитовых успешно опробованы АКС на основе АК12М2, дискретно-армированного частицами графита.

Известны примеры использования АКС с высокой долей керамических частиц для изготовления теплоотводящих оснований микросхем и корпусов электронных устройств. Ключевыми свойствами при этом являются высокая теплопроводность и низкий коэффициент термического расширения. Так, материал AlGr_p 4-750 фирмы Metal Matrix Cast Composites Inc. имеет теплопроводность ~750 Вт/м·К при коэффициенте термического расширения ~4·10⁻⁶ 1/К в диапазоне от 20 до 150 °С [27]. Учитывая быстрый рост рынка электроники, можно ожидать, что изделия конструкционного назначения из АКС займут в нем достойное место.

Существует значительное число технологических процессов получения композиционных сплавов. По экономическим и качественным показателям, а также по возможности металлургической обработки в процессе приготовления предпочтительными являются жидкофазные методы получения АКС: пропитка расплавами пористых каркасов из порошков; механическое замешивание дискретных частиц в металлические расплавы; процессы, основанные на протекании контролируемых химических реакций высокотемпературного синтеза эндогенных армирующих фаз в матричном расплаве и др.

Основной проблемой при получении композиционных сплавов является обеспечение физико-химической совместимости матрицы и армирующей фазы. Поскольку композиционные сплавы представляют собой гетерофазные системы с развитой сетью внутренних границ раздела фаз, приготовление их сопровождается активным протеканием таких процессов межфазного взаимодействия, как взаимная диффузия и химические реакции между матричным расплавом и армирующими частицами. Для получения качественных сплавов необходимо ограничивать это взаимодействие, исключая возможную деградацию армирующей фазы и, как следствие, снижение эксплуатационных свойств литых изделий.

Известно [28], что необходимым условием формирования прочных адгезионных связей на межфазных границах в процессах получения АКС является смачиваемость армирующих частиц матричным расплавом. Разработан ряд технологических приемов, направленных на улучшение смачиваемости частиц расплавом: нанесение металлофильных покрытий на частицы, легирование матричного сплава поверхностно-активными добавками (Mg, Li), ультразвуковое воздействие на расплав, способы эндогенного армирования и др.

Наряду со смачиваемостью армирующих компонентов матричным расплавом и обеспечением заданного уровня межфазного взаимодействия, важную роль с точки зрения формирования стабильного уровня свойств композиционных сплавов играет равномерность распределения частиц в объеме сплава и готового изделия. Обеспечение этого условия достигается использованием различных вариантов перемешивания расплава (ультразвуковое, электромагнитное, механическое и др.), а также применением индукционной плавки.

Значительное место в технологическом цикле приготовления литейных композиций занимает подготовка матричного расплава. При этом особое внимание следует уделять рафинированию матрицы от растворенных газов [29]. В противном случае, загрязненность матричного расплава водородом может привести к неравномерному распределению и снижению степени усвоения армирующих компонентов. Многие из применяемых порошков могут являться активными геттерами для водорода, растворенного в расплаве, что затрудняет протекание процессов межфазного взаимодействия и приводит к получению некачественных АКС.

Следует отметить, что характер взаимодействия армирующих фаз и физико-химические закономерности формирования структуры и свойств при получении АКС до настоящего времени изучены недостаточно, что зачастую не позволяет обоснованно подойти к выбору армирующих компонентов с точки зрения достижения заданных эксплуатационных свойств литых изделий и сдерживает широкое промышленное внедрение АКС. В этой связи актуальной задачей представляется разработка адекватных термодинамических моделей фазовых равновесий в многокомпонентных композиционных системах с учетом физико-химической природы компонентов.

Для получения отливок из АКС используются такие методы литья, как литье в кокиль, под давлением, жидкая штамповка, центробежное литье. Технологии гравитационной заливки применяются, как правило, для композитов с содержанием дисперсной фазы менее 15 об.%. Поскольку АКС имеют более высокую вязкость по сравнению с традиционными сплавами, во многих случаях предпочтительным является принудительное заполнение литейных форм. Следует также отметить, что наложение давления при получении отливок из композиционных сплавов позволяет практически устранить пористость, неизбежно возникающую при получении АКС механическим замешиванием армирующих частиц в расплав.

Анализ современных тенденций в развитии теории и технологии производства АКС позволяет предположить, что перспективы дальнейшего их совершенствования лежат в следующих основных направлениях:

- наноструктурирование АКС;
- функциональное армирование АКС;
- комплексное армирование АКС;
- переход к высоколегированным матрицам.

Известны работы, показывающие, что одним из способов измельчения структуры АКС до наноуровня является ввод в композиционные расплавы наноразмерных частиц. Как отмечается в работе [30], перспективным вариантом получения наноструктурированных АКС является плазменная инъекция нанопорошков в металлические расплавы в сочетании с одновременным двухплоскостным магнитодинамическим перемешиванием расплава. В работах [31, 32] показано, что введение в композиционный расплав экзогенных наночастиц оказывает модифицирующее влияние на размер и морфологию интерметаллидных армирующих фаз.

Значительный практический интерес представляет получение функционально-армированных (градиентных) композиционных сплавов. В работах [33, 34] для получения литых заготовок с градиентной структурой использован метод центробежного литья, позволяющий за счет регулируемого осаждения частиц в жидкометаллической суспензии обеспечить формирование поверхностной зоны с повышенной концентрацией армирующих частиц.

Большие резервы в достижении и регулировании заданных свойств АКС возможны при осуществлении комплексного армирования матричных сплавов фазами различной при-

роды и размеров, в том числе нанокристаллическими, или формировании микро- и наноразмерных фаз непосредственно при приготовлении АКС в процессах жидкофазного самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Одним из ключевых факторов при получении комплексно-армированных АКС является возможность протекания экзотермических реакций на границе раздела фаз, что предопределяет эффективное введение экзогенных фаз за счет улучшения смачиваемости и создания устойчивой адгезионной связи на межфазных границах. Комплексный подход к созданию АКС, основанный на использовании схемы многоуровневого армирования микро- и наноразмерными фазами эндогенного и экзогенного происхождения, был реализован при разработке составов и технологии приготовления композиционных сплавов на основе систем Al-TiO₂-B(C)-Ti-SiC с использованием высоколегированных матриц [35].

В целом, получение качественных АКС и литых заготовок из них требует комплексного подхода к решению металлургических и технологических задач, в частности, обоснованного выбора матричного сплава и основных армирующих компонентов, их дисперсности и объемного содержания, способов их предварительной обработки, а также технологических приемов и режимов жидкофазного совмещения и др.

Таким образом, развитие производства и применения АКС и изделий из них определяется решением следующих основных проблем [36]:

- достижение стабильных физико-механических и эксплуатационных свойств за счет обеспечения заданного уровня межфазного взаимодействия, смачиваемости армирующих частиц расплавом, равномерного распределения армирующих частиц в объеме расплава и минимизации деградации армирующей фазы;
- предотвращение образования газовой и газоусадочной пористости в отливках из композиционных сплавов;
- разработка рекомендаций по получению АКС с учетом основных литейно-металлургических и технологических факторов, определяющих качество сплава и, соответственно, литых изделий с заданными свойствами;
- снижение стоимости производства за счет совершенствования технологического процесса получения композиционных сплавов и литых заготовок из них;
- развитие научных и технологических основ термообработки АКС для стабилизации структуры и свойств литых изделий;
- совершенствование технологий механической обработки и пластического деформирования АКС на основе исследования закономерностей процессов обработки;
- разработка эффективных технологий переработки и рециклинга АКС.

Библиографический список

1. **Kainer, K.U.** Metal Matrix Composites: Custom-made Materials for Automotive and Aerospace Engineering // Wiley-VCH. 2006. – 330 p.
2. **BBC Research (USA)**; <http://www.bccresearch.com>.
3. **Global Industry Analysts, Inc. (USA)**; <http://www.strategyr.com>.
4. **Adebisi, A.A.** Metal matrix composite brake rotor: historical development and product life cycle analysis // A.A. Adebisi, M.A. Maleque, M.M. Rahman // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering. 2011. Vol. 4. P. 471-480.
5. **Gupta, N.** The solidification processing of metal-matrix composites: The Rohatgi Symposium / N. Gupta, K.G. Satyanarayana // Journal of Materials Science. 2006. Vol. 58. No. 11. P. 91-93.
6. **Badia, F.A.** Dispersion of graphite particles in aluminium castings through injection of the melt / F.A. Badia, P.K. Rohatgi // AFS Trans. 1969. V. 77. – 402 p.
7. **US Patent № 3951651.** Metal composition and methods for preparing liquid-solid alloys for casting and casting methods employing the liquid-solid alloys / R. Mehrabian, M.C. Flemings. Patented 20.04.1976.

8. **Mortensen, A.** Solidification processing of metal-matrix composites / A. Mortensen, J.A. Cornie, M.C. Flemings // *Journal of Metals*. 1988. Vol. 40. No. 2. P. 12-19.
9. **Wannasin, J.** Fabrication of metal matrix composites by a high-pressure centrifugal infiltration process / J. Wannasin, M.C. Flemings // *Journal of Materials Processing Technology*. 2005. Vol. 169, Iss. 2. P. 143-149.
10. **Li, Q.** Fabrication of carbon nanotube reinforced aluminum alloy composites by high pressure die casting. In: *Proceedings of the International Carbon Conference (CARBON 2008)* / Q. Li, C.A. Rottmair, R.F. Singer. – Nagano, Japan. – July 13-18, 2008.
11. **Koczak, M.J.** Inorganic Composite Materials in Japan: Status and Trends / M.J. Koczak, K. Prewo, A. Mortensen, S. Fishman, M.W. Barsoum, R. Gottschall. – *ONR Research Scientific Bull.*, Nov. 1989. – 53 p.
12. **Composites development in China** / *JEC Asia Gazette*. – Iss. #10. – July 6, 2009. P. 1-4.
13. **Pramila Bai B.N.** Dry sliding wear of A356-Al-SiCp composites / B.N. Pramila Bai, B.S. Ramasesh, M.K. Surappa // *Wear*. 1992. Vol. 157, Iss. 2. P. 295-304.
14. **Bauri, R.** Processing and properties of Al-Li-SiCp composites / R. Bauri, M.K. Surappa // *Science and Technology of Advanced Materials*. 2007. Vol. 8, Iss. 6. P. 494-502.
15. **Щерецкий, А.А.** Теоретические и технологические основы получения литых заготовок из композиционных материалов на основе алюминия и циркония с дисперсными частицами: дисс. ... докт. техн. наук. – Киев, 2007. – 453 с.
16. **Затуловский, С.С.** Литые композиционные материалы: монография / С.С. Затуловский, В.Я. Кезик, Р.К. Иванова. – Киев: Тэхника, 1990. – 237 с.
17. **Рыжиков, А.А.** Технологические процессы направленного управления формированием отливом // Суспензионное и композиционное литье. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1988. С. 8-10.
18. **Панфилов, А.В.** Разработка технологии получения изделий литьем композиций с высоким содержанием твердой фазы : дисс. канд. техн. наук. – Горький, 1984. – 180 с.
19. **Гаврилин, И.В.** Разработка теории и технологии композиционного литья: дисс. ... докт. техн. наук. – Владимир, 1991. – 352 с.
20. **Чернышова, Т.А.** Разработка и апробация композиционных материалов систем Al-SiC, Al-TiC в узлах трения нефтедобывающего оборудования / Т.А. Чернышова [и др.] // *Физика и химия обработки материалов*. 2010. №5. С. 78-86.
21. **Чернышова, Т.А.** Реакционное литье и модифицирование алюмоматричных композиционных материалов / Т.А. Чернышова, И.Е. Калашников // *Литейщик России*. 2012. №9. С. 19-22.
22. **Борисов, В.Г.** Разработка технологии плазменного синтеза алюминиевых сплавов композиционного типа // *Металлург*. 2008. №11. С. 102-106.
23. **Луц, А.Р.** Самораспространяющийся высокотемпературный синтез алюминиевых сплавов: монография / А.Р. Луц, А.Г. Макаренко. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2008. – 175 с.
24. **Surappa, M. K.** Aluminium matrix composites: challenges and opportunities // *Sadhana*. 2003. Vol. 28, Parts 1-2. P. 319-334.
25. **Sobczak J.** Współczesne tendencje praktycznego zastosowania kompozytów metalowych // *Kompozyty* 2(2002)3. P. 24-37.
26. **Hunt, W.H., Miracle D.B.** Automotive applications of metal-matrix composites, in: D.B. Miracle, S.L. Donaldson (Ed.), *ASM Handbook*, 2001. Vol. 21: Composites. P. 1029-1032.
27. **Metal Matrix Cast Composites, LLC**; 101 Clematis Av., Waltham, MA 02453 USA; <http://www.mmccinc.com>.
28. **Чернышова, Т.А.** Взаимодействие металлических расплавов с армирующими наполнителями / Т.А. Чернышова [и др.]. – М.: Наука, 1993. – 272 с.
29. **Пат. № 2396365 РФ**, МПК С22В 9/10, С22С 1/06, С22В 21/06. Способ рафинирования алюминиевых сплавов / Панфилов А.В., Бранчуков Д.Н., Прусов Е.С., Скотников Ю.С. – 2009102613/02 ; заявл. 26.01.09 ; опубл. 10.08.2010. – Бюл. № 22. – 6 с.
30. **Косников, Г.А.** О перспективах разработки литейных наноструктурных композиционных алюмоматричных сплавов / Г.А. Косников [и др.] // *Литейщик России*. 2011. № 9. С. 34-40.
31. **Панфилов, А.В.** Синтез, структура и свойства объемных наноструктурированных алюмоматричных композиционных материалов конструкционного назначения / А.В. Панфилов, А.А. Панфилов, А.В. Петрунин // *Нанотехника*. 2007. №3(11). С. 76-81.
32. **Калашников, И.Е.** Развитие методов армирования и модифицирования структуры алюмоматричных композиционных материалов: дисс... докт. техн. наук. – Москва, 2011. – 451 с.

33. Баранок, А.В. Исследование формирования структуры и свойств функционально армированных алюмоматричных композиционных материалов / А.В. Баранок, А.В. Панфилов, Ю.С. Скотников // Литейщик России. 2008. №7. С. 46-50.
34. Алексеева, Ю.С. Технологическое обеспечение и повышение износостойкости втулок из градиентных композиционных материалов: дисс. ... канд. техн. наук. – Москва, 2009. – 147 с.
35. Прусов, Е.С. Исследование свойств литых композиционных сплавов на основе алюминия, армированных эндогенными и экзогенными фазами / Е.С. Прусов, А.А. Панфилов // Металлы. №4. 2011. С. 79-84.
36. Прусов, Е.С. Перспективы применения алюмоматричных композиционных сплавов в машиностроении / Е.С. Прусов [и др.] // Литейщик России. 2012. №9. С. 16-19.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

A.A. Panfilov, E.S. Prusov, V.A. Kechin

PROBLEMS AND PROSPECTS OF DEVELOPMENT OF PRODUCTION AND APPLICATION ALYUMOMATRICHNYKH OF COMPOSITE ALLOYS

Vladimir state university n.a. A.G. and N. G. Stoletovs

Purpose: Analysis of problems and prospects of development of production and application of aluminum matrix composite alloys (AMC).

Design/methodology/approach: The review of foreign and Russian sources in area of AMCs production and application is carried out.

Findings: On the basis of the carried-out review the main problems connected with development of volume of production and application of AMCs are formulated.

Research limitations/implications: Development of composite alloys with the set properties.

Originality/value: On the basis of the analysis of modern achievements in the field of production and application of AMCs the main tendencies in development of the theory and technology of receiving AMCs are specified.

Key words: aluminum matrix composite alloys, liquid-state technology, interphase interaction.

УДК 629.113:011.5

А.А. Филиппов¹, Г.В. Пачурин²**РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ПОДГОТОВКА
ЗАГОТОВОК СТАЛИ 40Х ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ УПРОЧНЕННЫХ БОЛТОВ**ООО «Метмаш»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Разработана и предложена рациональная ресурсосберегающая технологическая схема подготовки проката стали 40Х диаметром 9,65 и 11,7 мм для получения упрочненных длинномерных болтов с низкой обрезной головкой, соответствующих классу прочности 9.8, исключая операции закалки и отпуска изделий. Она заменяет сфероидизирующий отжиг на изотермическую операцию – патентирование, что позволяет снизить трудо- и энергозатраты, повысить экологичность производства и эксплуатационную надежность болтовых изделий без опасности возникновения дефектов резьбы и необходимости их рихтовки. Это дает возможность сократить технологическую цепочку и снизить себестоимость изготовления упрочненных болтов. На разработанную технологию подготовки проката стали 40Х получен патент.

Ключевые слова: прокат, упрочненные болты, прочность, пластичность, структура, стали, закалка, отпуск, патентирование, экологичность, ресурсосбережение.

Введение

Важнейшей задачей развития современного машиностроительного крепежа является улучшение качества металлопродукции и изготавливаемых из нее деталей, повышение их работоспособности, эксплуатационной надежности, с целью доведения эксплуатационных показателей до уровня мировых стандартов, обеспечения конкурентоспособности отечественной продукции как на внутреннем, так и внешнем рынке.

Безопасность конструкции во многом определяется эксплуатационной надежностью составляющих ее элементов. К числу ответственных и широко распространенных в машиностроении деталей относится автомобильный крепеж, изготавливаемый из углеродистой, высокоуглеродистой и легированной проволоки.

Наиболее распространенным и прогрессивным способом получения метизных изделий является метод холодной штамповки высадкой из калиброванного проката (ХОШ). При этом для изготовления высокопрочного крепежа широко используются стали 35, 35Х, 38ХА, 40Х. В качестве альтернативы этим маркам сталей применяют борсодержащие стали 20Г2Р и 30Г1Р [1]. Из-за возможного образования заметного количества оксидов и нитридов бора в борсодержащих сталях, приводящих к снижению прокаливаемости, возникает нестабильность упрочнения закалкой метизов. Фактически стоимость горячекатаного (г/к) проката борсодержащей стали, как правило, на 12-16% выше стоимости стали 40Х, а необходимость у отечественных производителей использовать импортные поставки таких сталей приводит к ещё большему удорожанию производимого крепежа.

На основе анализа состояния поставляемого металлопроката с отечественных и зарубежных металлургических предприятий [2-7], используемого для изготовления различных видов крепежной продукции, закономерностей влияния термической обработки, степени обжатия проката на микроструктуру, его твердость, прочностные и пластические характеристики, рассмотрения основных технологических вариантов подготовки проката для получения крепежных изделий класса прочности 8.8 и выше установлено, что основным способом получения высокопрочного крепежа является высадка из проката после волочения, имеющего микроструктуру «зернистый перлит».

В настоящее время упрочнение болтовых изделий достигается путем их закалки и от-

пуска. Однако термоулучшение длинномерных болтов может привести к их обезуглероживанию, появлению трещин, короблению и, как правило, введение дополнительных операций сортировки и рихтовки. Поэтому исключение операции закалки и отпуска болтов позволит снизить трудо- и энергозатраты, вывести из производственного процесса печи с защитной атмосферой и закалочные проходные печи (соляные ванны). Такая ресурсо- и энергосберегающая технология обеспечит увеличение эффективности производства, снижение выбросов отработанных газов в атмосферу и уменьшение использования солей. Характерно, что в зарубежной промышленности производство высокопрочных крепежных изделий (класс прочности 8.8 и выше) составляет 90% от общего объема крепежа, тогда как в РФ этот показатель не превышает 18%. Низкая доля его применения представляется негативным технико-экономическим показателем как промышленности, производящей эту продукцию, так и промышленности, производящей конструкции, применяющие крепёж.

Решение этой проблемы производства упрочнённого крепежа является актуальной задачей для отечественной промышленности, охватывающей различные отрасли. Одним из приоритетных направлений в решении этой задачи авторы настоящей работы видят в снижении стоимости производимого крепежа за счёт, во-первых, рационализации технологии упрочняющей обработки крепежа, во-вторых, минимизации стоимости стали (относительно борсодержащей стали). Рационализацию упрочняющей обработки авторы связывают с использованием упрочнения, возникающего при термомеханической обработке стали, применяемой с целью получения длинномерных болтов. Предполагается достижение такого же уровня упрочнения, который достигается термическим улучшением болтов, что позволит исключить закалку и отпуск из производственного цикла их изготовления. Этим существенно снижаются не только трудовые, материальные и энергетические затраты в производстве, но и достигается улучшение качества по определённым показателям: устранение коробления поверхности длинномерных болтов, возникающего при закалке, а также повреждений поверхности, связанных с воздействием рабочей среды (газовая атмосфера или закалочные ванны) при нагреве под закалку.

Следует заметить, что предлагаемое техническое решение не исключает полностью термического упрочнения, которое остаётся как предварительная термическая обработка – патентирование, упрочняющий эффект которого усиливается в результате последующего окончательного волочения.

В плане минимизации стоимости стали наиболее предпочтительной представляется сталь 40Х. Данная марка стали стандартизована (ГОСТ 10702-78), она традиционно имеет наибольшее распространение для упрочняемых крепёжных изделий и зарекомендовала себя легко осваиваемой метизным производством любой степени массовости. И, наконец, соответствующее содержание углерода и легирование хромом (достаточно экономное) упрощают реализацию предлагаемого технического решения во всех его технологических компонентах.

Целью работы является разработка ресурсосберегающей термомеханической подготовки стальных заготовок на основе изучения совместного влияния термической (патентирования) и пластической (волочения) обработки на структурное состояние и механические характеристики для дальнейшего получения длинномерных болтов.

Проанализировано состояние поставляемого металлопроката с отечественных и зарубежных металлургических предприятий, используемого для изготовления различных видов крепежной продукции. Представлены литературные и производственные данные по проблемам качества проката до и после волочения для ХОШ крепежа, выявлены факторы, его определяющие. Установлены значимость влияния химического состава, прочностных и пластических характеристик. Проанализированы закономерности влияния термической обработки, степени обжатия проката на микроструктуру, его твердость, прочностные и пластические характеристики. Рассмотрены основные технологические варианты подготовки проката для получения крепежных изделий класса прочности 8.8 и выше.

Основным способом получения упрочненного крепежа является высадка из проката

после волочения, имеющего микроструктуру «зернистый перлит». После ХОШ его подвергают закалке и отпуску. После закалки на крепеже могут образоваться микротрещины и обезуглероженный слой. Если вопрос подготовки проката с микроструктурой 80-100% зернистого перлита изучен достаточно глубоко, то из-за роста сопротивления пластической деформации прокату, имеющему структуру «сорбит патентирования», уделяется недостаточное внимание. Общим недостатком термически обработанного проката в действующих технологиях является локальная неоднородность механических свойств, наблюдающаяся на соседних участках проката небольшой протяженности и по всей длине мотка. Поэтому требует исследования вопрос получения проката с равномерными механическими характеристиками по длине мотка для изготовления упрочненных длинномерных болтов с требованиями ГОСТ Р 52643-2006 «Болты и гайки высокопрочные и шайбы для металлических конструкций» без последующей их закалки и отпуска.

Методика

Методика подготовки образцов и проведения испытаний включала обоснование и принцип выбора исходного структурного состояния, видов и режимов технологической обработки образцов. Для изготовления образцов был выделен моток г/к проката стали 40Х, разделенный на части, из которых изготавливались серии образцов с различным структурным и деформированным состоянием. Исследовались образцы двух типов.

I тип – недеформированные образцы г/к проката, находящиеся в разных структурных состояниях, соответствующих технологическому процессу изготовления проката: 1) с формой пластинчатого перлита, характерной для г/к проката, поставляемого с металлургических заводов; 2) с разной формой перлита (зернистого и пластинчатого перлита), характерной для процессов отжига г/к проката в камерных газовых печах отжига (металла).

II тип – образцы проката, подвергнутые волочению с деформацией 5-60% до и после патентирования. Половина образцов проката после волочения подвергалась патентированию, другая половина образцов после патентирования – волочению. Важным фактором, формирующим окончательную микроструктуру, является гомогенность аустенита. Исходя из этого, температура нагрева перед патентированием принималась 880°C. Образцы проката подвергались нагреву в соляной ванне (78% BaCl + 22% NaCl) в течение 3 мин. Затем образцы переносились в селитровую ванну (50% NaNO₃ + 50% KNO₃) и осуществлялась операция патентирования при температурах 370, 400, 425, 450, 500, 550°C с выдержкой 5 мин. Далее охлаждение образцов проводилось на воздухе в течение двух минут, затем они охлаждались в воде. Точность регулирования температуры в ванне при патентировании составляла ±5°C. Волочение проката осуществлялось на однократном волочильном стане с обжатиями 5, 10, 20, 30, 40, 60%. Прочностные (σ_b , $\sigma_{0,2}$) и пластические (Ψ , δ) характеристики, твердость стали изучались по двум вариантам. Вариант 1: волочение с деформацией 5, 10, 20, 30, 40, 60% и последующее патентирование при температурах 370, 400, 425, 450, 500, 550°C. Вариант 2: патентирование при температурах 370, 400, 425, 450, 500, 550 °C и последующее волочение с деформацией 5, 10, 20, 30, 40, 60%.

Математическое планирование экспериментов и статистический анализ их результатов проводились в соответствии с рекомендациями ГОСТ 23026-78. На каждую экспериментальную точку обрабатывалось одновременно по 8 образцов для металлографических и механических исследований и твердости.

Изучение микроструктуры проводили на оптическом микроскопе НЕОРНОТ при увеличениях $\times 200$ -600. Наблюдение изменения микроструктуры протравленной поверхности образца осуществлялось после технологических операций обработки проката. Фотографирование изломов болтов проводилось с помощью оптического компаратора МИР-12 с увеличением $\times 7$. Идентификация химического состава стали осуществлялась на спектроанализаторе Beleskompakt Lab. Величина обезуглероженного слоя определялась на микроскопе «МИМ-6» при увеличении $\times 100$. Использовались поперечные микрошлифы.

Для оценки прочностных и пластических характеристик проводились следующие виды испытаний:

1. На растяжение с определением σ_b , $\sigma_{0,2}$, Ψ , δ в соответствии с ГОСТ 1497-84 на машине ЦДМ-100, шкала 20 кг. Испытывались образцы длиной 300 мм, полученные данные усреднялись.

2. Твердость измерялась на приборе Роквелл, шкала С, на параллельных шлифованных лысках. Полученные данные усреднялись. Твердость HRC по переводной шкале переводилась в твердость HB.

3. Натурные испытания болтов с определением величины разрывной нагрузки производились на машине МУП-50. Изучался вид излома болтов с помощью оптического компаратора МИР-12 и фотографирования (увеличение $\times 7$).

4. Осадка проводилась на одном образце из исследуемой партии. Испытания на осадку производили согласно ГОСТ 10702-78 осаживанием на 50 и 66 % от первоначальной высоты образца. Качество поверхности оценивалось визуально без применения увеличительных приборов, а также с помощью бинокулярного микроскопа ($\times 6$ и $\times 8$).

Проводился также расчет кривой охлаждения прутка в селитровой ванне с заданной температурой и расчет структурно-энергетических комплексов разрушения синергетики проката в исследованных структурных состояниях.

Результаты экспериментов и их анализ

На основе анализа кривых изотермического превращения аустенита и кривых охлаждения стали 40X установлено, что при нагреве (880°C) и охлаждении (выдержке) проката стали 40X в селитровой ванне в интервале температур от 400 до 550°C в течение 5 мин аустенит распадается на смесь тонкопластинчатого строения разной дисперсности – «сорбит патентирования».

Изучение состояния г/к проката, поступившего с метизных заводов, химического состава, исходной структуры (рис. 1), механических характеристик, а также влияние обжатия г/к проката при волочении на прочностные, пластические характеристики и твердость, показало, что с увеличением обжатия г/к проката методом волочения от 5 до 60% предел прочности и текучести увеличиваются с 890 до 1138 МПа и с 780 до 985 МПа соответственно, но снижаются относительное сужение (с 60 до 38%) и относительное удлинение (с 15 до 10%) [8-13], что согласуется с опубликованными в литературе результатами на других марках сталей.

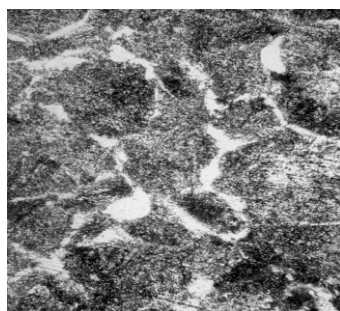


Рис. 1. Микроструктура г/к проката стали 40X

На основании изучения влияния деформации при волочении проката и последующего патентирования при температурах 370, 400, 425, 450, 500, 550°C на прочностные и пластические характеристики, выявлено, что с увеличением степени деформации от 5 до 60% и последующем патентировании при температуре 400°C прочностные характеристики проката изменяются немонотонно. При этом предел текучести увеличивается с 690 до 780 МПа, а предел прочности с 910 до 1040 МПа. Выявлено, что кратковременный нагрев (3 мин) при

температуре 880°C не снимает наклёп полностью. Данные результатов показывают, что с увеличением обжатия от 5 до 60% при температуре патентирования 400°C пластические характеристики изменяются незначительно и остаются на достаточно высоком уровне ($\psi=52-58\%$; $\delta=15-16\%$). Твердость образца при температуре патентирования 400°C находится в пределах от 27 до 28 HRC. Если патентирование является окончательной операций, то подготовленный по указанным схемам прокат не рекомендуется запускать для изготовления болтов методом холодной высадки: в этом случае на поверхности проката образуются оксидная пленка и солевой налет, не позволяющие качественно провести технологическую операцию в высокоточном инструменте высадочного автомата.

Изучение влияния патентирования при разных температурах на механические характеристики проката, который подвергся окончательному волочению с разными обжатиями, выявил, что при температуре патентирования 400°C и волочении с обжатиями от 5 до 60% увеличиваются прочностные (σ_b , $\sigma_{0,2}$) и снижаются пластические характеристики (Ψ , δ) проката (рис. 2).

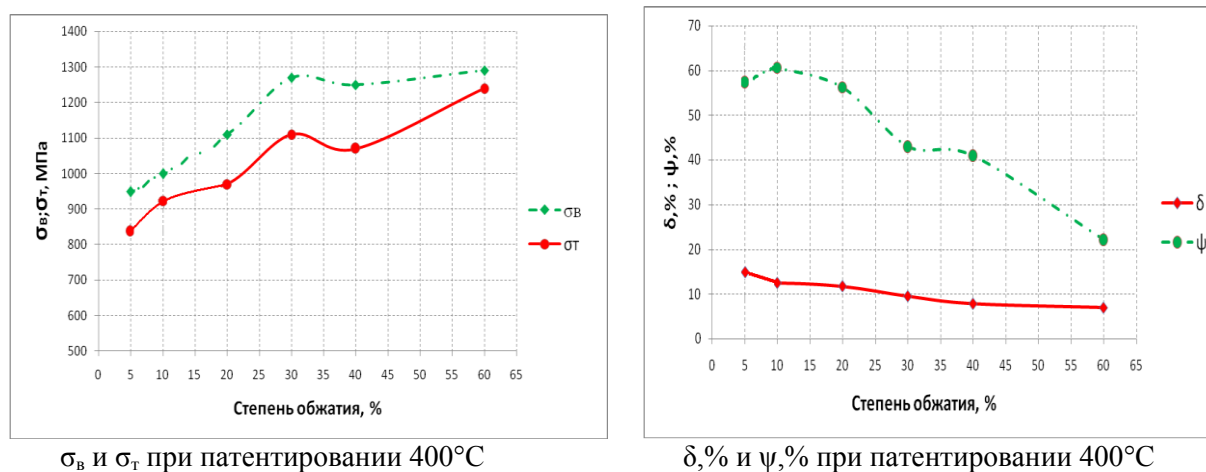


Рис. 2. Зависимость прочностных и пластических характеристик от патентирования и степени обжатия стали 40X

На рис. 3 показано влияние температуры патентирования 400°C и волочения на твердость проката.

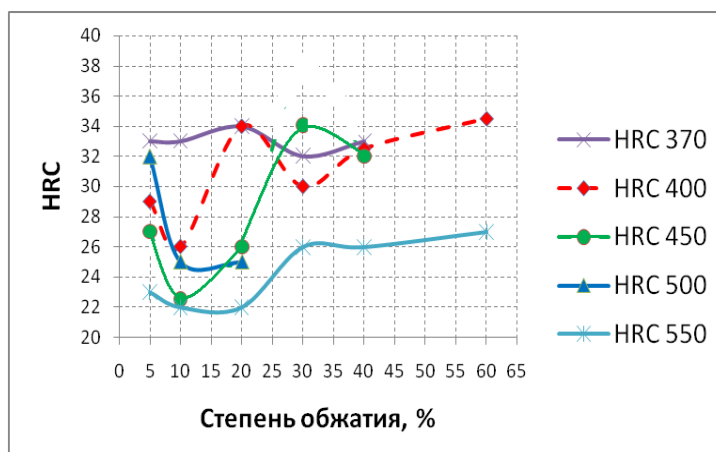


Рис. 3. Зависимость твердости от степени обжатия при разных температурах патентирования

Твердость проката 40X возрастает с увеличением обжата. Рациональная твердость для изготовления длинномерных болтов получена с обжатием от 5 до 10% и равна 28-29 HRC.

Микроструктура г/к проката представляет собой перлит сорбитообразный + феррит в виде разорванной сетки по границам перлитных зерен. В структуре отсутствуют полосчатость и структурно-свободный цементит на границах зерен в виде скоплений или сетки. В микроструктуре не встречается видманштеттовский феррит.

При волочении и последующем патентировании проката при температуре 370°C образуется структура «троостит», обладающая высокими прочностными характеристиками ($\sigma_b=1100$ МПа), но недостаточной пластичностью ($\Psi=33\%$) и высокой твердостью (35 HRC). Микроструктура «троостит» не рекомендуется для проката при изготовлении длинномерных болтов методом ХОШ. При температуре патентирования 500°C микроструктура стали 40X - «сорбит с участками мартенсита». Такая микроструктура не рекомендуется для ХОШ из-за наличия в ней включений твердого и хрупкого мартенсита.

После патентирования проката при 400, 425, 450, 550°C образуется структура «сорбит патентирования» (рис.4), разной дисперсности и, соответственно, разной твердости. Дисперсность тем выше, чем ниже температура патентирования, то есть температурный интервал превращения аустенита. Твердость (проката) тем выше, чем выше дисперсность структур.

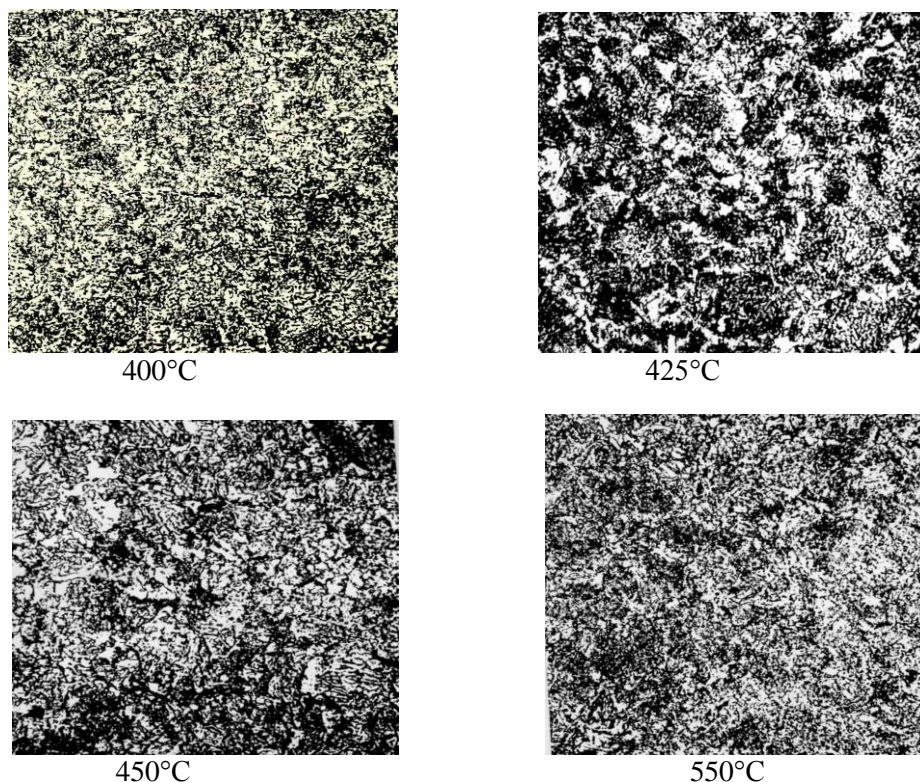


Рис.4. Микроструктура «сорбит патентирования» после волочения и патентирования проката (x500)

Ресурсосберегающая подготовка проката

Анализ полученных результатов позволил разработать ресурсосберегающую схему термомеханической подготовки проката для изготовления упрочненных длинномерных болтов (патент на изобретение №2380432) [14-16]. В результате получены требуемые механические характеристики проката и болтовых изделий из стали 40X без дальнейшей их закалки и отпуска.

Предлагаемая технологическая схема подготовки проката включает в себя следующие этапы:

- 1) отжиг г/к проката: температура нагрева 7700С, выдержка 3 ч, охлаждение до температуры 7000°С, выдержка 3 ч, охлаждение с печью;
- 2) подготовка поверхности проката к волочению;
- 3) волочение с деформацией 15% (с диаметра 13,0 мм на 11,95 мм);
- 4) нагрев проката при температуре 8800°С, патентирование при температуре 4000°С выдержкой 5 мин, охлаждение на воздухе;
- 5) подготовка поверхности проката с фосфатированием;
- 6) окончательное волочение с обжатием 5% (с диаметра 11,95 мм на 11,65 мм);
- 7) формообразование упрочненных длинномерных болтов (М12х110 мм).

Сравнительные схемы подготовки проката по действующей и предлагаемой технологиям изготовления болтовых изделий показаны на рис. 5.

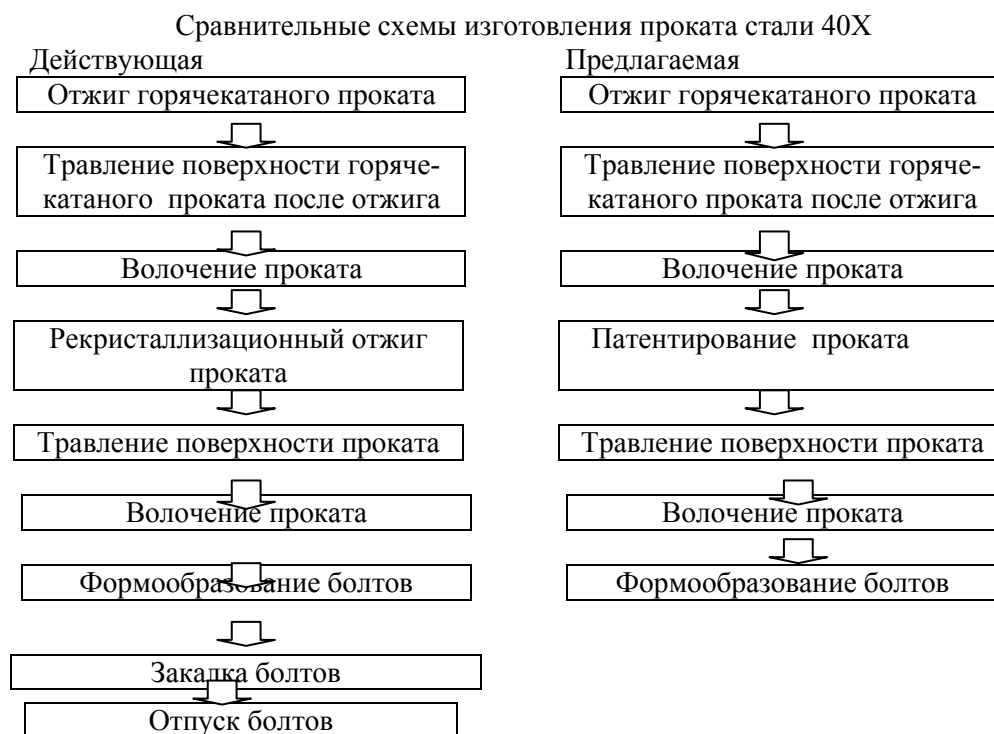


Рис. 5. Сравнение схем предложенного варианта с действующим на производстве

В табл. 1 представлены результаты механических испытаний проката, подготовленного для высадки болтов по действующей (вариант 1) и предложенной (вариант 2) схемами.

По действующей технологии (вариант 1) из проката изготавливается крепеж методом ХОШ с последующей его закалкой и отпуском. При этом в результате закалки в длинномерных изделиях могут возникать деформации, трещины и обезуглероживание поверхности, что снижает качество болтов и повышает их отбраковку.

По предложенной технологии (вариант 2) из проката методом ХОШ изготовлены упрочненные длинномерные болты М12х110 и М10х95 с низкой обрезной головой и проведено их статическое испытание. Испытания болтов М12х110 мм и М10х95 мм проводились в соответствии ГОСТ 1759.4-87. Результаты испытания болтов представлены в табл. 2.

Таблица 1

Механические характеристики проката по разным вариантам с требованиями ГОСТ 10702-78

Диаметр проката, мм	Вариант подготовки	Механические свойства				Твердость HRC
		σ_b	$\sigma_{0,2}$	δ	Ψ	
		МПа		%		
Ø 9,65	1	815	695	13	57	23
Ø 9,65	2	950	830	13	54	29
Ø 10,7	1	805	690	14	56	23
Ø 10,7	2	940	825	12,5	55	29
Ø 9,65; Ø 10,7	ГОСТ 10702-78	Не менее 690	Не регламентируется	Не менее 5	Не менее 40	Факультативная

Таблица 2

Результаты испытаний болтов из стали 40X на разрыв

Вид болта	Кол-во болтов, шт.	σ_b , МПа	Ψ , %	δ , %	НВ	Вид излома
M10x95мм	15	1050	44,5	10,7	286	Волокнистый
M12x110мм	15	1020	45,3	11,3	285	Волокнистый

По действующей технологии (вариант 1) из проката изготавливается крепеж методом ХОШ с последующей его закалкой и отпуском. При этом в результате закалки в длинномерных изделиях могут возникать деформации, трещины и обезуглероживание поверхности, что снижает качество болтов и повышает их отбраковку. По предложенной технологии (вариант 2) из проката методом ХОШ изготовлены упрочненные длинномерные болты M12x110 и M10x95 с низкой обрезной головой и проведено их статическое испытание. Испытания болтов M12x110 мм и M10x95 мм проводились в соответствии ГОСТ 1759.4-87.

Упрочненные длинномерные болты M12x110 мм и M10x95 мм с короткой обрезной головой, изготовленные из проката с микроструктурой «сорбита патентирования» и упрочненные пластической деформацией в процессе редуцирования и накатки резьбы обладают комплексом прочностных и пластических характеристик, соответствующих классу прочности 9.8 крепежа согласно ГОСТ Р 52643-2006.

Таким образом, предлагаемая технологическая схема подготовки является ресурсосберегающей, так как исключаются операции закалки и отпуска изделий. Затраты по закалке и отпуску готовых метизов составляют более 9,5% себестоимости, т.е. это позволяет снизить трудо- и энергозатраты. Отсутствие закалки и отпуска длинномерных изделий позволяет избежать обезуглероживания поверхности, коробления и трещин и, как следствие, повышает качество длинномерных болтов, исключает операцию отбраковки и рихтовки. Предлагаемая технологическая схема термомеханической подготовки проката является также экологичной, так как отсутствие закалки и отпуска позволяет исключить из производственного процесса газовые (электрические) проходные печи или селитровые ванны. Это обеспечит снижение выбросов отработанных газов в атмосферу и снизит использование солей в производстве.

Выводы

Установлено, что оптимальное сочетание механических характеристик после патентирования стали 40X (высокая прочность и незначительное сопротивление пластической деформации) достигается при степенях обжатия 5-10%. Последующее увеличение степени их обжатия до 60% приводит к непрерывному росту предела прочности и предела текучести и снижению показателей относительного сужения и относительного удлинения.

Микроструктура после патентирования проката при температуре 500°C представляет собой «сорбит с участками мартенсита». Патентирование при температуре 500°C и волочение проката со степенями обжатия 30, 40 и 60 %, приводит к потере пластичности и разрушению образца при волочении вследствие образования внутренних трещин. Поэтому данная микроструктура не рекомендуется для изготовления метизов методом пластического деформирования. Патентирование при температурах 400 и 425°C проката стали 40X, подвергнутого деформации волочением со степенями обжатия 5 и 10% повышает прочностные и пластические характеристики, поэтому он может быть рекомендован для подготовки проката под ХОШ упрочненных длинномерных болтов без закалки и отпуска.

Выявлено, что определяющим фактором повышения прочности готового крепежа является использование проката повышенной прочности, механические характеристики которого сформированы на этапах технологического передела из г/к проката. Патентирование г/к проката стали 40X при температурах 400 и 425°C приводит к повышению предела прочности на 190-230 МПа, при небольшом снижении (1–4%) характеристик δ и ψ . Подобная термическая операция с г/к прокатом при температуре 500°C привела к еще большему повышению предела прочности на 370 МПа и снижению пластичности.

Разработана и предложена рациональная технологическая схема подготовки проката стали 40X диаметром 9,65 и 11,7 мм для получения упрочненных длинномерных болтов с низкой обрезной головкой, соответствующих классу прочности 9.8, исключая операции закалки и отпуска изделий. Она заменяет сфероидизирующий отжиг на изотермическую операцию – патентирование, что позволяет снизить трудо- и энергозатраты, повысить экологичность производства и эксплуатационную надежность болтовых изделий без опасности возникновения дефектов резьбы и необходимости их рихтовки. Это дает возможность сократить технологическую цепочку и снизить себестоимость изготовления болтов. На разработанную технологию подготовки проката стали 40X для изготовления упрочненных длинномерных болтов получен патент на изобретение №2380432.

Библиографический список

1. **Филиппов, А.А.** Технология подготовки калиброванного проката стали 38ХГНМ под холодную объемную штамповку / А.А. Филиппов, О.В. Власов, Г.В. Пачурин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2010. №4. С. 40-43.
2. **Филиппов, А.А.** Повышение качества поверхности стального проката под калибровку перед высадкой крепежных изделий / А.А. Филиппов [и др.] // Заготовительные производства в машиностроении. 2007. №3. С. 51-53.
3. **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.
4. **Филиппов, А.А.** Анализ дефектности горячекатаного проката для холодной высадки метизов / А.А. Филиппов [и др.] // Фундаментальные исследования, 2006. №4. С. 38-39.
5. **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.
6. **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.
7. **Пачурин, Г.В.** Выбор рациональных значений степени обжатия горячекатаной стали 40X перед холодной высадкой метизов / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 23- 25.
8. **Пачурин, Г.В.** Ресурсосберегающая и экологичная обработка поверхности металлопроката перед холодной высадкой / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Экология и промышленность России. 2008, август. С. 2-4.

9. **Филиппов, А.А.** Разработка конкурентоспособных технологий подготовки хромистых сталей под холодную высадку высокопрочных крепежных изделий / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 10. С. 28-32.
10. **Филиппов, А.А.** К вопросу термической обработки стали 40X при подготовке калиброванного проката под холодную высадку крепежа / А.А. Филиппов, К.Г. Пачурин, Г.В. Пачурин // Тяжелое машиностроение. 2008. №12. С. 19-21.
11. **Филиппов, А.А.** Выбор температуры изотермической закалки перед калибровкой проката стали 40X / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2007. №10. С. 33-35.
12. **Филиппов, А.А.** Температура изотермической закалки калиброванного проката из стали 40X под холодную высадку / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Заготовительные производства в машиностроении, 2007. №10. С. 44-46.
13. **Пачурин, Г.В.** Выбор рациональных значений степени обжатия горячекатаной стали 40X перед холодной высадкой метизов / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Известия вузов. Черная металлургия. 2008. № 7. С. 23-25.
14. **Филиппов, А.А.** Термическая подготовка калиброванного проката из стали 40X к холодной высадке высокопрочных крепежных изделий / А.А. Филиппов, Г.В. Пачурин // Метизы. 2010. № 01(22). С. 56-57.
15. **Пачурин Г.В., Филиппов А.А.** Экономичная технология подготовки стали 40X к холодной высадке крепежных изделий / Г.В. Пачурин, А.А. Филиппов // Вестник машиностроения. 2008. № 7. С. 53-56.
16. **Филиппов А.А., Пачурин Г.В.** Патент на изобретение «Способ обработки горячекатаного проката под высадку болтов», Патент RU 2380432 C1 C21D 8/06. 2008151317/02; Заявл. 23.12.2008; Опубл. 27.01.2010. Бюл. № 3.

*Дата поступления
в редакцию 05.02.2013*

AA Filippov¹, GV Pachurin²

RESOURCE TRAINING BLANKS FOR STEEL HARDENING 40X BOLT

Limited liability “Metmash”¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²

Developed and offered a rational resource-saving technological scheme of the preparation of rolled steel 40X diameter of 9.65 and 11.7 mm for hardened bolts long, low-cut head of the class strength of 9.8, which excludes the operation of hardening and tempering products. It replaces the spheroidizing isothermal annealing operation - patenting, thereby reducing labor and energy costs, increase production and environmental reliability of bolted products without the risk of defects and the need to thread their straightening. This makes it possible to reduce the production chain and reduce the cost of manufacturing hardened bolts. In the developed technology training rolled steel 40X received a patent.

Key words: rolling, hardened bolts, strength, ductility, structure, steel, hardening, tempering, patenting, ecological, resource.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 661.242.8:669.334.43:669.536.22

А.А. Перетрутов, Н.В. Ксандров, Т.Б. Гагарина, М.Н. Чубенко, П.П. Ким

ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ АММИАЧНО-АММОНИЙНОГО ИЗВЛЕЧЕНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ЦИНКА И МЕДИ ИЗ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ

Дзержинский политехнический институт (филиал НГТУ)

Извлечение цинка и меди аммиачно-аммонийными растворами охарактеризовано термодинамическими расчетами изобарно-изотермического потенциала химических реакций образования аммиакатов. Для нахождения кинетических параметров принята модель дисперсной системы с неизменяющейся внутренней поверхностью и концентрацией ионов цинка и меди в частицах зерна пиритного огарка. Рассчитаны константы скорости, энергии активации процессов, коэффициенты регрессионных уравнений, характеризующих степени извлечения цинка и меди. Найдены оптимальные параметры выщелачивания тяжелых цветных металлов из огарка.

Ключевые слова: Огарок пиритный, аммиак водный, аммония хлорид, энергия Гиббса, степень выщелачивания, константа скорости, уравнения регрессии.

Пиритный огарок в отвалах – отход производства серной кислоты из колчедана, представляет техногенную опасность для окружающей среды [1]. В то же время пиритный огарок является ценным вторичным сырьем для черной и цветной металлургии, красного пигмента, источником цинка, меди и благородных металлов. Наиболее привлекательным способом удаления тяжелых цветных металлов из огарка является аммиачно-аммонийное выщелачивание, позволяющее извлекать цинк и медь селективно от железа. Извлечение растворимой части из твердой смеси с помощью растворителя относится к типовым процессам неорганической технологии и называется выщелачиванием или экстрагированием в системе твердое тело – жидкость [2, 3, 4]. Ему свойственны закономерности растворения физического и химического. Способность к растворению определяется величиной энергии Гиббса ΔG^0 (1):

$$\Delta G^0_{\tau} = \Delta H^0_{298} - T \Delta S^0_{298}, \quad (1)$$

где ΔH^0 – интегральная теплота растворения, определяемая разностью теплоты растворения при бесконечном разбавлении и теплоты растворения при образовании насыщенного раствора; ΔS^0 – изменение энтропии в тех же условиях.

При отрицательных значениях величины энергии Гиббса вещество способно растворяться, при положительных – нет. При достижении концентрации насыщения между твердым веществом и раствором устанавливается равновесие. Концентрация насыщения указывает на емкость растворителя и влияет на скорость растворения. Скорость физического растворения пропорциональна ненасыщенности раствора ($C_0 - C$), где C_0 – концентрация насыщенного раствора при данной температуре, C – фактическая концентрация растворяемого вещества в жидкой фазе.

Для химического растворения условием перехода вещества из твердой фазы в жидкую

является отрицательная величина энергии Гиббса химической реакции (2), протекающей при этом [5]

$$\Delta G^0_T = \Delta H^0_{298} - T \Delta S^0_{298} + \int_{T_{298}}^T \Delta C_p dT - \int_{T_{298}}^T (\Delta C_p/T) dT, \quad (2)$$

где ΔC_p – изменение изобарной теплоемкости в ходе реакции.

При аммиачном растворении, например, оксида меди, предположительно взаимодействие по следующей схеме (3):



Способностью к растворению в данном случае будет способность образовывать аммиачный комплекс. Расчеты показали, что энергия Гиббса реакции (3) имеет положительное значение 46,80 кДж/моль, следовательно, возможность растворения оксида меди в водном растворе аммиака при обычных условиях затруднена. Аналогично рассчитанная при стандартных условиях ΔG^0 для растворения оксида цинка в водном аммиаке составляет +45,01 кДж/моль. При температуре, превышающей стандартные условия, положительные значения энергии Гиббса возрастают: 323 К соответствует +54,66 кДж/моль, а для 353К +63,64 кДж на моль CuO и +52,04 кДж/моль и $\Delta G^0_{353} = +60,56$ кДж/моль ZnO.

Из приведенных расчетов следует, что повышение температуры при давлении, равном атмосферному, не может увеличить растворимость оксидов цветных металлов в аммиачной воде, наоборот, следует ожидать уменьшения растворимости.

При протекании процесса извлечения цветного металла последовательно от гидратации оксида металла к образованию гидроксида металла и к химическому взаимодействию с водным раствором аммиака, энергия Гиббса растворения гидроксида меди составляет +39,58 кДж/моль; гидроксида цинка +41,70 кДж/моль. Из расчетов следует, что основная энергия затрачивается на стадии взаимодействия гидроксидов с аммиаком в обоих случаях, поэтому стадия перехода оксида металла в гидроксид не является лимитирующей.

Растворимость аммиачного комплекса зависит не только от растворимости гидроксида металла-комплексобразователя в воде, но и от диссоциации гидрата аммиака на аммиак и воду, гидролиза гидрата аммиака и нестойкости аммиаката (4) [6].

$$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+} = \frac{L_p \cdot K_o^4 [\text{NH}_3(\text{aq})]^4}{K_n [(OH)^-]^2}. \quad (4)$$

Из приведенной формулы следует, что понижение активной концентрации гидроксид-ионов увеличивает растворимость гидроксида металла-комплексобразователя в аммиачном растворе. Наиболее эффективным способом снизить концентрацию гидроксид-иона в аммиачном растворе является введение в раствор аммонийной соли. В результате буферного действия иона аммония увеличивается ионная сила раствора. Активная концентрация ионов гидроксида при этом обратно пропорциональна активной концентрации иона аммония, а концентрация аммиаката тяжелого цветного металла пропорциональна концентрации гидрата аммиака во второй степени и концентрации иона аммония тоже во второй степени по схеме химического растворения в этом случае (5):



Активная концентрация ионов гидроксида при этом связана с активной концентрацией иона аммония через константу гидролиза $K_{\text{гидр}}$ соотношением (6):

$$[OH]^- = K_{\text{гидр}} \frac{[\text{NH}_3(\text{aq})]}{[\text{NH}_4]^+}. \quad (6)$$

При подставлении этого выражения в формулу (4) получается расчетное уравнение количества аммиаката в растворе (7):

$$[\text{Zn}(\text{NH}_3)_4]^{2+} = \frac{L_p \cdot K_o^4}{K_n \cdot K_{\text{гидр}}^2} [\text{NH}_3(\text{aq})]^2 \cdot [\text{NH}_4^+]^2 \quad (7)$$

При расчете растворимости аммиакатов цинка и меди в зависимости от температуры, концентрации аммиака и хлорида аммония было установлено, что произведение растворимо-

сти гидроксида металла и константа нестойкости аммиачного комплекса уменьшаются с увеличением температуры, а константа гидролиза и константа диссоциации гидрата аммиака возрастают. Указанные изменения параметров приводят к снижению теоретической растворимости аммиаков цинка и меди.

Справочные данные зависимости произведения растворимости, константы нестойкости, константы гидролиза и константы диссоциации от температуры [7] были аппроксимированы. В результате аппроксимации температурных зависимостей приведенных констант получены выражения (8) и уравнение для расчета растворимости аммиаков цинка от концентрации и температуры отличающейся от стандартной (9):

$$L_p = 8 \cdot 10^{-2} \cdot e^{-0,1219 \cdot T}, K_d = 0,4393 \cdot 10^{-5} \cdot e^{0,0046 \cdot T}, K_H = 72,176 \cdot 10^{-10} \cdot e^{-0,01 \cdot T}, K_{гидр} = 4,5 \cdot 10^{-25} \cdot e^{0,0705 \cdot T}. \quad (8)$$

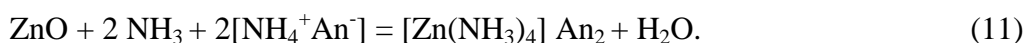
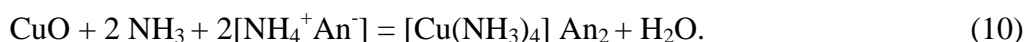
$$[Zn(NH_3)_4]^{2+} = 2,58 \cdot 10^{34} \cdot e^{-0,2345 \cdot T} \cdot [NH_3(aq)]^2 \cdot [NH_4^+]^2. \quad (9)$$

Оценивая результаты расчетов, можно с некоторой степенью вероятности предвидеть, что увеличение концентрации гидрата аммиака и введение буфер-образующего соединения приведет к значительному увеличению растворимости комплексообразователя при стандартной температуре. С ростом температуры возможна тенденция снижения растворимости.

Из расчетных данных следует, что растворимость тетрааммиаката меди значительно ниже растворимости аммиаката цинка при одинаковых условиях, так как произведение растворимости гидроксида меди $L_p = 1,31 \cdot 10^{-20}$ в воде меньше на три с лишним порядка произведения растворимости гидроксида цинка $L_p = 2,46 \cdot 10^{-17}$. При совместном присутствии обоих аммиаков это отражается на их взаимной растворимости по аналогии с растворимостью солей с одинаковым анионом.

Растворимость оксидов тяжелых цветных металлов в аммонийно-аммиачной среде была исследована экспериментально изотермическим способом [8], фазовое равновесие в системе жидкость-твердое изучено как для одиночного комплексообразователя, так и при их совместном присутствии. В соответствии с классификацией многокомпонентных систем, предложенной В.П. Радищевым [9] система $ZnO - CuO - NH_4^+ - Cl^- - NH_3 - H_2O$, образующая комплексные соединения, может быть представлена как солевая система $[Cu(NH_3)_4] Cl_2 + [Zn(NH_3)_4] Cl_2 + NH_4Cl + NH_3 \cdot H_2O$, то есть, для изоконцентрат $[NH_3 \cdot H_2O]$ система четырех компонентная: $[Cu(NH_3)_4]^{2+}$, $[Zn(NH_3)_4]^{2+}$, NH_4^+ , Cl^- первого класса, так как отношение катионов к анионам, $K/A=3/1$. При этом число реакций $R=0$, так как нет взаимных пар солей, то есть $B=0$ и $B/N=R=0$, где N – число простых солей. Таким образом, система рассматривалась как простая четверная и способ изображения фазовой диаграммы – тетраэдр. Изотерма диаграммы представляется в прямоугольных координатах, ортогональные проекции изотерм на координатные плоскости приведены в [8].

Химические превращения, протекающие с образованием комплексных ионов меди и цинка, можно представить в виде следующих уравнений (10) и (11) для различных аммонийных солей, в качестве которых были использованы для технологических исследований хлорид, нитрат, сульфат, гидрокарбонат и фторид аммония:



Проведенные расчеты свидетельствовали о том, что все процессы комплексообразования являются термодинамически разрешенными. Для аммонийных солей с различными анионами характерно следующее расположение по убыви абсолютной величины изобарно-изотермического потенциала $F^>SO_4^{2-}>NO_3^->Cl^->CO_3^{2-}>HCO_3^-$, что соответственно составляет для оксида меди $|-9,84|>|-9,14|>|-8,02|>|-7,52|>|-7,22|>|-6,94|$ и для оксида цинка $|-11,64|>|-10,94|>|-9,82|>|-9,32|>|-9,02|>|-8,74|$ кДж/моль(МеО).

Сопоставление результатов выщелачивания пиритного огарка – отхода производства серной кислоты из серного колчедана, всеми использованными экстрагентами (рис.1 и рис.2) позволяет сделать вывод, что наиболее эффективным экстрагентом является раствор хлорида аммония в аммиачной воде. Для сравнения были выбраны концентрация аммиака 3 % и 10 % аммонийной соли в выщелачивающем растворе, отношении Т:Ж=1:10, времени выщелачивания 4 часа, температуре 293 К.

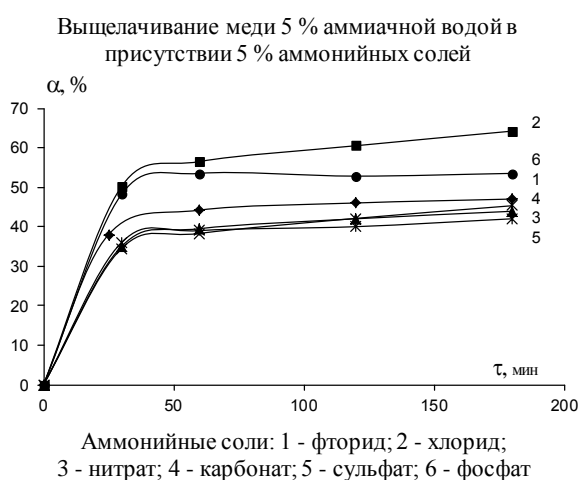


Рис. 1

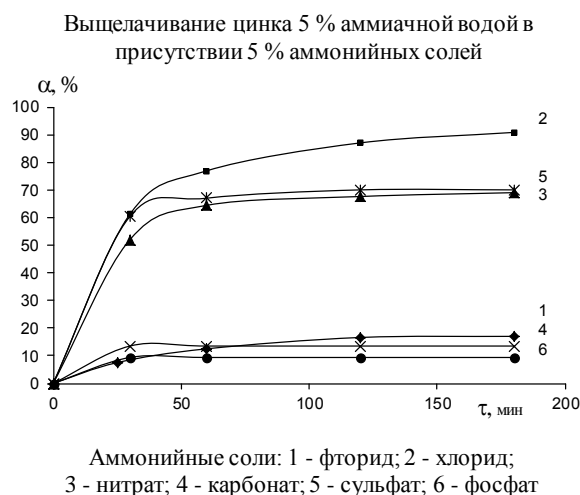


Рис. 2

На рис. 3 ось абсцисс соответствует ΔG реакций образования карбоната, хлорида, нитрата, сульфата и фторида тетрааммиакатов цинка и меди.

Степень выщелачивания меди и цинка 10 % растворами аммонийных солей в 3 % аммоде за 4 часа

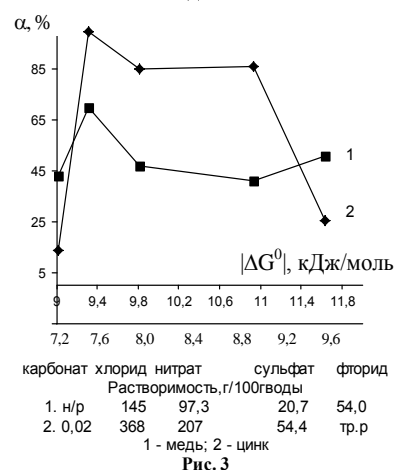


Рис. 3

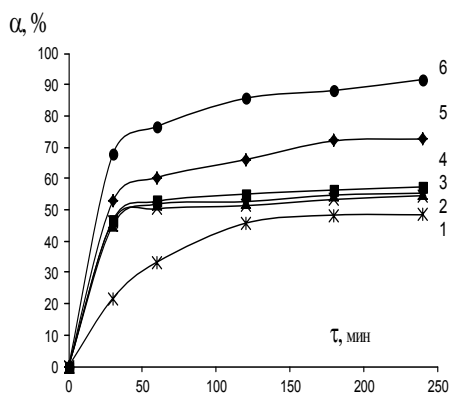
Переход от карбоната к хлориду соответствующий уменьшению энергии Гиббса с $-9,1$ до $-9,31$ кДж/моль MeO вызывает резкий скачок степени извлечения цинка вплоть до 100 % и до 70 % меди. Дальнейшее повышение отрицательности изобарно-изотермического потенциала не может удержать высокую эффективность извлечения, так как работают другие факторы, в том числе и растворимость образующихся промежуточных соединений. Так, карбонат цинка практически нерастворим, хлориды меди и цинка прекрасно растворяются в количестве 145 и 368 г/100 г воды, нитраты – 97,3 и 207 г/100 г воды в пересчете на ангидрид, сульфаты – 20,7 и 54,4, фторид меди 54 г/100 г воды в пересчете на ангидрид, а фторид цинка – труднорастворимое соединение. Из приведенных экспериментальных результатов расчета энергии

Гиббса и справочных данных по растворимости солей, способных образовываться в процессе выщелачивания меди и цинка из огарка, следует, что они достаточно хорошо коррелируются. Особенно это наглядно для хлоридов и фторидов. Из рисунка также следует, что аммонийная соль соляной кислоты в растворе аммиачной воды является наиболее эффективной в процессе извлечения цинка и меди из пиритного огарка. Диапазон концентраций аммиака и хлорида аммония, принятых для исследования, составлял от 0 до 13,34 моль/л NH_3 и от 0 до 5,07 моль/л Cl . Максимальная концентрация хлорида аммония, принятая к исследованию, близка к насыщению раствора в системе $NH_4Cl - H_2O$ 27,3% (мас.), что составляет 5,47 моль/л в пересчете на хлор-ион [7]. Как следует из приведенного рисунка, с наибольшей

эффективностью цветные металлы извлекаются аммиачно-аммонийными и аммиачно-сульфатными растворами.

Было исследовано влияние концентрации хлорида аммония на степень извлечения тяжелых цветных металлов из пиритного огарка полученного из Ревдинского колчедана завода им. Я.М. Свердлова г.Дзержинска. Результаты представлены на рис. 4 и рис. 5.

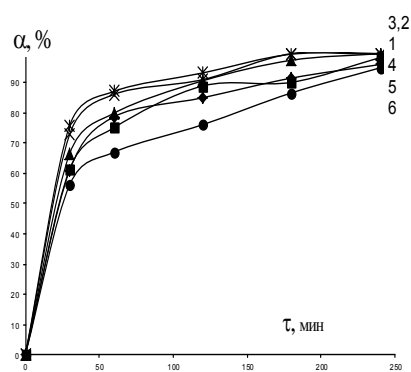
Извлечение меди аммиачно-буферным раствором с содержанием хлорида аммония 6,7 %



Содержание аммиака, (% масс.):
1 - 0; 2 - 1,62; 3 - 2,13; 4 - 3,23; 5 - 6,47; 6 - 12,96

Рис. 4

Извлечение цинка аммиачно-буферным раствором с содержанием хлорида аммония 6,7 %



Содержание аммиака, (% масс.):
1 - 0; 2 - 1,62; 3 - 2,13; 4 - 3,23; 5 - 6,47; 6 - 12,96

Рис. 5

Растворы выщелачивания, поддерживающие $\text{pH}=11,3$, готовили, растворяя 67 г хлорида аммония в 200 мл воды, добавляли 570 мл 25 % раствора аммиака, полученный раствор довели в мерной колбе дистиллированной водой до 1 литра. Концентрация буферного раствора соответствовала 6,7 % NH_4Cl и 12,96 % NH_3 .

В процессе выщелачивания огарка этим раствором за 4 часа медь и цинк переходили в растворенное состояние, образуя коллективный раствор синего цвета, что свидетельствовало об образовании комплексного соединения меди, раствор аммиаката цинка – бесцветный. В ходе выщелачивания pH оставался постоянным 11,3. Основная часть цинка (2/3) и меди (3/4) была извлечена в течении 60 минут. Относительная скорость перехода (скорость, отнесенная к единице массы извлекаемого металла) меди в раствор ($1,463 \cdot 10^{-5} \text{ г/г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мин}$) на этом промежутке времени выше, чем цинка ($1,27 \cdot 10^{-5} \text{ г/г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мин}$). Средняя скорость извлечения цинка на промежутке от 0 до 60 минут составляет $2,6 \cdot 10^{-5}$, для меди – $4,36 \cdot 10^{-6} \text{ г/г} \cdot \text{м}^2 \cdot \text{мин}$. В конечном итоге полнота извлечения цинка становится выше, концентрации комплексобразующих металлов в растворе достигают 0,274 г/л Cu^{2+} и 1,94 г/л Zn^{2+} .

Для сравнения эффективности извлечения ТЦМ пиритный огарок подвергали трехчасовому выщелачиванию раствором с массовой долей аммиака 2, 5, 10, 15 % и массовой долей сульфата аммония 2, 5, 7, 10 %. Опыты проводили при комнатной температуре, при соотношении Т:Ж = 1:10.

Результаты свидетельствуют о том, что экстрагент, с массовой долей сульфата аммония 10 %, содержащий соответственно 5 % и 10 % аммиака, за 3 часа извлекает цинк на 95 – 97 %. Извлечение меди в этих случаях осуществляется неполностью и соответственно составляет 52–56 %. Влияние концентрации аммиака проследили, сопоставив результаты выщелачивания цинка за 60 минут при изменении концентрации аммиака 2, 5, 10, 15 % при постоянной концентрации сульфата аммония (например, 10 %). Степень извлечения цинка соответственно составила 76, 90, 77, 56 %, а степень извлечения меди – 43, 44, 51, 52 %. При 5 % концентрации аммиака степень извлечения цинка наибольшая; медь с увеличением концентрации аммиака извлекается с небольшим ростом ($\partial \alpha_{\text{Cu}} / \partial C_{\text{NH}_3}$). Средняя скорость извлечения цинка $\frac{\partial G}{F \partial \tau}$, г/м²·мин в оптимальных условиях 5 % аммиака и 10 % сульфата аммония за

30 и 60 минут соответственно составляет $4,32 \cdot 10^{-5}$ и $2,7 \cdot 10^{-5}$ г/м²мин. Из приведенных результатов следует, что имеется замедление скорости извлечения в 1,6 раза на данном временном участке. Для меди средняя скорость извлечения, за те же временные интервалы – $4,28 \cdot 10^{-6}$ и $2,35 \cdot 10^{-6}$ г/м²мин, то есть замедление скорости извлечения в 1,82 раза. Причиной снижения скорости извлечения является диффузионное торможение в порах инертного материала, содержащего насыщенный раствор аммиака. Низкая степень извлечения меди с допустимой вероятностью объясняется взаимным влиянием растворимости тетрааммиакатов цинка и меди с одноименным анионом и меньшей растворимостью безводного сульфата меди в воде, и присутствием сульфидной серы в огарке.

Таким образом, буферные растворы, содержащие хлорид аммония и аммиак, можно оценить как эффективные экстрагенты цинка и меди, причем, учитывая различное влияние массовых долей аммиака и хлорида аммония на извлекаемость меди и цинка, можно подобрать составы, способные образовывать коллективные растворы при достаточно высокой степени извлечения обоих компонентов или же извлекать селективно, повышая содержание одного из металлов в экстракте путем многократной обработки новых порций огарка.

Раздельную экстракцию цветных металлов из отвалов пиритного огарка состава 0,385% меди и 1,308% цинка проводили в три стадии при соотношении Т:Ж=1:10 во всех опытах. В качестве экстрагента брали на первой стадии дистиллированную воду, экстракцию проводили в течении одного часа. На второй стадии раствор хлорида аммония с концентрацией 6,7%, а на третьей стадии раствор, содержащий 12,96 % аммиака и 1,11 % хлорида аммония. На первой стадии получены следующие данные: медь в растворе отсутствовала, концентрация цинка в растворе – 0,732 г/л, что соответствует 56 % от количества цинка в исходном огарке. Результаты опытов по второй и третьей экстракции занесены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты опытов по раздельной экстракции

№ стадии	№ опыта	Время, мин	Полученные результаты			
			Массовая концентрация меди в растворе, г/л	Массовая концентрация цинка в растворе, г/л	Степень извлечения меди, %	Степень извлечения цинка, %
2	1	30	0,115	0,44	29,8	34,0
	2	60	0,140	0,51	36,0	39,2
	3	120	0,160	0,54	41,5	41,6
	4	180	0,165	0,57	42,9	44,0
3	1	30	0,05	–	12,9	–
	2	60	0,075	–	19,5	–
	3	120	0,125	–	32,37	–
	4	180	0,1605	–	41,6	–

Из таблицы следует, что при раздельной экстракции степень извлечения по цинку на первых двух стадиях достигает практически 100 %, то есть цинк полностью извлекается из пиритного огарка, в то время как медь на первой стадии не выщелачивалась, а на второй и третьей стадиях суммарная степень извлечения ее составила 84,5 %.

Таким образом, проведение экстракции в три этапа позволяет получить 56 % от всего содержащегося в огарке цинка в чистом виде, чистой меди 41,6 %, а также 44 % цинка и 42,9 % меди в виде коллективного раствора.

Отыскание констант скоростей реакции и проверка пригодности принятого уравнения кинетики с помощью интегральных методов основаны на использовании интегральных зависимостей, связывающих концентрацию реагирующего вещества с параметрами процесса и временем его протекания. Используя данные, которые были получены в результате проведения эксперимента, можно сделать вывод, что процесс экстракции цветных металлов в основ-

ном можно ограничить 30 минутами, так как за последующее время скорость процесса извлечения замедляется.

За модель процесса может быть принята дисперсная система [2-4, 11] с неизменяющейся концентрацией ионов цинка в частицах зерна пиритного огарка, так как фаза сохраняется до тех пор, пока присутствует оксид как индивидуальное вещество в инертной массе. Такое представление позволяет не принимать во внимание влияние концентрации извлекаемого вещества.

Концентрация аммиака, растворенного в воде или же в водном растворе хлорида аммония, многократно превышает число молей необходимых по стехиометрии. Вследствие этого при расчете математической модели извлечения меди порядок реакции по аммиаку можно принять равным нулю. Таким образом, процесс может быть описан уравнением:



В этом случае скорость реакции пропорциональна первой степени концентрации реагирующего вещества. Обозначим через X концентрацию образующегося вещества в момент τ и через C_A – концентрацию реагирующего в этот же момент времени хлорида аммония. Скорость реакции [8] описывается уравнением:

$$-\frac{dx}{fd\tau} = K_1(C_A - X), \quad (13)$$

где f – удельная внутренняя поверхность частиц огарка, m^2/cm^3 .

Учитывая, что содержание в огарке извлекаемых компонентов не превышает 2 % от общей массы, возможно предположить, что удельная поверхность практически не изменяется в процессе выщелачивания, поэтому кинетическое уравнение приобретает вид

$$-\frac{dx}{d\tau} = K_1(C_A - X). \quad (14)$$

Константа скорости реакции:

$$K_1 = \frac{1}{\tau} \ln \frac{C_A}{C_A - X}. \quad (15)$$

Найденные численные значения констант скоростей реакции выщелачивания меди из пиритного огарка аммиачно-водным раствором с добавкой хлорида аммония в интервале температур 283, 293, 303, 313 К при логарифмировании в координатах $\ln K$ от $1/T$ удовлетворительно ложатся на прямую. Тангенс угла наклона прямой равен $\text{tg } \varphi = -\frac{E}{R} = -459.57$, откуда $E = 3819,063$ Дж/(мольК).

Кинетическое уравнение выщелачивания цинка

$$-\frac{dx}{fd\tau} = K_2(C_B - Y), \quad (16)$$

где C_B – концентрация аммиака; Y – концентрация образующегося аммиаката цинка.

Аналогично для цинка тангенс угла наклона прямой равен $\text{tg } \varphi = -\frac{E}{R} = -804.3$, откуда $E = 6684,01$ Дж/(мольК).

Итак, величина энергии активации указывает, что процесс лимитируется диффузионными факторами. Численные значения константы скорости извлечения меди из огарка $3,09 \cdot 10^{-6} - 2,02 \cdot 10^{-6}$ 1/с имеют тенденцию к снижению с увеличением температуры, а численные значения константы экстракции цинка из огарка $1,64 \cdot 10^{-5} - 2,35 \cdot 10^{-5}$ 1/с увеличиваются с повышением температуры.

Математическое описание эксперимента [10] осуществили с учетом того, что влияющими параметрами на процесс извлечения цветных металлов являлись:

X_1 – температура, которая варьировалась от 283 К до 313 К; X_2 – соотношение Т:Ж, которое изменялось от 1:2 до 1:10 (0,5-0,1); X_3 – изменение концентрации аммиачно-

буферного раствора по хлориду аммония от 0 % до 6,7 %; X_4 – время от 30 до 120 минут; X_5 – изменение концентрации аммиачно-буферного раствора по аммиаку от 0 % до 12,96 %.

Используя матрицу планирования провели эксперименты и оценку степени извлечения, рассчитали коэффициенты регрессионного уравнения. Все коэффициенты регрессии оказались значимы, следовательно, искомые уравнения имеют вид:

$$Y = 44,562 - 2,05X_1 - 6,4919X_2 - 3,2X_3 + 19,92X_4 + 27,83X_5, \quad (17)$$

$$Y = 61,082 + 3,712X_1 + 8,314X_2 + 28,703X_3 - 4,194X_4 - 14,278X_5, \quad (18)$$

где Y_1 – степень извлечения цинка; Y_2 – степень извлечения меди; X_1' и X_1'' – концентрация аммиака, % масс.; X_2' и X_2'' – концентрация хлорида аммония в пересчете на хлорид-анион, г/л; X_3' и X_3'' – время выщелачивания, час; X_4' и X_4'' – отношение Т:Ж.

Пиритный огарок после выщелачивания цветных металлов был проанализирован на остаточное содержание цинка и меди. Установлено, что при одностадийном совместном извлечении металлов, концентрация оксида цинка, являющегося угрозой разрушения кладки доменных печей, не превышает 0,05%, меди 0,08%. Селективное извлечение цинка и меди обеспечивает практически полное удаление цинка.

Научно-производственная фирма «Пигмент» (г. С. Петербург) провела испытание огарка на предмет производства красного железистоокисного пигмента, образцы огарка были размолоты в шаровых, вибро-мельницах и других аппаратах, а затем исследованы на разбел с титановыми белилами. Наилучшие показатели у образцов, полученных после размолота с выщелачиванием в мельнице мокрого помола в течение 6 часов. Подготовлены и утверждены технические условия на пигмент железистоокисный «ДСК» ТУ 301-10-0-386-91.

Исходя из полученных результатов, следует, что расчеты термодинамических констант реакций комплексообразования растворимости аммиакатов цинка и меди, и экспериментальные данные по растворимости и степени извлечения цинка и меди подтвердили наибольшую эффективность состава выщелачивающего раствора, содержащего аммиак 12,96% и хлорид аммония 6,7% для комплексного (совместного) извлечения цинка и меди. Для селективного извлечения ТЦМ следует проводить 3-х стадийное выщелачивание: водой; раствором хлорида аммония 6,7%; аммиачно-аммонийным раствором с концентрацией аммиака 12,96% и хлорида аммония 1,3% при этом извлечение цинка практически полное. Огарок после выщелачивания, содержащий менее 0,05% цинка может быть использован для получения окатышей в производстве чугуна и красного железистоокисного пигмента.

Библиографический список

1. **Жданов, Ю.А.** Химическая коэволюция / Химическая промышленность. 1991. №1. С. 3-6.
2. **Аксельруд, Г.А.** Экстрагирование (Система твердое тело-жидкость) / Г.А. Аксельруд, В.М. Лысянский. – Л.: Химия, 1974. – 256 с.
3. **Романков, П.Г.** Экстрагирование из твердых материалов / П.Г. Романков, М.И. Курочкина. – Л.: Химия, 1983. – 256 с.
4. Массообменные процессы химической технологии (системы с дисперсной твердой фазой) / П.Г. Романков, В.Ф. Фролов. – Л.: Химия, 1990. – 384 с.
5. **Стромберг, А.Г.** Физическая химия: учебник для хим.-технол. спец. вузов / А.Г. Стромберг, Д.П. Семченко; под ред. А.Г. Стромберга. – 2-е изд., перераб и доп. – М.: Высш. шк., 1988. – 496 с.
6. **Швецова, П.А.** Переработка продуктов свинцово-цинкового производства на цинковые белила аммиачно-карбонатным способом // Очистка и анализ неорганических материалов: сб. стат. – Новосибирск: Наука, 1971. С. 179–186.
7. **Перельман, В.И.** Краткий справочник химика / В.И. Перельман. – М.: ГНТИ Хим. литературы, 1955. – 559 с.
8. **Перетрутов, А.А.** Совместная растворимость оксидов меди и цинка в аммиачно-аммонийных растворах / А.А. Перетрутов [и др.] // Физ. Химии. 2009. №8. С. 1594–1597.

9. **Новоселова, А.В.** Методы исследования гетерогенных равновесий: учеб. пособие / А.В. Новоселова. – М.: Высш. шк., 1980. – 166 с.
10. **Кафаров, В.В.** Методы кибернетики в химии и химической технологии / В.В. Кафаров. – 4-е изд., перераб., доп. – М.: Химия, 1985. – 448 с.
11. **Зеликман, А.Н.** Теория гидрометаллургических процессов / А.Н. Зеликман, Г.М. Вольдман, Л.В. Беляевская. – М.: Metallurgia, 1983. С. 424.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2013*

A.A. Peretrutov, N.V. Ksandrov, T.B. Gagarina, M.N. Chubenko, P.P Kim

THERMODYNAMIC AND KINETIC BASIS OF WATER-AMMONIUM EXTRACTION COMPOUNDS OF ZINC AND COPPER FROM INDUSTRIAL WASTE

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

Extraction of zinc and copper ammonia solutions is characterized by thermodynamic calculations of isobaric-isothermal potential chemical reactions formation of ammoniates. To find the kinetic parameters of the adopted model of the dispersed system with unchangeable internal surface and the concentration of zinc and copper in the particles of grain pyritic cinder. To find the kinetic parameters of the adopted model of the dispersed system with unchangeable internal surface and the concentration of zinc and copper in the particles of grain pyritic cinder. Calculated the rate constants, activation energies of processes, the coefficients of the regression equations that characterize the degree of extraction of zinc and copper. Are found the optimal parameters of leaching of heavy metals from cinder.

Key words: cinder pyritic , ammonia water , ammonium chloride, Gibbs energy, degree leaching , the rate constant , the regression equations.

УДК 621.794.61:621.357.8(035)

Т.И. Девяткина, Т.В. Маркова, В.В. Рогожин, М.Г. Михаленко

ОСОБЕННОСТИ ГАЛЬВАНИЧЕСКОГО МЕДНЕНИЯ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Разработана технология нанесения медного гальванического покрытия на анодированные алюминиевые сплавы. Установлено, что процесс катодного восстановления меди на анодированной поверхности протекает с высокой катодной поляризацией, локально и для прокрытия всей поверхности требуется значительное время. Предложены пути интенсификации данного процесса. Покрытие, полученное по данной технологии, обладает высокой адгезией к поверхности деталей без дополнительной термообработки.

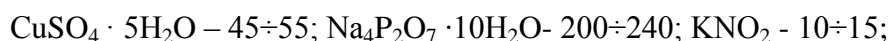
Ключевые слова: медное гальваническое покрытие, катодная поляризация, адгезия покрытия с основой, качество покрытия, электролиты меднения.

Алюминиевые сплавы являются основным конструкционным материалом в авиации, автомобилестроении, электротехнической промышленности. Сейчас наблюдается тенденция к расширению области применения их и в других отраслях: жилищном строительстве, приборостроении, в производстве наземного транспорта и др. Этому способствует нанесение на алюминиевые изделия различных гальванических покрытий. Наиболее часто применяется процесс осаждения медного покрытия. Медь является относительно недорогим металлом, и благодаря ее физико-химическим свойствам медные покрытия могут применяться для различных целей.

Однако существуют специфические трудности нанесения гальванических покрытий на алюминий и его сплавы, связанные с наличием на их поверхности естественной оксидной пленки, препятствующей прочному сцеплению между основой и покрытием. Кроме того, сильно электроотрицательный потенциал алюминия (в особенности, после удаления с него оксидной пленки) приводит к контактному выделению металлов с более положительной величиной потенциала до начала прохождения тока через раствор электролита, что также ухудшает сцепление между покрытием и основой.

Преодоление указанных трудностей достигается специальными методами подготовки поверхности покрываемых изделий, обеспечивающих достаточно высокую адгезию покрытия с основой. Наиболее эффективным методом подготовки поверхности является анодирование. В работе [1] показано, что с целью получения качественного медного покрытия на алюминиевых сплавах с высокой адгезией и заданными функциональными свойствами подготовку поверхности алюминиевых изделий рекомендуется проводить в смеси кислот (серной и ортофосфорной).

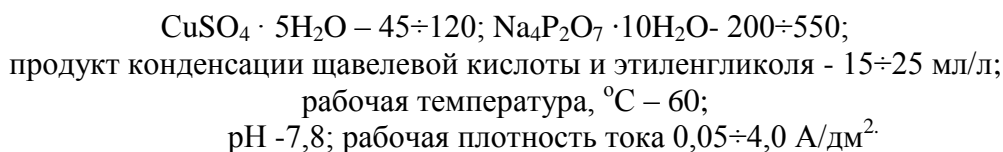
Согласно [2] последующее меднение рекомендуется проводить в пирофосфатных электролитах. Известен способ нанесения медного гальванического покрытия на алюминий и его сплавы без анодирования из электролита, имеющего следующий состав (г/л):



рабочая температура, °С - 55 ÷ 65.

Данный способ отличается тем, что предварительно проводят выдержку деталей в данном электролите в течение 1-3 мин, на первой стадии электролиза слой меди наносят при плотности тока 0,2-0,4 А/дм², а на второй стадии при плотности тока 0,3-1 А/дм² [3]. Применение данного метода не представляется возможным, так как отсутствуют данные об адгезии медного покрытия с основой детали и о прокрытии всей поверхности, кроме того, его применение в производстве сопряжено со значительными техническими трудностями.

Известен электролит [4], позволяющий непосредственно получать медные покрытия на алюминии и его сплавах с меньшей пористостью и обладающие большей прокрываемостью сложнопрофилированных деталей. В своем составе он содержит (г/л):



Однако такой электролит достаточно сложен в приготовлении, требует точного поддержания pH раствора и температуры, а также не приводятся сведения об адгезии покрытия с поверхностью деталей.

Однако все щелочные электролиты, к которым относятся и пирофосфатные, несмотря на хорошее качество получаемых медных покрытий, обладают существенным недостатком – многокомпонентность и, соответственно, большей стоимостью процесса. Кроме того, щелочные электролиты имеют сравнительно низкие катодные выходы по току по сравнению с кислыми электролитами. Это приводит к значительному увеличению времени осаждения медного покрытия на деталь. Наряду с этим, в данных электролитах в значительной мере анодированный алюминий и его сплавы подвергаются существенному коррозионному растворению.

Среди кислых электролитов (сернокислые, борфтористоводородные, кремнефтористоводородные) наиболее широкое распространение получили сернокислые электролиты, отличающиеся простотой состава, устойчивостью и высоким выходом по току (до 100%). Недостатком этих электролитов является невозможность непосредственного покрытия деталей из стали, алюминия, цинка вследствие контактного выделения меди, имеющей плохое сцепление с основным металлом [5]. В простейшем своем виде он состоит всего из двух компонентов. Для него приняты следующие состав (г/л) и режим осаждения:



рабочая температура, $^\circ\text{C}$ – $15 \div 25$; плотность тока j_k , А/дм² – $1 \div 2$; выход по току Вт_k , % – $95 \div 98$.

При перемешивании электролита сжатым воздухом или его циркуляции с непрерывным фильтрованием катодную плотность тока можно повысить до $6 \div 8$ А/дм². Наличие серной кислоты и спирта в этом электролите имеет весьма важное значение для нормального ведения процесса электролиза. Они предотвращают гидролиз медных закисных солей, снижая омическое сопротивление электролита. Наличие кислоты в электролите уменьшает активную концентрацию ионов меди, что способствует мелкозернистости покрытия и дает возможность применять высокие плотности тока. К достоинствам этого электролита можно отнести и простоту анализа его состава. Главными недостатками других электролитов являются многокомпонентность и достаточно высокая стоимость.

Анализируя изложенное, делаем вывод, что для нанесения медного покрытия целесообразно использовать стандартный сернокислый электролит меднения. Покрытия, полученные из этого электролита, обладают следующими достоинствами: высокая прочность, высокая твердость, низкое электрическое сопротивление, низкие внутренние напряжения, хороший блеск, высокая термопрочность [6].

Установлено, что качество гальванопокрытия, в частности его адгезия с основой детали, зависит от предварительной подготовки поверхности основы. Ранее было выявлено [1], что оптимальной подготовкой поверхности является процесс анодирования алюминия и его сплавов в смеси ортофосфорной и серной кислот, позволяющий получить пористую плёнку необходимой толщины. После тщательной промывки образцы подвергались меднению в стандартном сернокислом электролите. Первые слои осаждающегося металла имеют темный и даже чёрный цвет. Это объясняется тем, что в порах пленки осаждаются тонкодисперсные волокна, которые далее срастаются между собой, перебрасывая мостки через плёнку. То об-

стоятельность, что сама плёнка прочно сцеплена с основой, также обеспечивает прочное сцепление гальванического покрытия [2].

При нанесении медного покрытия были получены следующие результаты (табл. 1).

Таблица 1

Визуальная оценка качества медного покрытия

№	Электролит анодирования и режим процесса	Электролит меднения	Режим меднения	Качество покрытия
1	15% H_2SO_4 + +15% H_3PO_4 $j_a=2$ А/дм ² , t =комн., $\tau=5$ мин	сернокислый	$j_k=1.5$ А/дм ² , t =комн., $\tau=27$ мин	Непокрытия по всей поверхности детали
2		сернокислый	$j_k=0.8$ А/дм ² , t =комн., $\tau=52$ мин	Матовое покрытие, частичное непокрытие в труднодоступных местах
3		1. $CuSO_4+HF$ 2.сернокислый	1. $j_k=1.5$ А/дм ² t =комн., $\tau=3$ мин. 2. $j_k=1.5$ А/дм ² t =комн., $\tau=24$ мин	Полублестящее мелкокристаллическое покрытие, непокрытий нет

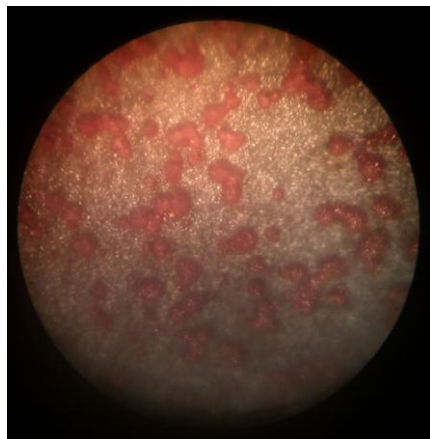
При меднении алюминиевых образцов, анодированных в смеси кислот, была выявлена следующая закономерность. При меднении при $j_k=1.5$ А/дм² были обнаружены участки красного цвета и дендриты на выступах и кромках деталей, что говорит о высокой катодной плотности тока. При снижении ее до $0.8 \div 1$ А/дм² качество покрытия значительно улучшается, однако эти меры приводят к увеличению временных затрат. Применение таких низких рабочих плотностей тока можно объяснить низкой рассеивающей способностью электролита и высокой пористостью полученной оксидной пленки. На рис. 1 представлены фотографии осадков меди, образовавшихся на поверхности анодной пленки, сформированной в смеси кислот в различное время процесса. Меднение проводилось при комнатной температуре и плотности тока 0.8 А/дм².

Для нанесения покрытий требуемой толщины 9 мкм при такой плотности тока необходимое время процесса составляет 52 мин. Столь длительное время связано со значительными затруднениями при осаждении меди на оксидную пленку. Этот процесс характеризуется высокой поляризацией. На катодах с анодносформированными пленками весь процесс восстановления меди можно подразделить на два периода: начальный, когда медь осаждается по поверхности оксид, и основной, когда медь осаждается на образовавшемся слое меди. В начальный момент времени ($1 \div 25$ мин) осаждение меди на анодированную поверхность носит локальный характер (протекает только в порах пленки, где толщина оксидного слоя минимальна), и только к 30 -й минуте она практически покрыта полностью. Спустя $30 \div 35$ минут начинается второй этап – осаждение меди на медь, которое протекает без особых затруднений. Установлено, что в значительной мере уменьшить время меднения можно нанесением подслоя меди, создающего на поверхности анодированного катода сплошную пленку. Наличие такой пленки позволяет сократить время начального периода осаждения меди.

Известен способ меднения алюминия, позволяющий создать такую пленку. Авторами [7] был предложен модифицированный сернокислый электролит, содержащий в своем составе помимо основных компонентов, фтористый аммоний в количестве $1,2-11$ г/л, введение которого предусмотрено непосредственно только в процессе покрытия. Положительный эффект от введения этой добавки заключается в более равномерном покрытии поверхности детали. Такой подслоя можно получить и из электролита, содержащего фтористоводородную кислоту, которая, по нашему мнению, является одновременно и активатором оксидной пленки, при этом данный электролит

имеет более высокую рассеивающую способность (табл. 2). Преимущество этого электролита состоит и в том, что он не требует постоянной корректировки. Такая технология применяется при меднении титана и его сплавов [5]. Состав этого электролита следующий:

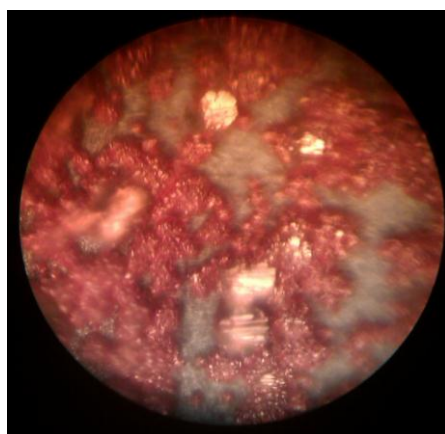
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O} - 250 \text{ г/л}$; $\text{H}_2\text{SO}_4 - 50 \text{ г/л}$; $\text{HF} - 50 \text{ г/л}$; $j_k - 1 \div 2 \text{ А/дм}^2$;
 $\tau - 2 \div 3 \text{ мин}$; температура комнатная.



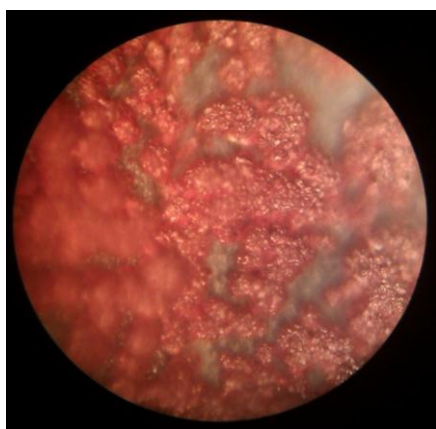
а)



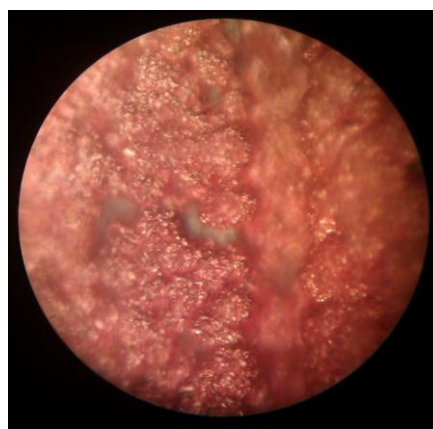
б)



в)



г)



д)

Рис. 1. Осадки меди, осажденные на оксидной пленке при катодной плотности тока 0.8 А/дм^2 , сформированной в смеси кислот при комнатной температуре в различное время: а – 5 мин; б – 13 мин; в – 26 мин; г – 39 мин; д – 52 мин

Однако использование такого стандартного электролита в качестве подслоя привело к тому, что при отжиге алюминиевых деталей в вакуумной печи произошло отслаивание покрытия от основы. Это объясняется высокой концентрацией плавиковой кислоты в электролите и может быть устранено снижением ее до $10 \div 15$ г/л [8]. Применение данного электролита в качестве подслоя позволило получить равномерное покрытие по всей поверхности детали, так как его рассеивающая способность превышает примерно в три раза РС сернокислого электролита (табл. 2). Как показали исследования, создать сплошную катодную пленку в присутствии плавиковой кислоты можно за 3 мин по сравнению с меднением в стандартном сернокислом электролите (рис. 2).

Таблица 2

Рассеивающая способность электролитов меднения

Режимы анодной обработки и составы электролитов	Состав электролитов меднения	Катодная плотность тока, А/дм ²	РС, %
15%H ₂ SO ₄ +15%Н ₃ PO ₄ $j_a=2$ А/дм ² , $t=$ комн., $\tau=5$ мин	CuSO ₄ ·5H ₂ O – 200÷250 г/л; H ₂ SO ₄ – 50 г/л; HF – 10÷15 г/л;	1.5	19.76
	CuSO ₄ ·5H ₂ O – 200÷250 г/л; H ₂ SO ₄ – 50÷70 г/л;	1.5	9.27
	C ₂ H ₅ OH – 7÷10 мл/л	1	11.2
		0.75	13.1
		0.5	18

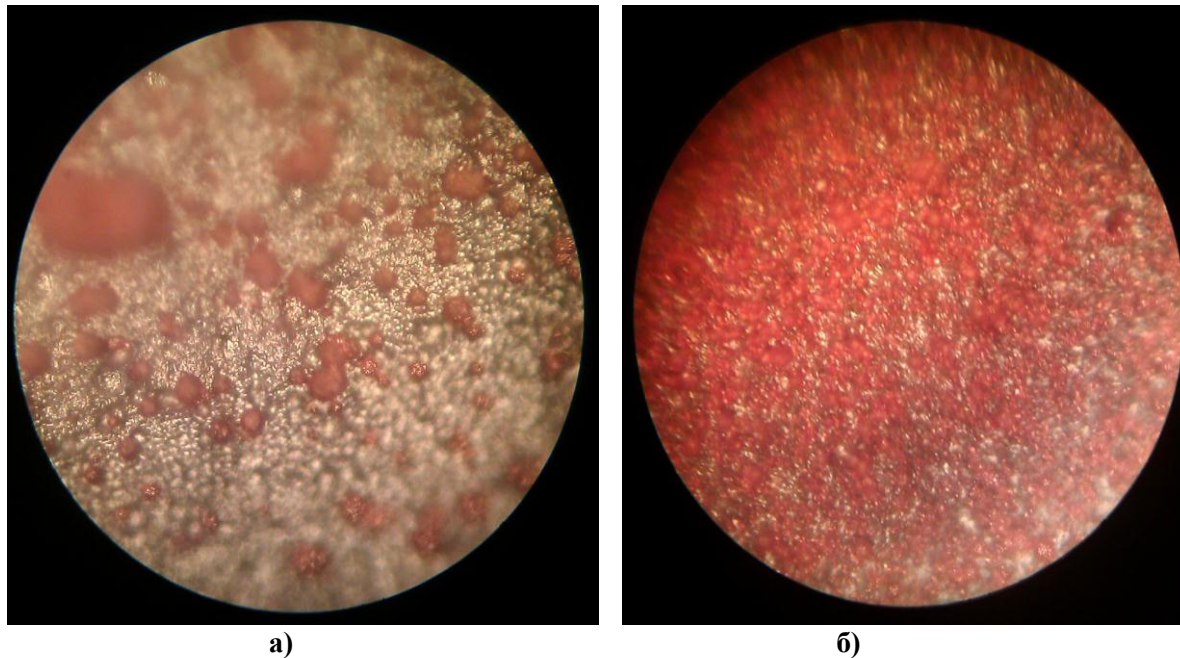


Рис. 2. Осадки меди, полученные в различных электролитах на оксидной пленке, сформированной в смеси кислот за 3 минуты при катодной плотности тока 1,5 А/дм²:
а – сернокислый электролит; б – сернокислый электролит с добавлением HF

Исследование влияния плавиковой кислоты на процесс меднения производилось снятием потенциодинамических кривых. На рис. 3 представлены катодные поляризационные кривые электродов из алюминиевых сплавов, анодированных в смеси кислот и пере-

считанные на геометрическую площадь поверхности образцов. Показано, что начальный этап меднения в стандартном сернокислом электролите имеет затруднения, связанные с высоким перенапряжением осаждения меди на данную поверхность. Такой недостаток устраняется в значительной мере при использовании электролита, содержащего плавиковую кислоту. В присутствии плавиковой кислоты в растворе меднения наблюдается быстрый рост тока, что свидетельствует об образовании сплошной катодной пленки на всей поверхности анодированного алюминия. Это предположение согласуется с экспериментальными данными. Очевидно, что низкие плотности тока при меднении анодированного алюминия в сернокислом электролите объясняются затруднением процесса образования центров кристаллизации вследствие плотной оксидной пленки и ее низкой активности. В случае применения HF в электролите меднения количество этих центров значительно возрастает (рис. 2), т.е. образуется сплошная катодная пленка из осажденной меди. По нашему мнению, это связано с равномерным активированием ионами фтора всей поверхности анодированного алюминия.

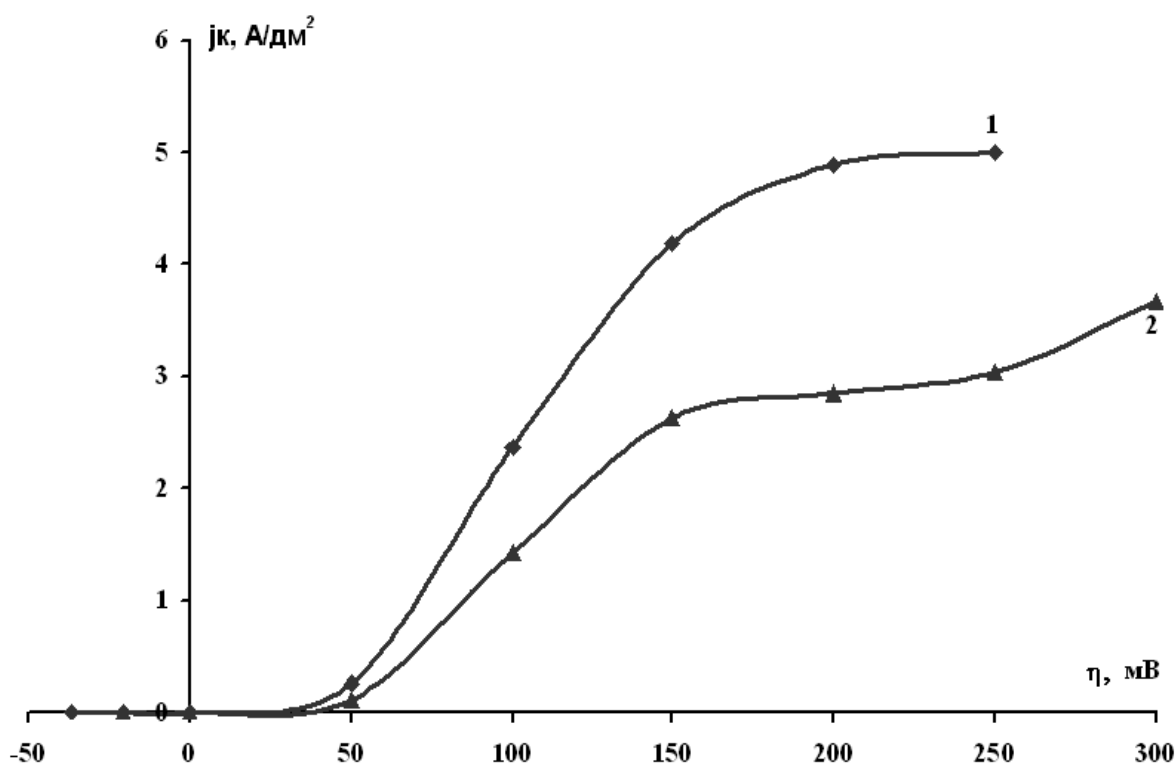


Рис. 3. Поляризационные кривые для алюминиевого катода в сернокислом электролите меднения:

- 1 – сернокислый электролит с добавлением HF;
2 – стандартный сернокислый электролит

Выявлено (рис. 4), что в начальный момент времени, при погружении оксидированных образцов в стандартный сернокислый электролит, на поверхности деталей наблюдается незначительное снижение потенциала (примерно на 0,5В) вследствие изменения состава пленки из-за контактного обмена. Далее величина потенциала остается почти постоянной. Аналогичная зависимость наблюдается и в электролите с добавкой плавиковой кислоты. Однако в этом случае величина потенциала снижается примерно на 2,5 вольта, что подтверждается образованием сплошной медной пленки на поверхности детали. Использование электролита с добавкой плавиковой кислоты в качестве подслоя оказало положительное влияние на весь процесс меднения. Покрытие, полученное по данной методике, обладает мелкокристаллической структурой, гладкостью и равномерностью.

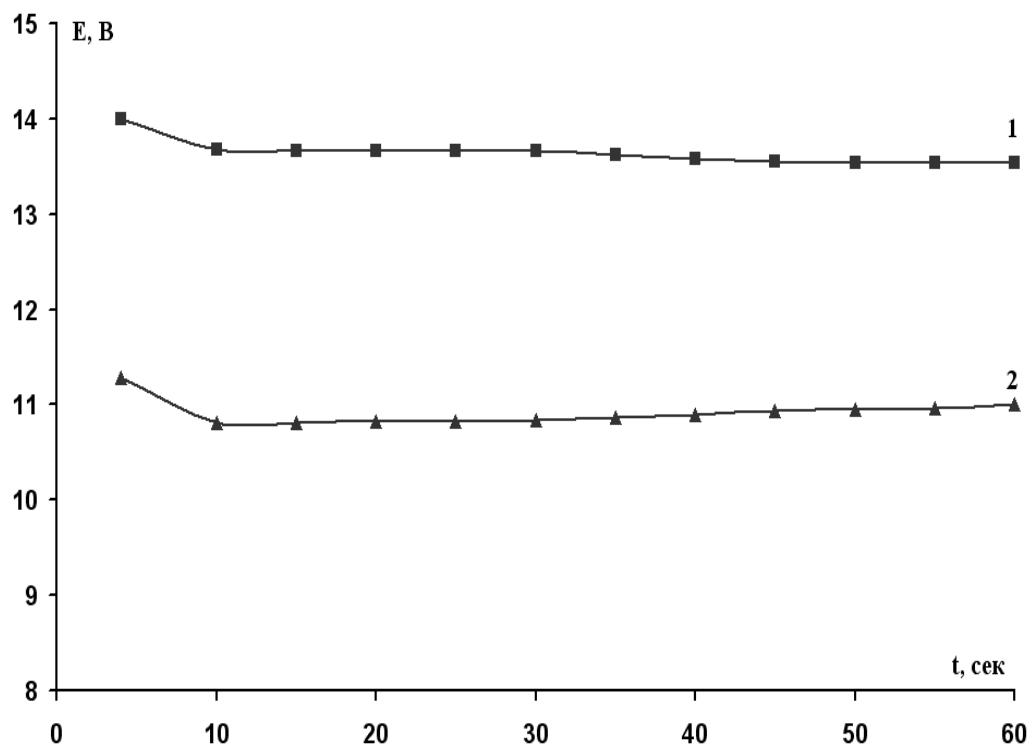


Рис. 4. Изменение во времени потенциала алюминиевого катода с анодными пленками при осаждении меди из сернокислого электролита меднения и в электролите с добавкой HF при $j_k=1,5$ А/дм²:

условия анодной обработки: 15%H₂SO₄ + 15%Н₃РO₄, $t=18\div 21$ °С. $j_a=2$ А/дм², $\tau=5$ мин

1 – меднение в сернокислом электролите с добавлением HF;

2 – меднение в сернокислом электролите

Полученное по предложенной технологической схеме гальваническое медное покрытие было исследовано на адгезию тремя методами: методом крацевания, методом сеток и отжигом в вакуумной печи при температуре 200⁰С. У всех 15 образцов при этом отслоения покрытий не наблюдалось. Таким образом, использование двухстадийного меднения позволяет получить медное покрытие на алюминиевые детали, имеющее требуемые характеристики при эксплуатации и высокую степень адгезии с поверхностью без дополнительной термообработки, что в значительной мере позволяет сократить время технологического процесса.

Библиографический список

1. **Девяткина, Т.И.** Нанесение медного гальванического покрытия на детали из алюминия и его сплавов / Т.И. Девяткина [и др.] // Будущее технической науки: сб. мат. XI Междунар. научно-техн. конф. 2012. С. 297.
2. **Лайнер, В.И.** Гальванические покрытия легких сплавов / В.И. Лайнер. – М.: Металлургиздат, 1959. –138 с.
3. Пат. № 2214483 от 20.07.2003 Способ меднения алюминия / Лукомский Ю.Я., Румянцев Е.М., Зеленьюк Ю.И., Манукян А.С., Невский О.И., Колодько Г.Н., Грибков М.А.; заявка от 30.01.2002.
4. Заявка № 94027801/02 от 25.07.1994 Электролит для меднения алюминия и его сплавов / Кольчугин А.В., Ополовников В.Р., Прияткин Г.М., Васильев В.В.
5. **Ямпольский, А.М.** Меднение и никелирование. / А.М. Ямпольский.– Л.: Машиностроение, 1977. – 102с.
6. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник / под ред. М.А. Шлугера. Т. 1,2. – М.: Машиностроение. 1985. – 246 с.

7. Заявка № 95115302/02 от 27.07.1997 Электролит контактного меднения алюминия / Уварова Г.А., Свечина Н.Н., Цветков В.В.
8. **Попилов, Л.Я.** Советы заводскому технологу / Л.Я. Попилов. – Л.: Лениздат, 1975. – 264 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.04.2013*

T.I. Devyatkina, T.V. Markova, V.V. Rogozhin, M.G. Mikhalenko

FEATURES OF GALVANIC COPPER PLATING OF ALUMINUM ALLOYS

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

Purpose: Development of applying copper plating on anodized aluminum alloys with a high adhesion.

Design/methodology/approach: Processing of aluminum alloys in a mixture of acidity and then copper plating in a sulfuric electrolyte are made.

Findings: Found that the process of cathodic recovery copper on anodized surface proceeds with a high cathodic polarization, locally and to cover the entire surface requires a considerable time.

Ways of intensification of the process are proposed.

The coating obtained using this technology has a high adhesion to the surface of parts without further heat treatment.

Key words: copper plating, cathodic polarization, adhesion of the covering with base, the quality of covering, copper plating electrolytes.

УДК.621.793.3:669.248.8

В.В. Рогожин, Е.Ю. Ананьева, М.Г. Михаленко

**ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ НИКЕЛЕВЫХ ПОКРЫТИЙ
ИЗ РАЗБАВЛЕННЫХ АММИАЧНО-ЦИТРАТНЫХ ЭЛЕКТРОЛИТОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследована возможность повышения работоспособности аммиачно-цитратных комплексных электролитов никелирования путем их разбавления по основным компонентам. На основании потенциостатических и кулонометрических измерений показано влияние разбавления электролита на выбор режима его работы.

Ключевые слова: электроосаждение, покрытия никель и никель-бор, цитратно-аммонийные комплексы, стабильность.

Комплексные электролиты никелирования позволяют получать функциональные покрытия никелем и сплавом никель-бор с разнообразными улучшенными физико-механическими характеристиками [1]. Такие покрытия являются мелкокристаллическими и более равномерными по толщине на сложнопрофилированных деталях. Это обусловлено высокой катодной поляризацией, которая в свою очередь зависит от строения комплекса. Характерной особенностью электродных процессов, протекающих с участием комплексов многих металлов, в том числе никеля, является наличие химической стадии, предшествующей стадии разряда. Наиболее известным комплексным электролитом никелирования является цитратный электролит с добавками солей аммония [3, 4].

В работе [5] сделан вывод о том, что состав электролита, определяющий вид комплекса, оказывает влияние и на процесс осаждения никеля. Например, причиной затруднения выделения на катоде никеля из цитратных электролитов является присутствие в растворе биядерных комплексов с высокими отрицательными зарядами $[\text{Ni}_2\text{HCit}_2]^{3-}$ и $[\text{Ni}_2\text{HCit}_2]^{4-}$. За счет введения хлорида аммония с целью интенсификации процесса образуются дополнительно аммонийные комплексы никеля, способные разряжаться непосредственно на катоде, а также смешанные аммонийно-цитратные комплексы. Было установлено, что количество цитрата в никелевых покрытиях, осажденных из цитратных электролитов, изменяется в зависимости от концентрации дополнительного лиганда - ионов аммония. Также наблюдается уменьшение общего количества посторонних примесей в покрытиях, за счет уменьшения содержания в них солевых и гидроокисидных соединений никеля, что вызывает значительное изменение физико-механических свойств никелевых покрытий: внутренние напряжения снижаются, а микротвердость превышает микротвердость покрытий, осажденных из стандартного сульфатного электролита, и т.п.

Опыт эксплуатации цитратных электролитов никелирования показал некоторую нестабильность их состава, связанную с выпадением труднорастворимых солей и гидроксидов в объеме электролита, которые могут в той или иной степени включаться в состав покрытий, меняя их функциональные свойства.

В нашей работе [6] расчетным путем определены области образования труднорастворимых соединений, которые формируются в цитратных электролитах. Показано, что в слабощелочных растворах возможно образование осадка $\text{Ni}(\text{OH})_2$, а при наличии в растворе сульфата и смешанной соли $(\text{NH}_4)_2\text{Ni}(\text{SO}_4)_2$.

Область образования гидроксида никеля расширяется с увеличением концентрации сульфата никеля. Введение лиганда – солей аммония, устраняет образование $\text{Ni}(\text{OH})_2$, но увеличивает область формирования двойных солей никеля $\text{Ni}(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)_2$; при этом образование двойных солей никеля оказывает меньшее отрицательное влияние на характеристики

электролита по сравнению с образованием твердой фазы $\text{Ni}(\text{OH})_2$ вследствие более высокой их растворимостью. С целью стабилизации состава электролита в процессе эксплуатации и повышения качества осадков никеля нами рекомендовано применение электролитов никелирования с меньшим содержанием солей никеля и лигандов.

Проведенные в настоящей работе исследования преследовали цель определить оптимальный состав стабильного цитратного электролита никелирования в условиях его разбавления. Критерием, определяющим работоспособность электролита, служил катодный выход по току и вид катодных и анодных поляризационных кривых, определяющих выбор режима никелирования. В результате потенциостатических измерений, проведенных с применением потенциостатов Р-8S, были построены катодные и анодные поляризационные кривые электроосаждения и растворения никеля при различном соотношении компонентов электролита. Методом кулонометрии определены катодный и анодный выходы по току для никеля.

В качестве базового был выбран электролит состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 60-170 г/л; $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ – 220-240 г/л. Режим процесса: температура 45°C, pH=7.2. Изменения концентрации компонентов раствора сказались на поляризационных характеристиках электроосаждения никеля. Разбавление цитратного электролита по ионам никеля оказывает влияние на катодную стадию процесса, сдвигая на поляризационной кривой рабочие потенциалы осаждения никеля в отрицательную сторону (рис. 1).

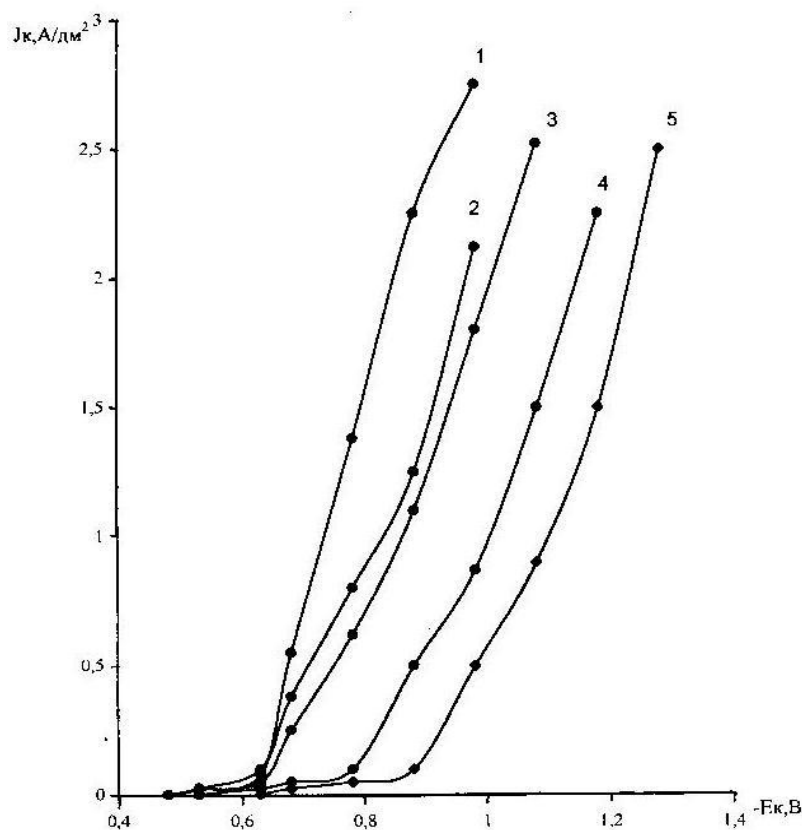


Рис. 1. Кривые катодной поляризации процесса осаждения никеля в цитратном электролите базового состава (г/л) Na_3Cit 230, NH_4Cl 20 – при концентрации сульфата никеля (г/л): 1 – 160; 2 – 120; 3 – 100; 4 – 80; 5 – 40

Доля ионов никеля, связанных в цитратный анионный комплекс, с увеличением концентрации $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ возрастает. При этом повышается число цитратных лигандов в комплексе, что приводит к образованию комплексных ионов с большим отрицательным зарядом, разряд ионов никеля из которых затрудняется, вызывая увеличение катодной поляризации. Катодный выход по току при этом уменьшается (рис. 2). Таким образом, для поддержания

необходимого высокого катодного выхода по току нужно варьировать соотношение концентраций других компонентов раствора, в частности, соли цитрата.

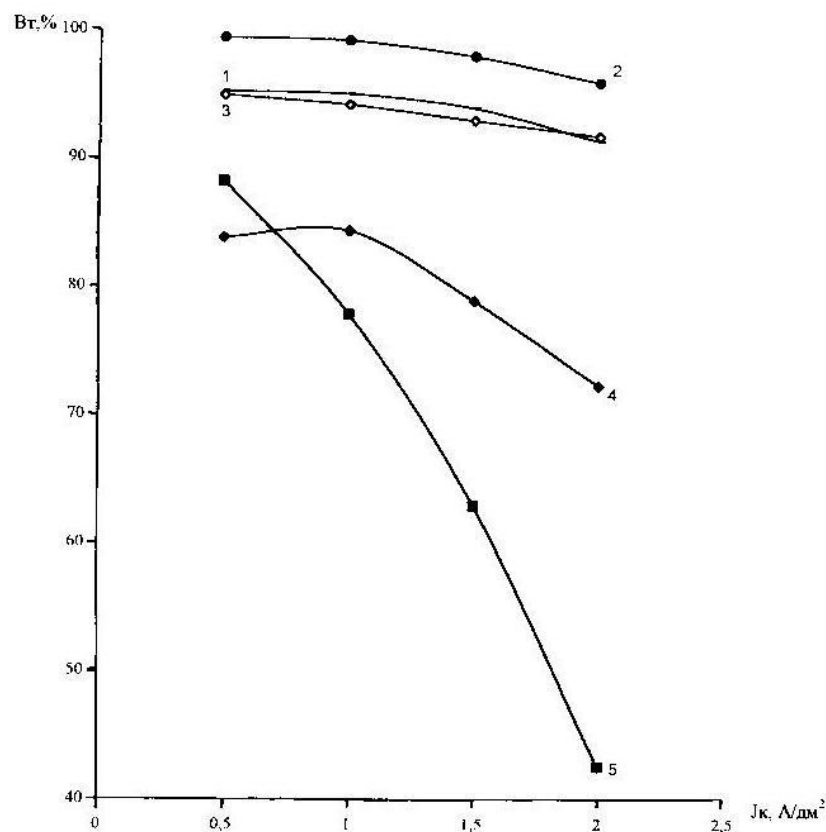


Рис. 2. Зависимость катодного выхода по току от плотности тока в цитратном электролите при $t=45^{\circ}\text{C}$:

1, 2 – соответственно катодный и анодный выходы по току в базовом электролите состава (г/л) NiSO_4 -160, Na_3Cit -230; NH_4Cl -20; 3 – катодный выход по току для разбавленного электролита состава (г/л) NiSO_4 -100, Na_3Cit -120; NH_4Cl -20; 4, 5 – соответственно анодный и катодный выходы по току, определенные без хлорида аммония в базовом цитратном электролите

Уменьшение концентрации цитрата натрия (рис. 3) в растворе вызывает смещение катодного потенциала в положительную сторону и увеличение катодного выхода по току для никеля. Увеличение V_t для никеля при снижении концентрации цитрата в разбавленных щелочных растворах сульфата никеля обусловлено [5] тем, что возрастает активная площадь никелевого катода, вследствие меньшего образования на его поверхности малорастворимых цитратных комплексов никеля, а также оксидных и гидроксидных соединений никеля.

Стабильность комплексов характеризует константа нестойкости: с повышением содержания цитратных лигандов и повышением отрицательного заряда анионного комплекса pK возрастает, устойчивость комплексов повышается. Например, величины показателей констант нестойкости цитратных комплексов при $pH=7-8$ в зависимости от числа лигандов в составе комплекса следующие:

$[\text{Ni}(\text{H}_2\text{Cit})]$ - $pK=4,4$; $[\text{Ni}(\text{HCit})]$ - $pK=7,85$; $[\text{Ni}_2\text{H}_2\text{Cit}_2]^{3-}$ - $pK=21,6$; $[\text{Ni}_2\text{H}_2\text{Cit}_2]^{4-}$ - $pK=30,3$.

Скорость осаждения никеля в значительной степени зависит от числа лигандов и при уменьшении концентрации цитрата в электролите оно соответственно уменьшается, снижая отрицательный заряд комплекса. Это приводит к уменьшению кинетических затруднений осаждения никеля.

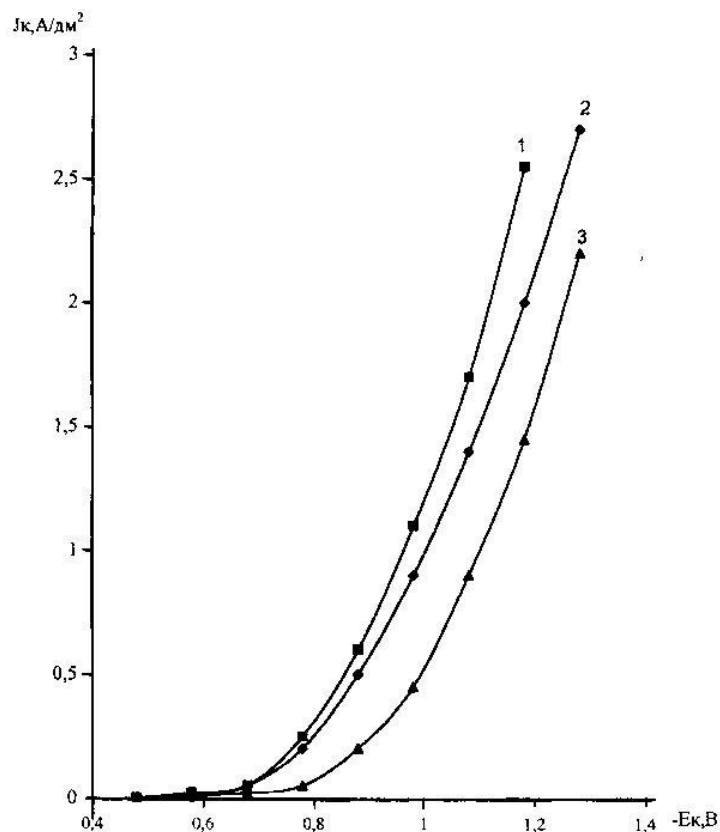


Рис. 3. Кривые катодной поляризации электроосаждения никеля из цитратного электролита $t=45^{\circ}\text{C}$, содержащего (г/л) NiSO_4 -100, NH_4Cl -20 при концентрации цитрата натрия: 1 – 120; 2 – 160; 3 – 200

Образующаяся на катодной поверхности пленка из малорастворимых соединений может включаться в катодный осадок и ухудшать функциональные свойства покрытий. Таким образом, уменьшение концентрации цитрата должно положительно сказаться и на функциональных свойствах никелевых и никель-борных покрытий. Хлорид аммония оказывает влияние, как на катодную, так и на анодную стадию процесса осаждения никеля.

В цитратном электролите базового состава на катодной поляризационной кривой наблюдается область перегиба, что может свидетельствовать о наличии предельного тока, осаждения никеля (рис. 4). Катодный выход по току при этом не достигает 100% , так как некоторая доля тока идет на выделение водорода (рис. 2).

Введение в электролит в качестве дополнительного лиганда хлористого аммония приводит к уменьшению величины катодной поляризации вследствие увеличения концентрации разряжающихся ионов за счет образования менее прочных аммиачных комплексов, скорость электроосаждения никеля возрастает. Очевидно, в прикатодном пространстве часть ионов NH_4^+ может переходить в форму NH_3 с образованием нового менее прочного комплекса $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$, способного разряжаться непосредственно на катоде с меньшей поляризацией [5].

При увеличении pH раствора в ходе электролиза равновесие смещается в правую сторону:



В результате этого увеличивается концентрация $[\text{Ni}(\text{NH}_3)_4]^{2+}$ и тем самым повышается предельный ток, а катодная поляризация снижается (рис. 4).

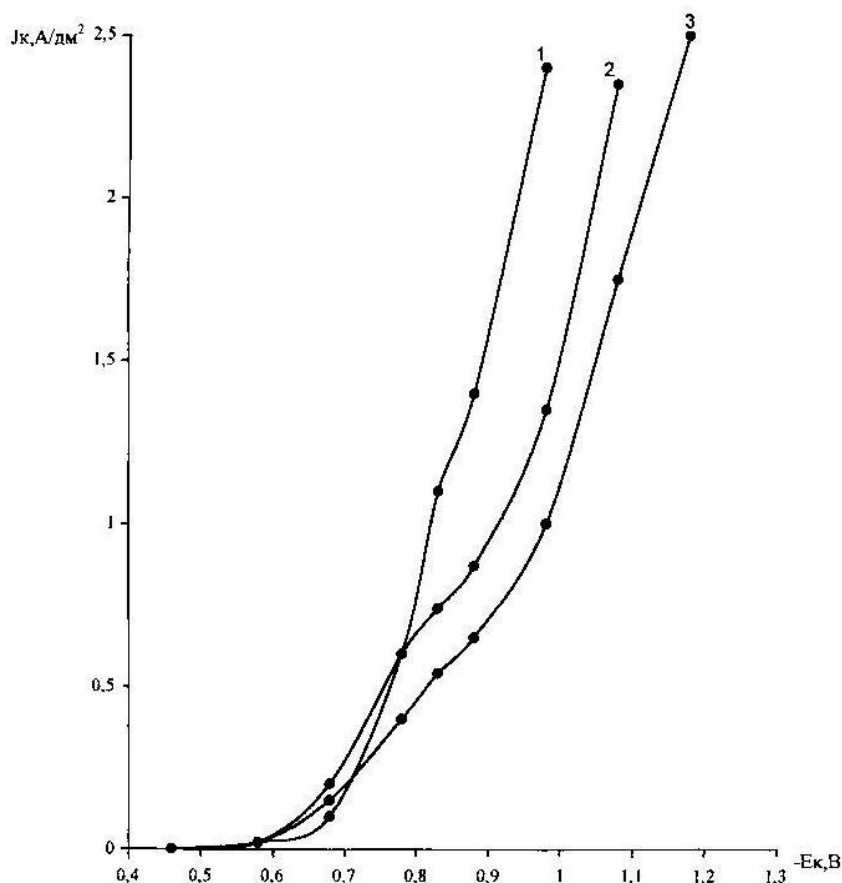


Рис. 4. Кривые катодной поляризации электроосаждения никеля в цитратном электролите, содержащего (г/л) NiSO_4 -160, $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ -230, при 45°C :
 1 – в присутствии NH_4Cl (20 г/л); 2 – без NH_4Cl ; 3 – с добавкой NaCl (20 г/л)

С ростом концентрации ионов NH_4^+ в приэлектродном слое повышается содержание комплексов, показатель константы нестойкости у которых при $\text{pH}=7-8$ имеет относительно высокое значение: для $\text{Ni}(\text{NH}_3)_2^{2+}$ – $\text{pK}=13,71$, а для комплекса $\text{Ni}(\text{NH}_3)_5^{2+}$ – $\text{pK}=38,15$. Преобладание положительно заряженных аммиачных комплексов при увеличении количества лиганда - аммония, способствует протеканию катодного процесса с меньшими поляризационными затруднениями (рис. 5).

Кроме того, ионы NH_4^+ могут образовывать при взаимодействии с гидроксильными ионами, находящимися у катодной поверхности, аммиак, который растворяет гидроксид никеля, в той или иной степени влияющий на твердость получаемого осадка и его внутреннее напряжения [1, 5]. Таким образом, изменение концентрации хлорида аммония влияет на свойства осаждаемых никелевых и никель-борных покрытий.

С целью выявления действия ионов хлора на катодный процесс осаждения никеля поляризационные кривые были сняты для цитратного электролита, в котором хлорид аммония замещался на соответствующее количество хлорида натрия. Наблюдаемая катодная поляризация процесса возрастает вследствие конкуренции механизмов переноса ионов Na^+ и Ni^{2+} , катодный выход по току заметно снижается (рис. 2). Катион, с которым вводится хлор-ион, существенного влияния на анодную поляризацию не оказывает (рис. 6). Анодный выход по току (рис. 2) остается постоянным, так как хлор-ион действует как эффективный депассиватор никелевых анодов.

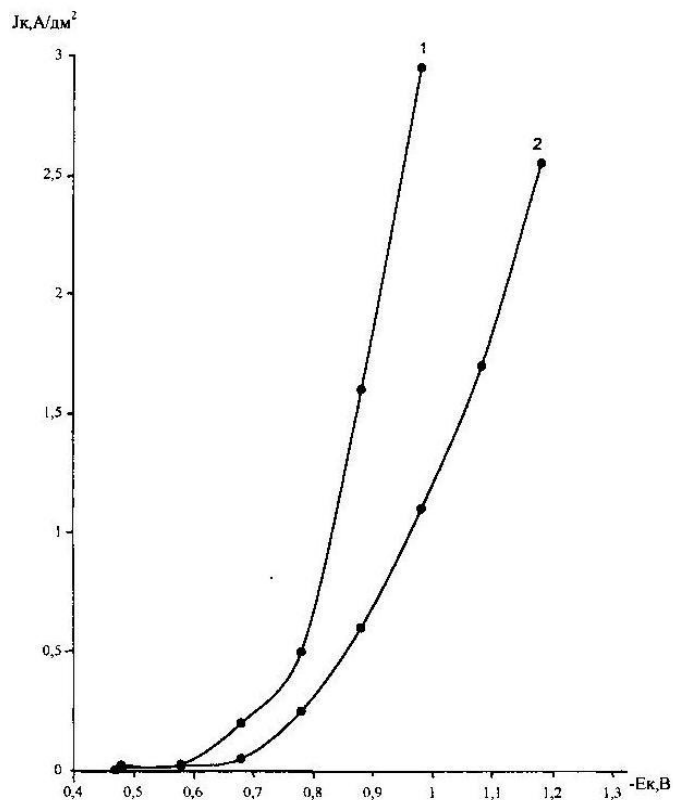


Рис. 5. Катодные поляризационные кривые, полученные при осаждении никеля из цитратного электролита состава (г/л) NiSO₄-100, Na₃C₆H₅O₇-160 с различным содержанием NH₄Cl: 1 – 50 г/л; 2 – 20 г/л

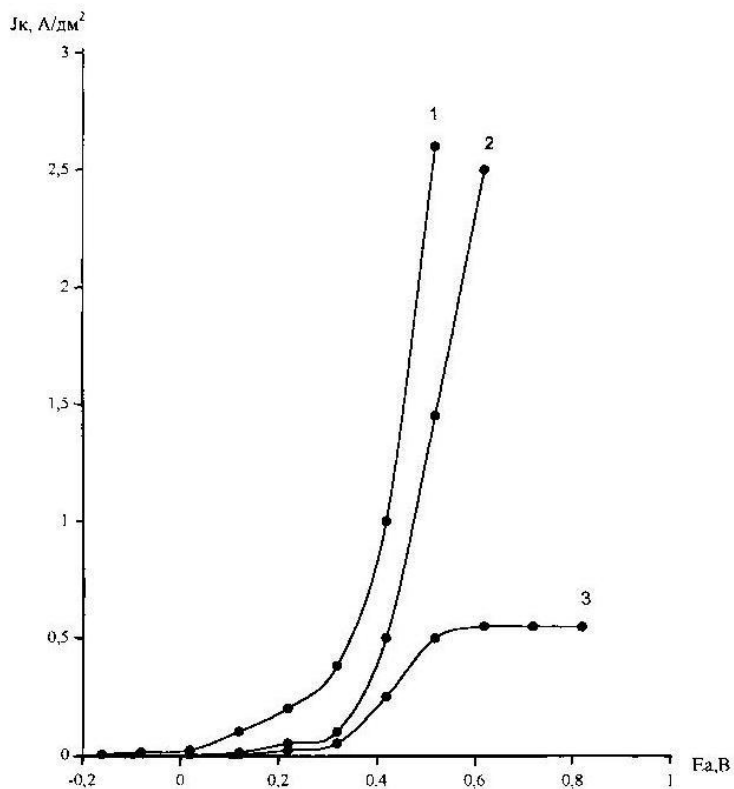


Рис. 6. Анодные поляризационные кривые электроосаждения никеля в цитратном электролите основного (базового) состава: 1 – с добавкой NaCl (20 г/л); 2 – в присутствии NH₄Cl (20 г/л); 3 – без NH₄Cl

Для определения стабильности электролита в присутствии вышеуказанных комплексных соединений был проведен следующий эксперимент: электролиты, содержащие помимо сульфата никеля (100 г/л) цитрат натрия – 120 г/л или хлорид аммония – 20 г/л, при определенных рН, соответствующих образованию комплексов, выстаивались при температуре около 5°C в течение одного месяца. По окончании эксперимента визуально отмечалось присутствие труднорастворимых осадков в растворе. Осадки зеленого цвета наблюдались в электролите состава: $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 100 г/л и $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ – 120 г/л при всех рН, изменяющихся от 6 до 7,5 с интервалом 0,5.

При тех же значениях рН в электролите, содержащем вместо цитрата хлорид аммония при той же концентрации сульфата никеля не отмечено выпадение твердой фазы в электролите. Очевидно, соли никеля, содержащие цитратные комплексы, обладают меньшей растворимостью, чем аммонийно-сульфатные.

На основании проведенных исследований предложено использовать разбавление цитратного электролита по сульфату и цитрату никеля. Разбавленный электролит содержит $\text{NiSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ – 100 г/л и $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7$ – 120 г/л, NH_4Cl – 20 г/л и имеет характеристики, близкие к характеристикам используемого ранее концентрированного электролита, в частности выход по току составляет 93-95% при рабочей плотности тока 1 А/дм^2 , что удовлетворяет условиям традиционного процесса осаждения никеля и его сплавов.

Библиографический список

1. **Пурин, В.А.** Электроосаждение ряда металлов из комплексных (нецианистых) электролитов / В.А. Пурин. – Л.: ЛДНТП, 1968. – 32 с.
2. **Рогожин, В.В.** Электрохимическое осаждение функциональных покрытий никель-бор: монография / В.В. Рогожин; НГТУ. – Н. Новгород, 012. – 112 с.
3. **Грилихес, С.Я.** Электролитические и химические покрытия / С.Я. Грилихес, К.И. Тихонов. – Л.: Химия, 1990. – 288 с.
4. Пат. 2329337/С1 РФ МКИ8 С25Д3/56. Электролит для электрохимического осаждения покрытий никель-бор / Е.Ю. Ананьева, В.В. Рогожин.
5. **Ясконене, С.И.** Исследование процессов электроосаждения никеля из цитратных растворов: дисс. ... канд., Вильнюс, 1979. – 102 с.
6. **Рогожин, В.В.** Повышение работоспособности цитратного электролита никелирования / Е.Ю. Ананьева, В.В. Бенсон, М.Г. Михаленко // Труды НГТУ. 2012. № 4. С. 266–272.
7. **Ананьева, Е.Ю.** Особенности электроосаждения покрытий никель-бор из электролитов с добавкой диметиламинборана (ДМАБ) / Е.Ю. Ананьева, В.В. Рогожин // Гальванотехника и обработка поверхности. 2005. №1. С. 23–27.

*Дата поступления
в редакцию 26.04.2013*

V.V. Rogozhin, E.Y. Ananieva, M.G. Mikhailenko

FEATURES of an ELECTRODEPOSITION NICKEL COVERS FROM DILUTED AMMONIUM-CITRIC ELECTROLYTES

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

The capability of increase function ability ammonium-citric nickel electrolytes is investigated by means of them dilute. On the basis potentiostatic and coulometric methods the influence of electrolytes diluting on a selection of its activity mode is shown. Is established, that diluting of an electrolytes basic components eliminates occurrence insoluble salts in volume, the quality received nickels covers does not worsen, thus the size of a current efficiency for nickel varies a little.

Key worlds: electroplating, nickel and nickel-boron coatings, ammonium-citric electrolytes.

УДК 543. 386

Е.П. Комова, Е.В. Скоробогатова, А.П. Арбатский, В.Р. Карташов

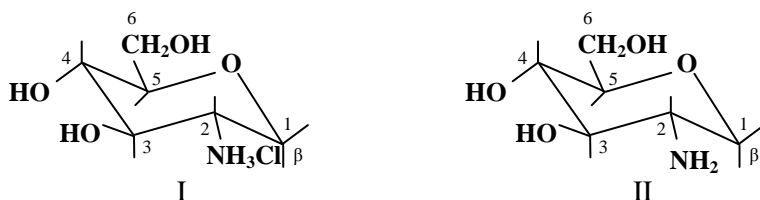
ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОСТАВА КОМПЛЕКСОВ ГЛЮКОЗАМИНА С ИОНАМИ D-МЕТАЛЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Установлено комплексообразование глюкозамина, содержащего 27% аминогрупп в непротонированной форме с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} . Методом электронной спектроскопии подтверждено, что лигандами в образующихся комплексах являются глюкозамин и гидрохлорид глюкозамина, а образование координационной связи осуществляется за счет атомов азота и кислорода лигандов. Определены составы образующихся комплексов.

Ключевые слова: глюкозамин, d-металлы, комплексообразование.

Ранее в работах [1, 2] было установлено взаимодействие гидрохлорида глюкозамина (I), в котором аминогруппы находятся в протонированном состоянии, с ионами Zn^{2+} , Cu^{2+} и отсутствие его взаимодействия с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} .



Известно, что глюкозамин (II) в растворах – достаточно нестабильное соединение и легко подвергается различного рода окислительным процессам. Но исследование комплексообразования глюкозамина с ионами d-металлов представляет большой интерес, поскольку $-\text{NH}_2$ группа - лиганд более сильного кристаллического поля.

В литературе имеются весьма немногочисленные и противоречивые сведения о взаимодействии глюкозамина с ионами металлов. Глюкозамин имеет кроме атомов кислорода донорный атом азота, для которого можно ожидать образования различного типа комплексов, в том числе и хелатных с участием атомов кислорода и азота. Однако согласно данным полярографических исследований [3] глюкозамин в водном растворе образует лишь незначительное количество комплексов с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} . С другой стороны, согласно данным потенциометрических и спектральных исследований, глюкозамин в водных растворах в интервале pH 6-9 [4] взаимодействует с ионами Cu^{2+} с образованием комплексов состава лиганд : металл = 2:1. Предполагается образование двух типов комплексов с участием в образовании донорно-акцепторной связи либо двух атомов азота $-\text{NH}_2$ групп глюкозамина, либо группы $-\text{NH}_2$ и атома O^- из депротонированной гидроксильной группы при повышенных значениях pH. Это предположение согласуется и с данными работ [5, 6], где показано, что при взаимодействии ряда ионов металлов с углеводами комплексообразование в кислой и слабокислой среде происходит только с участием полуацетального кислорода углевода. Ранее нами в работе [7] подобные взаимодействия наблюдались для хитозана, который взаимодействует с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} в водном растворе 0.2 М уксусной кислоты, где аминогруппа частично протонирована. Было показано, что координация ионов металлов с лигандом может осуществляться за счет аминогрупп как в протонированном ($-\text{NH}_3^+$), так и в непротонированном ($-\text{NH}_2$) состоянии.

В данной работе приведены результаты исследования взаимодействия глюкозамина(II) с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} и Cu^{2+} в водном растворе при pH, равном 7,8.

В работе был использован гидрохлорид глюкозамина (молекулярная масса 215,64, содержание основного вещества в образце не менее 98%). Глюкозамин получали частичной нейтрализацией раствора гидрохлорида глюкозамина гидроксидом натрия до значения pH, равного 7,8, что соответствует образованию 27% непротонированных $-\text{NH}_2$ групп. В пределах этих значений pH ионы металлов существуют в виде аквакомплексов примерно до 80% [8]. Соли металлов использовали в виде кристаллогидратов соответствующих нитратов марки ч.д.а. Концентрации солей в водных растворах определяли по общепринятым методикам [9], а содержание глюкозамина в растворах определяли методом, описанным в работе [10]. Реакции проводили при начальных концентрациях лиганда ($[\text{L}]_0$), в расчете на исходный гидрохлорид глюкозамина, и ионов металлов ($[\text{M}^{2+}]_0$) от 0,02 до 0,08 моль/л ($t = 25^\circ\text{C}$). Соотношения $[\text{L}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$ изменяли от 1:4 до 4:1. Постоянную ионную силу растворов поддерживали добавкой NaClO_4 . Исследование реакционных смесей в растворе проводили методом электронной спектроскопии на спектрофотометре СФ-26 при длинах волн 340-1100 нм в кварцевых кюветах с толщиной поглощающего слоя 1 см, а также методом кондуктометрического анализа титрованием реакционных смесей раствором NaOH на кондуктометре Импульс КЛ-2.

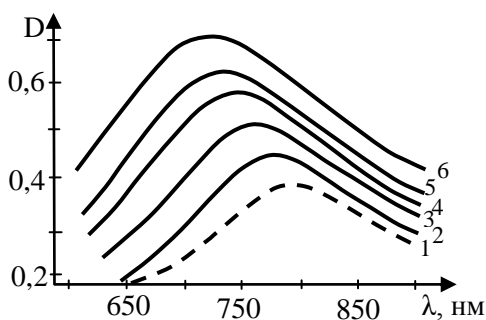


Рис. 1. Электронные спектры раствора $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ 0,03 моль/л (1) и его смесей с глюкозамином при концентрации лиганда 0,03 моль/л (2), 0,06 моль/л (3), 0,09 моль/л (4), 0,12 моль/л (5) и 0,15 моль/л (6) (0,5 М NaClO_4)

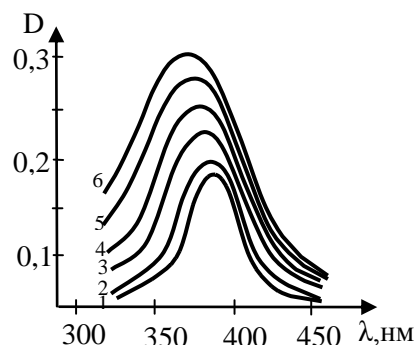


Рис. 2. Электронные спектры раствора $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ 0,03 моль/л (1) и его смесей с глюкозамином при концентрации лиганда 0,03 моль/л (2), 0,06 моль/л (3), 0,09 моль/л (4), 0,12 моль/л (5) и 0,15 моль/л (6) (0,5 М NaClO_4)

На рис. 1-3 приведены электронные спектры поглощения раствора частично протонированного глюкозамина с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} при постоянной начальной концентрации ионов металлов и различных концентрациях лиганда. Наблюдается смещение максимумов полос поглощения в коротковолновую область и происходит усиление их интенсивности. Подобные явления происходят при замещении в координационной сфере аквакомплекса ионов металлов аквалиганда на глюкозаминный лиганд, поскольку шестикоординационные аминокомплексы поглощают при более коротких длинах волн, чем аквакомплексы [11]. При замещении одного аквалиганда на лиганд с аминогруппой это смещение должно составлять около 6,6-6,8 нм, что и наблюдается в приведенных электронных спектрах. Эти данные указывают на участие в комплексообразовании

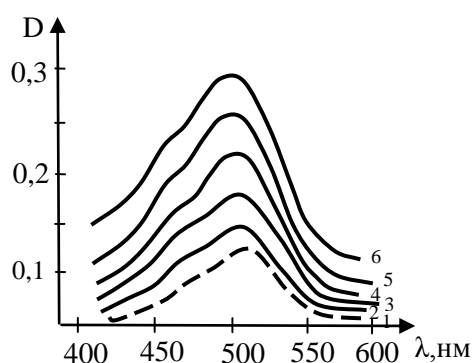


Рис. 3. Электронные спектры раствора $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ 0,03 моль/л (1) и его смесей с глюкозамином при концентрации лиганда 0,03 моль/л (2), 0,06 моль/л (3), 0,09 моль/л (4), 0,12 моль/л (5), 0,15 моль/л (6), (0,5 М NaClO_4)

глюкозамина, который образуется при нейтрализации гидрохлорида глюкозамина гидроксидом натрия.

Эффективное взаимодействие компонентов раствора, на которое указывают изменения в электронных спектрах, подтверждено и данными кондуктометрического анализа, причем не только для ионов Co^{2+} , Ni^{2+} , Cu^{2+} , но и Zn^{2+} , Cd^{2+} (табл. 1). Равновесные количества реагентов определяли, как описано в работах [12, 13], по полученным данным рассчитывали степень превращения лиганда (x_L) и ионов металлов (x_M) в комплекс. При взаимодействии глюкозамина с ионами Cu^{2+} компоненты реакционной смеси кондуктометрическим титрованием отдельно не определяются, что может указывать на практически полное связывание иона металла данным лигандом.

Таблица 1

Степень превращения лиганда и ионов металлов в комплекс в реакциях частично протонированного глюкозамина с ионами Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+}

$[\text{L}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$	Co^{2+}		Ni^{2+}		Zn^{2+}		Cd^{2+}	
	x_M	x_L	x_M	x_L	x_M	x_L	x_M	x_L
4:1	0,36	0,38	0,49	0,51	0,47	0,76	0,54	0,53
3:1	0,37	0,36	0,44	0,42	0,45	0,72	0,52	0,49
2:1	0,34	0,36	0,41	0,43	0,40	0,72	0,48	0,47
1,4:1	0,35	0,37	0,39	0,40	0,41	0,71	0,44	0,45
1:1	0,35	0,39	0,37	0,39	0,38	0,68	0,45	0,43
1:1,4	0,23	0,32	0,36	0,33	0,34	0,70	0,42	0,40
1:2	0,26	0,30	0,33	0,32	0,30	0,69	0,43	0,42
1:4	0,22	0,29	0,31	0,31	0,29	0,66	0,41	0,40

По данным электронной спектроскопии определяли составы образующихся комплексов. На рис. 4, 5 приведены зависимости оптической плотности (D) от соотношения $[\text{L}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$ в реакциях глюкозамина с ионами Cu^{2+} и Ni^{2+} .

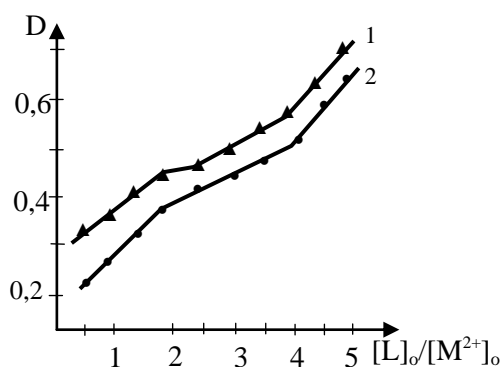


Рис. 4. Зависимости оптической плотности (D) электронных спектров поглощения от $[\text{L}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$ при λ 760 нм (1) и 700 нм (2) для смесей глюкозамина с $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2$ при $C_{\text{Cu(II)}} = 0,03$ моль/л

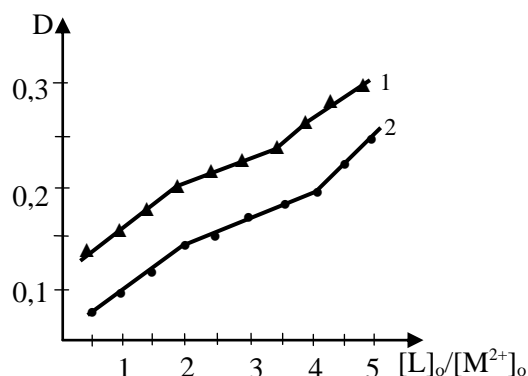


Рис. 5. Зависимости оптической плотности (D) электронных спектров поглощения от $[\text{L}]_0/[\text{M}^{2+}]_0$ при λ 380 нм (1) и 360 нм (2) для смесей глюкозамина с $\text{Ni}(\text{NO}_3)_2$ при $C_{\text{Ni(II)}} = 0,03$ моль/л

Полученные зависимости имеют изломы, указывающие на то, что при взаимодействии частично протонированного глюкозамина с ионами Cu^{2+} и Ni^{2+} в обоих случаях образуется два типа комплексов, имеющих состав лиганд : металл – 2:1 и 4:1. Составы комплексов при взаимодействии глюкозамина с ионами Co^{2+} определяли методом Жоба-Остромысленского. На рис. 6 приведены зависимости приращения оптической плотности (ΔD) от мольной доли реагента, в данном случае глюкозамина ($X_{\text{Гл}}$). Положения максимумов

полученных зависимостей указывают на образование комплексов в реакции глюкозамина с ионами Co^{2+} состава лиганд:металл - 1:1 и 4:1.

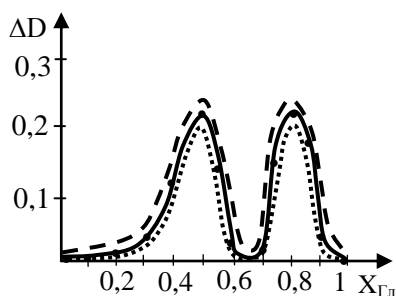


Рис. 6. Зависимость приращения оптической плотности (ΔD) от мольной доли глюкозамина для смесей глюкозамина с $\text{Co}(\text{NO}_3)_2$ при λ 490 нм (—), 505 нм (···) и 520 нм (--)

может быть только гидрохлорид глюкозамина, а комплексообразование в исследуемых системах может осуществляться с участием атомов кислорода гидроксильных групп и углеводного кольца гидрохлорида глюкозамина.

Кроме того, учитывая, что в реакции с ионами Zn^{2+} очень высока степень связывания смешанного лиганда (табл. 1) и что ионы этого металла образуют комплекс с гидрохлоридом глюкозамина [1], можно полагать, что при взаимодействии глюкозамина с ионами Zn^{2+} образуются два комплекса состава 2:1. В одном из них лигандами являются глюкозамин и гидрохлорид глюкозамина, координация осуществляется, как описано ранее. В другом комплексе можно полагать, что в качестве обеих молекул лиганда выступает гидрохлорид глюкозамина. Одна из координационных связей образуется в результате взаимодействия иона металла с атомом кислорода углеводного кольца гидрохлорида глюкозамина, поскольку его донорная способность выше атомов кислорода гидроксильных групп, и он стерически более доступен. Координация второго лиганда, осуществляется, по-видимому, за счет водородных связей между атомами водорода гидрохлоридного иона и аквалигандами цинка.

Выводы

1. Установлено комплексообразование при взаимодействии ионов Co^{2+} , Ni^{2+} , Zn^{2+} , Cd^{2+} , Cu^{2+} со смесью глюкозамина и гидрохлорида глюкозамина в соотношении 1:2,7 % мол.
2. Определены составы образующихся комплексов смешанного лиганда с ионами металлов в соотношении лиганд : металл - 2:1 и 4:1 для ионов Cu^{2+} и Ni^{2+} , 1:1 и 4:1 для ионов Co^{2+} и Cd^{2+} , 2:1 для ионов Zn^{2+} .
3. Показано, что лигандами в образующихся комплексах с ионами всех исследуемых металлов являются гидрохлорид глюкозамина и глюкозамин; в образовании координационной связи участвуют атомы азота и кислорода данных лигандов; комплексообразование ионов металлов с лигандами осуществляется за счет аминогрупп как в протонированном ($^+\text{NH}_3$), так и в непротонированном ($-\text{NH}_2$) состоянии, и с участием атомов кислорода гидроксильных групп и углеводного кольца гидрохлорида глюкозамина.

Библиографический список

1. **Скоробогатова, Е.В.** Исследование взаимодействия гидрохлорида хитозана и гидрохлорида глюкозамина с ионами d-металлов в водных растворах / Е.В. Скоробогатова, Е.П. Трактина, И.И. Гринвальд и др. // Современные перспективы в исследовании хитина и хитозана: матер. 9 Междунар. конф. – Ставрополь. 2008. С. 99–102.

2. **Комова, Е.П.** Координационные взаимодействия глюкозамина, хитозана и гидрохлоридов с ионами d-металлов в водных растворах: дисс. ... канд. хим. наук. – Нижний Новгород. 2008. – 107 с.
3. **Urbanska, J.** Polarographic studies on the complexation of cobalt(II), nickel(II) and copper(II) with D-glucosamine and D-galactosamine / J. Urbanska, H. Kozlowski, A. Delannoy, J. Hennion // J. Anal. Chim. Acta. 1988. Vol. 207. N 1. P. 85-94.
4. **Месера, G.** Copper(II) complexation by D-glucosamine. Spectroscopic and potentiometric studies / G. Mesera [et al.] // Inog. Chim. Acta. 1985. Vol. 107. N 1. P. 45-48.
5. **Крупенский, В.И.** О комплексообразовании переменно-валентных металлов с ксилозой и глюкозой в кислой среде / В.И. Крупенский, И.И. Корольков, Т.В. Долгая // Химия древесины. 1977. № 1. С. 92-94.
6. **Крупенский, В. И.** О дегидратации моносахаридов под влиянием солевых катализаторов / В.И. Крупенский, И.И. Корольков, Т.В. Долгая // Журнал прикладной химии. 1977. Т. 50. № 6. С. 1334-1337.
7. **Комова, Е.П.** Взаимодействие хитозана с ионами некоторых d-металлов в водном растворе уксусной кислоты / Е.П. Комова, Е.В. Скоробогатова, А.П. Арбатский, В.Р. Карташов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. 2012. № 2 (95). С. 252-257.
8. **Назаренко, В.А.** Гидролиз ионов металлов в разбавленных растворах / В.А. Назаренко, В.П. Антонович, С.М. Невская. – М.: Атомиздат, 1979. – 197 с.
9. **Шарло, Г.** Методы аналитической химии. Количественный анализ неорганических соединений / Г. Шарло. – М.: Химия, 1966. – 975 с.
10. **Арбатский, А.П.** Исследование химических свойств хитозана титриметрическим методом / А.П. Арбатский, Е.П. Трактина, Л.А. Смирнова // Журнал прикладной химии. 2006. Т. 79. Вып. 2. С. 272-274.
11. **Ливер, Э.** Электронные спектры неорганических соединений: [пер. с англ. под ред. А.Ю. Цивадзе] / Э. Ливер. – М.: Мир, 1967. Ч. 2. – 443 с.
12. **Скоробогатова, Е. В.** Взаимодействие солей никеля (II) и кобальта (II) с гидрохлоридом и ацетатом хитозана в водных растворах / Е.В. Скоробогатова [и др.] // Журнал прикладной химии. 2008. Т. 81. Вып. 4. С. 672-677.
13. **Нудьга Л.А.** Алкилирование хитозана / Л.А. Нудьга, Е.А. Плиско, С.Н. Данилов // Журнал общей химии. 1973. Т. 43. № 12. С. 2752-2756.
14. **Свердлова, О.В.** Электронные спектры в органической химии / О. В. Свердлова. – Л.: Химия, 1985. – 247 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.04.2013*

E.P. Komova, E.V. Skorobogatova, A.P. Arbatsky, V.R. Kartashov

DEFINITION OF STRUCTURE THE GLYCOSAMINE WITH D-METALL IONS COMPLEXES

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

Purpose: To establish the glycosamine complex formation in a water solution with ions of cobalt, nickel, zinc, cadmium, copper. To define a structures of being formed complexes.

Design/methodology/approach: The analysis of reactionary mixes by the konduktometric method titration of a sodium hydroxide. Reception of electronic spectrum from reactionary mixes solutions by the electronic spectroscopy method.

Findings: Participation in formation of coordination communication nitrogen atoms of amino groups in protonated and in not protonated condition and oxygen atoms of hydroxyl groups and a carbohydrate ring of the ligands is established. The structures of being formed complexes are defined.

Research limitations/implications: The given work results can be used, for example, in biologically-active additives on glycosamine basis productions.

Originality/value: The structures of glycosamine complexes with d-metals ions in a water solution are defined and probable schemes of a complex formation are offered.

Key words: glycosamine, d-metals, a complex formation.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 330.322.2

Ю.В. Трифонов¹, С.Н. Яшин², Е.В. Кошелев¹

ПЛАНИРОВАНИЕ МОДЕРНИЗАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ ПРОИЗВОДСТВЕННОЙ КОМПАНИИ МЕТОДОМ РЕАЛЬНЫХ ОПЦИОНОВ

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева²

Цель работы: Оценка эффективности проекта модернизации оборудования производственной компании.

Методология: Достижение указанной цели осуществляется с использованием модели Блэка-Шоулза, уточненной и модифицированной биномиальной модели и модифицированной триномиальной модели.

Результаты и область их применения: Результатом исследования является модифицированная триномиальная модель азиатского реального опциона проекта модернизации оборудования с постоянной волатильностью бизнеса.

Выводы: Наиболее точную оценку реального опциона и всего проекта модернизации оборудования в целом дает триномиальная модель.

Ключевые слова: модернизация оборудования, оценка реального опциона, азиатский опцион, постоянная волатильность, биномиальная модель, триномиальная модель.

В настоящее время технический прогресс во многом обуславливает повышение материального благосостояния общества. Однако при этом важно правильное понимание процессов внедрения технических и технологических инноваций в социальную деятельность человека, прежде всего в сфере экономического развития общества. Таким образом, экономическое внедрение, в первую очередь, технических инноваций в ведущих и развивающихся компаниях во многом предопределяет успешность функционирования экономики страны, что непосредственно влияет на повышение материального уровня жизни населения.

В Стратегии инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года, утвержденной Минэкономразвития России в 2010 г. [10], указывается, что «важным инструментом формирования национальных приоритетов технологического развития и объединения усилий бизнеса, науки, государства по их реализации станут технологические платформы.

Содействие формированию и реализации технологических платформ направлено на решение», в числе прочих, «следующих задач:

- усиление влияния бизнеса и общества на определение и реализацию важнейших направлений научно-технологического развития;
- выявление новых научно-технологических возможностей модернизации существующих секторов и формирование новых секторов российской экономики;
- настройка инструментов государственной политики по стимулированию инноваций, поддержке научно-технической деятельности и процессов модернизации компаний с учетом специфики и вариантов развития отраслей и секторов российской экономики.»

В таком контексте создание соответствующих экономических и финансовых технологий успешного внедрения технических инноваций является одной из первоочередных задач

производственных компаний. Одним из таких направлений является теория и практика реальных опционов, которые уже достаточно давно используются в бизнесе с того момента, когда опционные технологии фондового рынка были впервые адаптированы к потребностям производства. Сам термин «реальный опцион» ввел в финансовую науку Стюарт Майерс [21]. С тех пор понятие «реального опциона» серьезно прогрессировало, развившись как в отдельное глобальное научное направление, так и в достаточно широкую сферу практического приложения в бизнесе.

Несмотря на широкий охват различных направлений бизнеса технологиями реальных опционов, бум этого метода финансового анализа и стратегического планирования прошел еще в 1990-х годах. Сейчас многие сайты, посвященные реальным опционам, такие, как, например, www.real-options.com, выглядят откровенно устарелыми, и лишь некоторые из них, такие, как, например, www.realoptions.org, продолжают проводить серьезные исследования в этом направлении, но уже в чисто научной сфере, используя для этого все чаще аппарат стохастической финансовой математики.

В выпуске журнала *The Economist* от 14 августа 1999 г. в рамках традиционной странички *Economics Focus* было приведено мнение: реальные опционы смогут получить широкое распространение на практике только после того, как большинство менеджеров будут иметь докторскую степень по прикладной математике. Однако многим ведущим компаниям мира именно использование реальных опционов помогло серьезно обогнать своих конкурентов в бизнесе, значительно увеличив при этом свою рыночную капитализацию. Пожалуй, наиболее ярким примером здесь является компания *Amazon.com*, которую в свое время даже прозвали «шведским столом из реальных опционов» [4].

Разумное понимание этой проблемы, на наш взгляд, должно предполагать поступательность познания истинных потребностей и задач экономики в целом и бизнеса в частности. Так, уже давно в инструментарий бизнесменов и финансовых аналитиков вошло использование в своей работе компьютерного обеспечения, которое значительно ускоряет процессы принятия управленческих решений. Построить элементарную линейную регрессию для прогнозирования каких-либо экономических показателей сейчас можно почти в любой программе, в том числе и в *MS-Excel*. Другим примером является использование в финансовых расчетах линейного и целочисленного программирования, которые необходимы в ряде инвестиционных задач. Тем не менее, сама теория этих методов подразумевает серьезные познания в области прикладной математики.

Для реальных опционов тоже уже давно существуют соответствующие программные обеспечения, позволяющие достаточно легко ввести исходные данные в программу и быстро получить конечный результат в виде конечной цифры, означающей, например, стоимость реального опциона, которую затем можно прибавить к NPV инвестиционного проекта. Такая процедура уже ни у кого из бизнесменов и аналитиков не вызывает внутреннего неприятия, поскольку она элементарна.

Однако этим вовсе не должно исчерпываться использование реальных опционов в практике ведения бизнеса. Причин для этого, на наш взгляд, две.

1. Многие ученые, например, Джулиан Рош [4], справедливо утверждают, что с реальными опционами связано много чисто технических проблем финансового характера, к числу которых в первую очередь следует отнести то, что значительное число фирм предпочитают иметь в своем арсенале реальные опционы, но при этом их не исполнять. Это приводит к неоправданному завышению ценности инвестиционных и инновационных проектов, которые в реальности могут оказаться даже убыточными. Это негативно влияет на будущую рыночную стоимость такой фирмы.

2. Сам принцип построения и анализа реального опциона должен концентрировать свое внимание прежде всего на постановке финансовой задачи, так как неправильно сформулированные инвестором цели однозначно приведут его к ошибочным, а потому неэффективным управленческим решениям. Правильное понимание инвестором того, что он хочет по-

лучить от бизнеса, гораздо важнее самих математических методов решения во многом стандартных задач. Попросту говоря, правильная постановка задачи – это уже наполовину решенная задача.

Учет указанных причин поможет переместить основное внимание на более адекватное построение реального опциона в целях решения задачи модернизации оборудования компании. И только после этого возможен выбор наиболее оптимального метода оценки опциона.

Реальный опцион на модернизацию оборудования является классическим «опционом на будущее развитие» [3]. При анализе перспектив будущего развития ценность опциона обычно прибавляется к ценности бизнеса или проекта, определенной по традиционной DCF-технологии. В качестве цены исполнения опциона K используются вложения капитала в развитие (расширение, тиражирование опыта). Текущая ценность базисного актива S_0 – это приведенная к сегодняшнему дню оценка денежных потоков, которые генерируются бизнесом (довольно часто она меньше, чем цена исполнения). Время t в моделях применительно к реальным опционам – это срок, в течение которого возможно принять решение о расширении бизнеса.

Реальный опцион модернизации оборудования должен быть азиатским, т. е. иметь переменную цену исполнения, например, в зависимости от инфляции, поскольку деньги, в том числе инвестиции, в разные моменты времени стоят по-разному.

Классический фондовый азиатский опцион – это разновидность опциона, при которой цена исполнения определяется на основе средней стоимости базисного актива за определенный период времени. Азиатский опцион еще называют опционом средней цены или среднecурсовым опционом. Как правило, такие опционы заключаются на товары, биржевые индексы, курсы валют и процентные ставки. Азиатские опционы популярны на рынках с высокой волатильностью базисных активов (нефть, цветные металлы и др.) [13].

Отличительная особенность опционов данного типа заключается в том, что цена исполнения (страйк) неизвестна на момент заключения контракта. Один из основных вариантов азиатских опционов подразумевает плавающую цену страйк (она же плавающая ставка) азиатского опциона [13]. В этом случае цена колл-опциона:

$$C(T) = \max \{S(T) - kA(0, T), 0\}, \quad (1)$$

где $A(0, T)$ – среднее значение стоимости базисного актива; k – взвешивание (обычно 1 исключается из описаний).

Обычно $A(0, T)$ – это среднее арифметическое. При постоянном мониторинге его вычисляют следующим образом:

$$A(0, T) = \frac{1}{T} \int_0^T S(t) dt. \quad (2)$$

При дискретном мониторинге в моменты t_1, t_2, \dots, t_n :

$$A(0, T) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(t_i). \quad (3)$$

Существуют также азиатские опционы, где среднее значение вычисляется как среднее геометрическое. При постоянном мониторинге его вычисляют по формуле:

$$A(0, T) = \exp \left\{ \frac{1}{T} \int_0^T \ln S(t) dt \right\}. \quad (4)$$

Азиатские опционы – это инвестиционные инструменты с умеренным уровнем риска. Так как цена опциона базируется на данных о цене на базисный актив за определенный период, то инвестор имеет возможность сделать рациональное суждение о целесообразности вложений.

В качестве примера рациональной постановки задачи оценки стоимости реального опциона (задачи ROV) будем рассматривать проект замены оборудования на гидрогеологи-

ческом бурении скважин [3]. Этот же пример будем рассматривать в дальнейшем для сравнения различных методов решения задачи ROV.

Итак, ООО «Водяной» оказывает услуги садовым товариществам Подмоскovie по бурению скважин на воду. Всего на балансе ООО «Водяной» десять буровых установок, работающих на различных объектах и в различных районах области. Директор фирмы рассматривает возможность существенной модернизации буровых агрегатов, которая позволит сократить текущие издержки, повысить производительность установок и соответственно получать больше заказов от потенциальных клиентов. Для решения поставленной задачи руководством фирмы решено провести обоснование модернизации.

Приведем исходные данные для расчетов по наиболее вероятному сценарию развития событий в расчете на один буровой агрегат (табл. 1).

Таблица 1

Исходные экономические данные для расчетов на один буровой агрегат

Наименование показателя	Значение показателя	
	Базовый вариант	Новая техника
Производительность, м/станко-смену	8,1	12,2
Коэффициент использования оборудования по времени	0,5	0,5
Среднее число смен в году	304	304
Средняя цена одного пробуренного метра, долл.	22	22
Средние текущие затраты на одну станко-смену, долл.	123,4	96,1
Чистые капитальные затраты, включая приобретение новых агрегатов за минусом чистой ликвидационной ценности старых, долл.	-	20000

Никаких дополнительных затрат и выгод, связанных с приростом рабочего капитала, в проекте нет. Норма амортизации техники составляет 20%, по истечении пятилетнего срока чистая ценность от ликвидации оборудования равна нулю.

Все расчеты проводились на реальной основе – в постоянном масштабе цен. Исходные финансовые данные для расчетов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Исходные финансовые данные для расчетов на один буровой агрегат

Наименование показателя	Значение показателя (% в год)
WACC компании в реальном выражении	12
Безрисковая ставка	4
Ставка налога на прибыль в РФ	20

Таблица 3

Расчет денежного потока замены одного бурового агрегата

Наименование показателя	Значение показателя по годам					
	0	1	2	3	4	5
1	2	3	4	5	6	7
1. Производительность, м/станко-смену:						
1.1. Новой техники		12,2	12,2	12,2	12,2	12,2
1.2. Базы сравнения		8,1	8,1	8,1	8,1	8,1
2. Коэффициент использования оборудования		0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
3. Среднее число смен в году		304	304	304	304	304
4. Дополнительный объем, м/год ((1.1 – 1.2) × 2 × 3)		623,2	623,2	623,2	623,2	623,2
5. Средняя цена одного метра, долл.		22	22	22	22	22

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7
6. Дополнительная выручка в год, долл. (4×5)		13710,4	13710,4	13710,4	13710,4	13710,4
7. Средние текущие затраты на 1 станко-смену, долл.:						
7.1. Новой техники						
7.2. Базы сравнения		123,4	123,4	123,4	123,4	123,4
8. Среднее число смен в году		96,1 304	96,1 304	96,1 304	96,1 304	96,1 304
9. Дополнительные текущие затраты, долл. в год ($(7.1 - 7.2) \times 8$)		8299,2	8299,2	8299,2	8299,2	8299,2
10. Дополнительные капитальные затраты, долл.	-20000					
11. Норма амортизации, %		20	20	20	20	20
12. Амортизация дополнительных капитальных вложений, долл.		4000	4000	4000	4000	4000
13. Дополнительная прибыль в год, долл. ($6 - 9 - 12$)		1411,2	1411,2	1411,2	1411,2	1411,2
14. Налог на прибыль (20%), долл.		282,24	282,24	282,24	282,24	282,24
15. Чистый денежный поток проекта (CF), долл. ($13 - 14 + 12$)	-20000	5128,96	5128,96	5128,96	5128,96	5128,96
16. WACC, %		12	12	12	12	12
17. NPV проекта, долл.	-1511,25	Результат дисконтирования CF по ставке 12%				

Расчеты, проведенные финансовым директором по традиционной технологии, показывают невыгодность осуществления модернизации ни на одной, ни тем более на десяти буровых установках (табл. 3).

Каждый из проектов снижает богатство владельцев на 1511,25 долл., что по меркам данной компании немалая сумма.

Вместе с тем у директора возникли большие сомнения в результатах расчетов, связанные с точностью предсказания денежных потоков. Дело в той неопределенности, которую несут в себе исходные допущения относительно:

а) количества заказов и связанных с этим текущих затрат на один пробуренный метр (возможна экономия на условно-постоянных расходах) и коэффициента использования оборудования;

б) безотказности работы новой техники и периодичности ремонта;

в) средней глубины пробуриваемых скважин (оплата происходит не по метражу, а по результату бурения – количеству продуктивных скважин) и др.

В результате точность расчета эффекта имеет средне-квадратическое отклонение $\sigma = 40\%$ (средне-статистическое σ (%) в долл. США для отрасли «Машиностроение»).

Чтобы не рисковать всем бизнесом в целом и получить более точную информацию о результатах проекта, директор ООО «Водяной» решает провести эксперимент: несмотря на негативные результаты расчетов, осуществить модернизацию на одном из буровых агрегатов. Если результат окажется удачным (что будет ясно в течение года), можно будет тиражировать опыт на прочих девяти установках. Этот подход вызвал умеренно-негативную реакцию со стороны финансового директора – он расценил данное решение как недоверие к качеству проведенных им расчетов. Чтобы его успокоить, пришлось выписать ему премию и

отправить в краткосрочный отпуск. Однако остался вопрос: чья позиция в данной ситуации оказалась более обоснованной – директора или его заместителя по финансам?

Итак, пилотный проект дает нам информацию о том, что может произойти с последующими девятью, и раскрывает неопределенность. Фактически он дает право в течение года вложить деньги еще в девять таких проектов при благоприятных для этого обстоятельствах (положительным результате пилотного проекта). Это право представляет собой колл-опцион на 9 проектов (или 9 опционов, каждый на 1 проект).

Кроме всего прочего следует учесть, что со временем деньги обесцениваются, даже за срок в один год. Эта проблема особенно актуальна для развивающихся рынков, каковым является Россия. Однако поскольку финансовые расчеты производятся в долл. США, в дальнейших расчетах необходимо учитывать ставку инфляции именно долл. США, которая в среднем за последние годы составляет 3% в год. С учетом этого фактора цена исполнения опциона через год составит величину $K = 20600$ долл. Таким образом, мы приходим к модели азиатского опциона, т. е. опциона с изменяющейся ценой исполнения (в данном случае по ставке инфляции).

Также важно отметить, что при вычислении стоимости опциона мы будем использовать риск-нейтральный подход, поскольку он не предполагает вычисление WACC в каждом отдельном году и не нуждается в расчете реальных вероятностей переходов в пространстве событий.

Решение задачи ROV модернизации оборудования с использованием модели Блэка-Шоулза

К основным проблемам использования модели Блэка-Шоулза (OPM) для оценки реальных опционов необходимо отнести следующие [5, 8, 20, 25]:

1. В OPM входит σ доходности контракта, которое точно спрогнозировать не представляется возможным.
2. Если σ прогнозируется экспертами, то возникает проблема достоверности прогноза.
3. OPM применима только для европейских опционов.
4. OPM создавалась для условий и ограничений фондового рынка.

Первая проблема особенно актуальна для развивающегося рынка, каковым является Россия. Ее мы решаем, переходя к финансовым расчетам в долл. США. Таким образом, мы можем использовать, как уже указывалось нами ранее, средне-статистическое σ (%) в долл. США для отрасли «Машиностроение». В целях еще большего уточнения расчетов мы можем его еще скорректировать для условий реализации проекта в России. Однако сама по себе такая корректировка также обладает своей неопределенностью, которую опять же точно оценить проблематично. В данном случае действует один из основных принципов оценки волатильности, который используется в стохастической финансовой математике, а именно, принцип «волатильность сама по себе волатильна» [7].

Вторая проблема также обусловлена условиями реализации проекта в России. Здесь оценки экспертов тоже значительно волатильны.

Третья проблема накладывает уже более серьезный отпечаток на достоверность оценки стоимости реального опциона, поскольку в реальности мы подразумеваем, что можем его исполнить, когда заходим (в пределах анализируемого срока опциона). Таким образом, разумнее анализировать американский опцион. Однако, как указывают многие авторы, например, М.А. Лимитовский [3], в этом случае OPM может быть применена для консервативной оценки американского реального опциона, т. е. цена европейского опциона является нижним пределом для цены американского опциона с такими же условиями выпуска.

Четвертая проблема, пожалуй, наиболее серьезная, однако приближенно ее можно решить тем же методом, что и третью.

Формальная запись OPM, выведенной для оценки премии по европейскому колл-опциону [11], выглядит следующим образом:

$$C_0 = S_0 N(d_1) - Ke^{-rT} N(d_2); \quad (5)$$

$$d_1 = \frac{\ln \frac{S_0}{K} + \left(r + \frac{\sigma^2}{2} \right) T}{\sigma \sqrt{T}}; \tag{6}$$

$$d_2 = d_1 - \sigma \sqrt{T}, \tag{7}$$

где C_0 – текущая цена колл-опциона; S_0 – текущая цена базисного актива (предполагается, что актив не приносит текущего дохода, т. е. дивиденда или купона); K – цена исполнения опциона (цена “strike”); r – непрерывная годовая ставка безрисковой доходности (сила роста); T – время до исполнения опциона (в годах); σ – средне-квадратическое отклонение цены базисного актива за год; $N(d)$ – кумулятивная функция нормального распределения.

Заметим, что σ в рассматриваемом примере не меняется по причине короткого срока реального опциона – один год. Таким образом, оцениваем азиатский реальный опцион с постоянной волатильностью бизнеса. Проведем это в табл. 4 по формулам (5)-(7).

Таблица 4

Оценка азиатского реального опциона с постоянной волатильностью бизнеса с использованием ОРМ

Параметры и показатели	Значения параметров и показателей
Количество опционов в проекте	9
S_0 по каждому опциону, долл.	18488,75 (PV денежных притоков проекта)
K по каждому опциону, долл.	20600 (инвестиции)
r	0,04 (безрисковая непрерывная ставка)
T	1 (срок опционов – 1 год)
σ	0,4
d_1	0,103575
d_2	-0,296425
$N(d_1)$	0,54123
$N(d_2)$	0,38346
C_0 , долл.	2417,15
NPV проекта с опционами, долл.	20243,14 (2417,15 × 9 – 1511,25)

Таким образом, прав оказался директор ООО «Водяной»: несмотря на кажущуюся невыгодность модернизации, эксперимент вполне оправдан.

Решение задачи ROV модернизации оборудования с использованием биномиальной модели

В целях уточнения расчетов ROV в нашем примере необходимо решить оставшиеся две проблемы, которые мы имели в модели Блэка-Шоулза (ОРМ):

1. ОРМ применима только для европейских опционов.
2. ОРМ создавалась для условий и ограничений фондового рынка.

Их можно решить, используя в расчетах, например, биномиальную модель, несколько модифицированную нами [5, 8, 20, 25]. Первая модификация заключается в изменении цены исполнения реального опциона через определенный период времени в зависимости от инфляции за соответствующее число прошедших периодов. Вторая модификация заключается в практической возможности отследить моменты времени, выгодные для досрочного исполнения реального опциона, т. е. в определении узлов биномиального дерева, где цена «мертвого» (исполненного) опциона выше цены «живого» (не исполненного) опциона.

Применим данную модифицированную биномиальную модель к решению задачи ROV модернизации оборудования. Главной особенностью ее применения является адекватный переход от непрерывного процесса к дискретному с использованием известной нам постоянной волатильности σ .

Классический подход Кокса, Росса и Рубинштейна [14] (CRR-модель) предполагает переход согласно уравнениям:

$$u = e^{\sigma\sqrt{\Delta t}}; \quad (8)$$

$$d = e^{-\sigma\sqrt{\Delta t}}; \quad (9)$$

$$p = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d}, \quad (10)$$

где u – темп повышения стоимости базисного актива; d – темп понижения стоимости базисного актива; p – псевдовероятность события u ; $1 - p$ – псевдовероятность события d ; σ – среднеквадратическое отклонение цены базисного актива за год; Δt – временной шаг между узлами биномиальной решетки (в годах); r – непрерывная годовая ставка безрисковой доходности (сила роста).

Крупнейшим недостатком CRR-модели является то, что она теряет устойчивость, если $\Delta t > \sigma^2 / r^2$, и, как следствие, в расчетах могут возникнуть отрицательные псевдовероятности [23].

В целях более точного моделирования с более длительным временным шагом Δt биномиальное дерево согласно точке зрения Ябура, Крамина, Янга [19] и Халла [18] может быть построено в соответствии с уравнениями:

$$u = e^{\sqrt{e^{\sigma^2\Delta t} - 1 + r\Delta t}}; \quad (11)$$

$$d = e^{-\sqrt{e^{\sigma^2\Delta t} - 1 + r\Delta t}}; \quad (12)$$

$$p = \frac{e^{r\Delta t} - d}{u - d}. \quad (13)$$

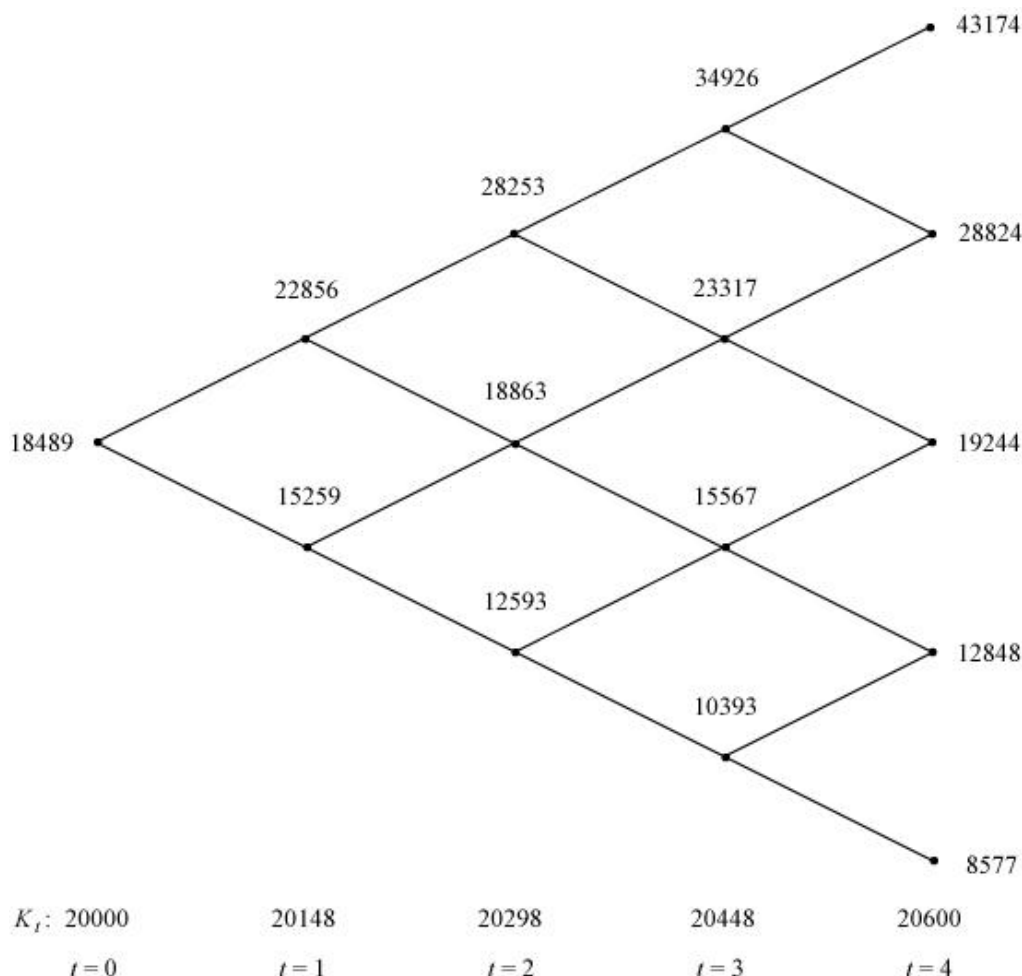


Рис. 1. Биномиальное дерево изменения цены базисного актива (долл.)

Это дерево можно рассматривать в качестве дополнения к CRR-параметризации. В этом случае, оба скачка – вверх (u) и вниз (d) – немного изменяются. В результате центральная линия дерева следует безрисковой ставке. Еще одним преимуществом является то, что эта параметризация также всегда стабильна независимо от длины временного шага Δt [17]. Используя модель (11)–(13) для $\Delta t = 0,25$ года, получаем следующую параметризацию в рассматриваемом нами примере:

$$u = 1,236169; \quad d = 0,825293; \quad p = 0,449666; \quad 1 - p = 0,550334.$$

В результате согласно значениям u и d получаем биномиальное дерево для изменения стоимости S_t базисного актива (PV денежных притоков пилотного проекта) в долл. (рис. 1). На этом же рисунке отобразим изменение цены исполнения опциона (K_t) по квартальной ставке инфляции $i = \sqrt[4]{1,03} - 1 = 0,007417$.

В биномиальной CRR-модели цену «живого» опциона [1, 2] можно рассчитать по формуле

$$C_t^N = \frac{pC_{t+1,u} + (1-p)C_{t+1,d}}{e^{r\Delta t}}. \tag{14}$$

Таким образом, можно оценить стоимость опциона в любом периоде t , если известны $C_{t+1,u}$ и $C_{t+1,d}$ в следующем периоде $t + 1$.

Поскольку мы рассматриваем колл-опцион, то в каждом периоде t цена «мертвого» опциона [1, 2] вычисляется по формуле

$$C_t^A = \max\{S_t - K_t, 0\}. \tag{15}$$

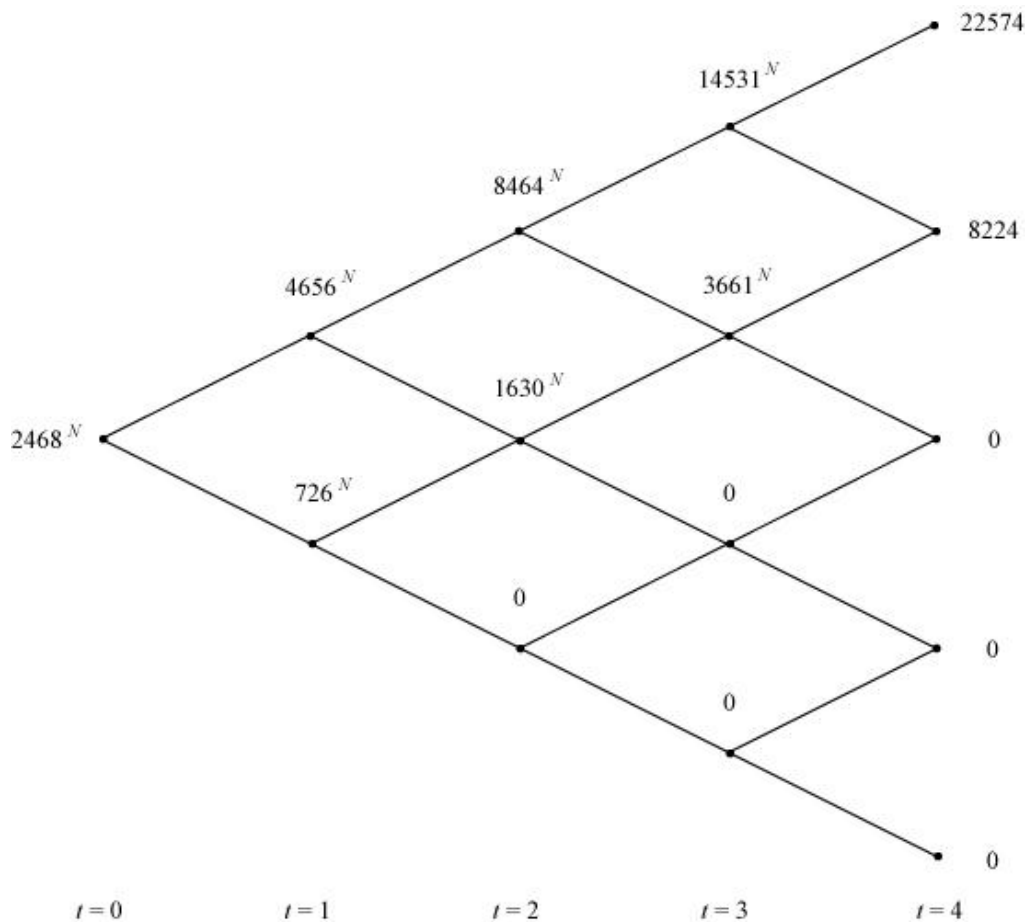


Рис. 2. Биномиальное дерево изменения цены реального опциона (долл.)

Используя формулы (14) и (15), можно последовательно рассчитать цены опциона,

начиная с четвертого квартала и заканчивая настоящим моментом времени (рис. 2). При этом в каждом узле биномиального дерева в целях последовательного расчета из цен C_t^N и C_t^A выбирается максимальная.

Например, в 3-м квартале ($t = 3$) в самом верхнем узле цена опциона вычисляется следующим образом. Сначала по формуле (14) рассчитывается цена «живого» опциона:

$$C_{3,u^3}^N = \frac{0,449666 \cdot (43174 - 20600) + 0,550334 \cdot (28824 - 20600)}{e^{0,04 \cdot 0,25}} = 14531 \text{ (долл.)}.$$

Затем по формуле (15) вычисляется цена «мертвого» опциона:

$$C_{3,u^3}^A = 34926 - 20448 = 14478 \text{ (долл.)}.$$

Дороже получился «живой» опцион, поэтому его цена выбирается с целью вычисления более ранней цены опциона.

По этому принципу строится все биномиальное дерево на рис. 2. При этом в нашем примере получилось, что везде выгоднее для инвестора «живой» опцион. Однако на практике может возникнуть и другая ситуация, т. е. в каких-то узлах дерева может быть дороже «мертвый» опцион, что свидетельствует о необходимости его досрочного исполнения в данном узле. На это может повлиять ставка инфляции i , которая изменит цены исполнения опциона K_t . Также подобный эффект может дать изменение параметров u и d .

В результате, работая по дереву от его конца к началу, мы можем получить цену данного опциона пилотного проекта в нуле. Она составит величину $C_0 = 2468$ долл. Тогда NPV проекта модернизации оборудования с 9-ю опционами составит

$$\text{NPV} = 2468 \cdot 9 - 1511,25 = 20700,75 \text{ (долл.)},$$

что несколько больше результата расчета согласно OPM. Это уточненная оценка эффекта проекта.

Решение задачи ROV модернизации оборудования с использованием триномиальной модели

Применение биномиальной CRR-модели, пусть даже и уточненной с помощью уравнений (11)–(13), обладает определенным набором недостатков, связанных прежде всего с ситуацией изменения волатильности бизнеса во времени [17]. Однако есть также существенный недостаток, заключающийся в том, что в случае очень малой или даже несуществующей волатильности в течение некоторого периода времени любое движение отклонения цены базисного актива вверх или вниз от ожидаемого значения в будущем, т. е. увеличения по безрисковой ставке ($S_{t+1,m} = S_{t,m} e^{r\Delta t}$), сделает построения биномиального дерева невозможным [17].

Триномиальное дерево построено при одновременном выборе таких параметров, которые устанавливают разумное пространство состояний, имея в виду разумные вероятности перехода между узлами дерева. Кроме того, рекомбинация дерева установлена так, что $ud = du = m^2 = e^{2r\Delta t}$, потому что в противном случае повышение дискретности системы не будет приводить к небольшой или даже нулевой волатильности. Триномиальное дерево всегда стабильно независимо от длины шага во времени. Уравнения для описания стохастических процессов движений вверх и вниз являются более точными, даже с более длинными шагами во времени. Это необходимо потому, что временные шаги для оценки реального опциона выбираются, исходя из управленческой практичности, так, чтобы они были длиннее, чем это обычно бывает в финансовых опционах.

Триномиальные деревья являются другим дискретным представлением движения цены базисного актива, аналогичным биномиальным деревьям. Триномиальные решетки имеют три параметра скачков u , m и d и три соответствующие им вероятности p_u , p_m и p_d . В течение этого времени шаг цены актива может перейти к одному из трех узлов: с вероятностью p_u в верхний узел до значения S_u , с вероятностью p_m к середине узла до значения S_m и в ниж-

ний узел до значения S_d с вероятностью p_d . Мы предполагаем, что сумма вероятностей равна единице, поэтому мы устанавливаем $p_m = 1 - p_u - p_d$. В конце каждого шага во времени есть пять неизвестных параметров: две вероятности p_u и p_d и три узла цены S_u , S_m и S_d .

При этом небольшая модификация, предложенная Ябуром, Крамином, Янгом [19] и Халлом [18], заключается в использовании более точной оценки отклонения в соответствии с уравнением

$$\sqrt{e^{\sigma^2 \Delta t} - 1} \approx \sigma \sqrt{\Delta t} \tag{16}$$

вместо $\sigma \sqrt{\Delta t}$. После этих изменений согласно точке зрения Хаатела [17] построение параметра триномиальной решетки приводит к улучшенной общей форме параметризации для всех вероятностей переходов и размеров скачков u , m и d в соответствии со следующими уравнениями:

$$p_u = \frac{m^2(V - 1)}{u^2 + md - um - ud}; \tag{17}$$

$$p_d = p_u \frac{m - u}{d - m}; \tag{18}$$

$$p_m = 1 - p_u - p_d; \tag{19}$$

$$u = e^{r\Delta t + \sqrt{e^{(\lambda\sigma)^2 \Delta t} - 1}}; \tag{20}$$

$$d = e^{r\Delta t - \sqrt{e^{(\lambda\sigma)^2 \Delta t} - 1}}; \tag{21}$$

$$m = e^{r\Delta t}; \tag{22}$$

$$V = e^{\sigma^2 \Delta t}, \tag{23}$$

где оправданное значение дисперсионного параметра λ составляет 1,12 [17]. Это делает пространство состояний плотным и обеспечивает достаточно хорошие вероятности переходов между узлами триномиальной решетки (дерева).

Движения вверх (20) и вниз (21), которые определяют пространство состояний, рассчитываются в соответствии с наибольшей волатильностью в течение инвестиций так, что $\sigma = \max \sigma_t$. Эти значения u и d используются для всего пространства состояний в течение всех периодов времени независимо от изменения волатильности. Тем не менее, вероятности перехода, вычисленные в соответствии с (17)–(19), справедливы только для периода времени с наивысшей волатильностью. В нашем примере предполагается постоянная во времени волатильность бизнеса, что существенно упрощает наши расчеты.

Таблица 5

Триномиальная решетка изменения цены базисного актива (долл.)

	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
S_t					47681
				37626	28004
			29691	29989	30291
		23430	23665	23903	24144
	18489	18675	18862	19052	19244
		14885	15035	15186	15338
			11983	12103	12225
				9647	9744
				7766	
K_t	20000	20148	20298	20448	20600

Используя модель (17)–(23) для $\Delta t = 0,25$ года, получаем следующую параметризацию в рассматриваемом нами примере:

$$u = 1,236169; \quad d = 0,825293; \quad m = 1,01005; \quad V = 1,040811;$$

$$p_u = 0,350268; \quad p_d = 0,439457; \quad p_m = 0,210275.$$

В результате согласно значениям u , m и d получаем триномиальное дерево для изменения стоимости S_t базисного актива (PV денежных притоков пилотного проекта) в долл. (табл. 5). В этой же таблице покажем изменение цены исполнения опциона (K_t) по квартальной ставке инфляции $i = \sqrt[4]{1,03} - 1 = 0,007417$.

В триномиальной модели цену «живого» опциона [17] можно рассчитать по формуле

$$C_t^N = \frac{p_u C_{t+1,u} + p_m C_{t+1,m} + p_d C_{t+1,d}}{e^{r\Delta t}}. \quad (24)$$

Таким образом, можно оценить стоимость опциона в любом периоде t , если известны $C_{t+1,u}$, $C_{t+1,m}$ и $C_{t+1,d}$ в следующем периоде $t + 1$. Поскольку мы рассматриваем колл-опцион, то в каждом периоде t цена «мертвого» опциона (C_t^A) вычисляется так же, как и в случае биномиальной модели, т. е. по формуле (15).

Используя формулы (24) и (15), можно последовательно рассчитать цены опциона, начиная с четвертого квартала и заканчивая настоящим моментом времени (табл. 6). При этом в каждом узле триномиальной решетки, как и биномиальной, в целях последовательного расчета из цен C_t^N и C_t^A выбирается максимальная.

Таблица 6

Триномиальная решетка изменения цены реального опциона (долл.)

	$t = 0$	$t = 1$	$t = 2$	$t = 3$	$t = 4$
C_t					27081
				17231^N	17404
			9756^N	9595^N	9691
		5094^N	4715^N	4098^N	3544
	2510^N	2170^N	1677^N	1229^N	0
		670^N	426^N	0	0
			0	0	0
				0	0

Например, в 3-м квартале ($t = 3$) в самом верхнем узле цена опциона вычисляется следующим образом. Сначала по формуле (24) рассчитывается цена «живого» опциона:

$$C_{3,u^3}^N = \frac{0,350268 \cdot (47681 - 20600) + 0,210275 \cdot (38004 - 20600) + 0,439457 \cdot (30291 - 20600)}{e^{0,04 \cdot 0,25}} =$$

$$= 17231 \text{ (долл.)}.$$

Затем по формуле (15) вычисляется цена «мертвого» опциона:

$$C_{3,u^3}^A = 37626 - 20448 = 17178 \text{ (долл.)}.$$

Дороже получился «живой» опцион, поэтому его цена выбирается с целью вычисления более ранней цены опциона.

По этому принципу строится все триномиальное дерево в табл. 6. При этом в нашем примере снова получилось, что везде выгоднее для инвестора «живой» опцион. Возможность возникновения другой ситуации описана нами ранее для биномиального дерева.

В результате, работая по дереву от его конца к началу, мы можем получить цену данного опциона пилотного проекта в нуле. Она составит величину $C_0 = 2510$ долл. Тогда NPV проекта модернизации оборудования с 9-ю опционами составит

$$NPV = 2510 \cdot 9 - 1511,25 = 21078,75 \text{ (долл.)},$$

что даже больше результата расчета согласно биномиальной модели. Это еще более точная оценка эффекта проекта.

В заключение проведем сравнение результатов трех описанных моделей оценки азиатского реального опциона модернизации оборудования компании с постоянной волатильностью бизнеса. Напомним, что в целях анализа использовались три модели:

1. Модель Блэка-Шоулза (ОПМ).
2. Уточненная биномиальная модель (ВТМ).
3. Триномиальная модель (ТТМ).

Сравнение цен опциона в исследуемом примере дает следующие результаты:

$$C_0 = \left\{ \underbrace{2417}_{\text{ОПМ}} < \underbrace{2468}_{\text{ВТМ}} < \underbrace{2510}_{\text{ТТМ}} \right\}.$$

Тогда NPV проекта модернизации оборудования компании с 9-ю опционами составит:

$$\text{NPV} = \left\{ \underbrace{20243}_{\text{ОПМ}} < \underbrace{20701}_{\text{ВТМ}} < \underbrace{21079}_{\text{ТТМ}} \right\}.$$

Данные результаты позволяют сделать следующие выводы:

1. Модель Блэка-Шоулза является нижним пределом для цены американского опциона с такими же условиями выпуска, как и европейский.

2. Реальный опцион модернизации оборудования должен быть азиатским, т. е. иметь переменную цену исполнения, например, в зависимости от инфляции, поскольку деньги, в том числе инвестиции, в разные моменты времени стоят по-разному.

3. В промежуточных расчетах в узлах деревьев всегда необходимо сравнивать цену «живого» и «мертвого» опциона и выбирать тот, который дороже. Это позволяет кроме всего прочего отследить возможности досрочной реализации опциона.

4. Наиболее важным практическим выводом является то, что наиболее точную оценку азиатского реального опциона с постоянной волатильностью бизнеса позволяет получить триномиальная модель. В исследуемом примере денежный выигрыш за счет этого незначителен, однако на практике могут возникнуть ситуации, в которых выигрыш может быть большим вплоть до того, что разные модели могут привести как к положительным, так и к отрицательным NPV с опционами. А это, в свою очередь, существенно повлияет на принятие управленческого решения в отношении инвестиций.

Полученные в статье результаты могут способствовать модернизации программного обеспечения, позволяющего составлять и оценивать реальные опционы. А главное, они могут быть полезны бизнесменам, менеджерам и финансовым аналитикам прежде всего производственных компаний в целях разработки и обоснования стратегических решений в инновационном развитии бизнеса.

Библиографический список

1. **Крушвиц, Л.** Финансирование и инвестиции / Л. Крушвиц. – СПб.: Питер, 2000. – 400 с.
2. **Крушвиц, Л.** Финансирование и инвестиции. Сборник задач и решений / Л. Крушвиц, Д. Шефер, М. Шваке. – СПб.: Питер, 2001. – 320 с.
3. **Лимитовский, М.А.** Инвестиционные проекты и реальные опционы на развивающихся рынках: учеб.-практич. пособие / М.А. Лимитовский. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: «Издательство Юрайт», 2008. – 464 с.
4. **Рош, Дж.** Стоимость компании: От желаемого к действительному / Дж. Рош. – Минск: Гревцов Паблшер, 2008. – 352 с.
5. **Трифонов, Ю.В.** Применение реальных опционов для инвестирования инноваций в условиях ограниченности информации / Ю.В. Трифонов, С.Н. Яшин, Е.В. Кошелев // Финансы и кредит. 2011. № 30(462). С. 2–9.
6. **Туккель, И.Л.** Экономика и финансовое обеспечение инновационной деятельности: учеб. пособие / И.Л. Туккель [и др.]. – СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 238 с.

7. **Ширяев, А.Н.** Основы стохастической финансовой математики / А.Н.Ширяев. – М.: ФАЗИС, 1998. – 1056 с.
8. **Яшин, С.Н.** Разработка и реализация инновационно-инвестиционной стратегии предприятия: монография / С.Н. Яшин, Е.В. Кошелев, А.В. Купцов; НГТУ. – Н.Новгород, 2011. – 269 с.
9. Инновационная Россия – 2020 (Стратегия инновационного развития Российской Федерации на период до 2020 года), утверждена Минэкономразвития России в 2010 г. – 105 с.
10. **Black, F.,** and M. Scholes (1973). The Pricing of Options and Corporate Liabilities, Journ. Polit. Econ., May-June, pp. 637-657.
11. **Boyle, P.** (1988). A lattice framework for option pricing with two state variables, Journal of Financial and Quantitative Analysis, Vol. 23, pp. 1–12.
12. **Chance, D.M.** (2001). An Introduction to Derivatives and Risk Management, Fort Worth, TX: Harcourt College Publishers.
13. **Cox, J.,** S. Ross and M. Rubinstein (1979). Option Pricing: A Simplified Approach, Journal of Financial Economics, No. 7, pp. 229-263.
14. **Godinho, P.** (2006). Monte Carlo Estimation of Project Volatility for Real Options Analysis, Journal of Applied Finance, Vol. 16, No. 1, Spring/Summer 2006.
15. **Guthrie, G.** (2009). Learning Options and Binomial Trees, Working paper, Feb. 15, 2009.
16. **Hahtela, T.** (2010). Recombining Trinomial Tree for Real Option Valuation with Changing Volatility, Real Options: Theory Meets Practice, 14th Annual International Conference, June 16-19, 2010, Rome, Italy, <http://www.realoptions.org/papers2010/241.pdf>.
17. **Hull, J.** (2006). Options, futures and other derivatives, Prentice-Hall, 6th edn.
18. **Jabbour, G.,** M. Kramin and S. Young (2001). Two-state Option Pricing: Binomial Models Revisited, Journal of Futures Markets, Nov 2001, Vol. 21, pp. 987-1001.
19. **Koshelev, E.,** Y. Trifonov and S. Yashin (2012). Corporate Innovative Strategy: Development and Financing, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing GmbH & Co. KG.
20. **Myers, S.C.** (1977). Determinants of Capital Borrowing, Journal of Financial Economics, Vol. 5.
21. **Tian, Y.** (1993). A modified lattice approach to option pricing, The Journal of Futures Markets, Vol. 13, No. 5, pp. 563-577.
22. **Trigeorgis, L.** (1991). A Log-Transformed Binomial Numerical Analysis Method for Valuing Complex Multi-Option Investments, Journal of Financial and Quantitative Analysis, Vol. 26, No. 3, pp. 309-326.
24. **Trigeorgis, L.** (1996). Real Options: Managerial Flexibility and Strategy in Resource Allocation. MIT Press.
25. **Trifonov, Yu. V.,** S.N. Yashin and E.V. Koshelev (2012). Modified Real Options Valuation for Developing Product-Type Innovation Strategies, International Journal of Business and Social Science, Vol. 3, No. 12 [Special Issue - June 2012], pp. 22-32.

*Дата поступления
в редакцию 26.03.2013*

Yu.V. Trifonov¹, S.N. Yashin², E.V. Koshelev¹

PLANNING FOR UPGRADING EQUIPMENT OF MANUFACTURING COMPANY USING REAL OPTIONS

Lobachevsky state university of Nizhni Novgorod¹,
Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev²

Purpose: Evaluating the effects of projected upgrading equipment of a manufacturing company.

Methodology: Achievement of the objectives is to work using the Black-Scholes model, a refined and modified binomial model and a modified trinomial model.

The results and their application area: The result of research is the modified trinomial Asian real option model of the upgrading equipment project with constant business volatility.

Conclusions: The most accurate valuation of the real option and the entire upgrading equipment project in general is provided by the trinomial model.

Key words: upgrading equipment, real option valuation, asian option, constant volatility, binomial model, trinomial model.

УДК 330.322.2

Г.А. Морозова, В.А. Мальцев, К.В. Мальцев

**МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЙ ОРГАНИЗАЦИЕЙ В РЕГИОНЕ:
СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ**

Нижегородский институт управления – филиал РАНХиГС

Цель: Разработать методику управления образовательной организацией в регионе.**Методология:** Портфельный анализ, стратегический анализ, подходы и методы к управлению образовательной организацией в регионе.**Результаты и область их применения:** В данной статье рассмотрены современные методы управления образовательной организацией в регионе. Результатом исследования является разработка методов управления образовательной организацией в регионе.**Выводы:** На основании разработанных методов предложены стратегические направления управления образовательной организацией в регионе.

Ключевые слова: социум, маркетинговые исследования, стратегия, комплекс маркетинга, продукт, цена, продвижение, распределение, место продажи, позиционирование, реклама, интернет-маркетинг.

Понятие «миссия» – предназначение, долг – по отношению к вузу предполагает, что он создан для выполнения особых социально значимых задач. Миссия – это некое общественное требование, категория долженствования, определяемая взаимодействием университета и государства, общества, экономики, культуры и личности.

Миссию можно сформулировать следующим образом: *подготовка специалистов, обеспечивающих современные подходы к управлению в условиях изменяющейся внешней и внутренней среды и подготовленных к международному сотрудничеству.*

Миссия вуза направлена на поддержание определенного места вуза во внешней среде - социуме. Чтобы перейти к ее практической реализации, необходимо выявить приоритетные направления развития вуза в современных условиях, для чего мы проведем анализ ССВУ (SWOT-анализ). Анализ сильных и слабых сторон, возможностей и угроз основан на исследовании действительного и потенциального рынков образовательных услуг. Данный анализ служит средством выявления сравнительных преимуществ, т.е. ключевых характеристик предлагаемых образовательных услуг; перспективных тенденций развития высшего образования в современном обществе с учетом традиций и возможностей вуза.

На основе полученных данных можно предложить следующие приоритетные направления развития образовательной организации:

1. Развитие инновационного образования в вузе;
2. Активная маркетинговая политика вуза;
3. Привлечение профессиональных преподавателей на штатной основе, а также молодых специалистов;
4. Привлечение профессиональных менеджеров;
5. Улучшение материально-технической базы, информатизация образования и процесса управления им в вузе;
6. Улучшение социальной обеспеченности сотрудников, студентов и аспирантов;
7. Продолжающаяся активная политика по привлечению внебюджетных средств в образовательную организацию.

Таблица 1

Результаты SWOT-анализа образовательных организаций региона

<p>S (strength) – сильные стороны</p> <ul style="list-style-type: none"> • Отраслевой авторитет • Авторитет в обществе (регионе и России) • Высокая инновационная активность – проекты, программы • Научные традиции • Методические разработки в образовании • Общественно-политические традиции • Достаточно высокий уровень развития информационных технологий • Наличие современных (привлекательных для молодежи) специальностей • Организация международной деятельности 	<p>W (weakness) – слабые стороны</p> <ul style="list-style-type: none"> • Несовершенство системы менеджмента на всех уровнях • Стареющий персонал (мало молодежи) • Низкий уровень воспитательной работы со студентами • Низкий уровень социальной обеспеченности сотрудников и студентов • Устаревшая учебно-лабораторная база • Несистемная работа по поддержанию имиджа вуза • Отсутствие профессионалов-управленцев среднего звена
<p>O (opportunity) - благоприятные возможности</p> <ul style="list-style-type: none"> • Внимание государства к образованию (национальный проект «Образование») • Авторитет Нижнего Новгорода • Инфраструктура региона • Рост общественного интереса к высшему образованию • Оживление экономики • Увеличение числа потенциальных источников финансирования • Возможности международного сотрудничества 	<p>T (threat) – потенциальные угрозы</p> <ul style="list-style-type: none"> • Демографический спад • Активная политика конкурентов в городе • Изменения отраслевой политики по структуре подготовки кадров

Разработка комплекса маркетинга образовательной организации

Теперь обратимся к комплексу маркетинга. Подробнее рассмотрим одну из составляющих стратегии, **продукт** образовательной организации. Успех же реализации программ непосредственно зависит от того:

- на какую поддержку руководства образовательной организации можно рассчитывать;
- насколько есть уверенность в наличии реального спроса на конкретные программы на рынке;
- насколько квалификация преподавателей отвечает конкретным потребностям предприятий-работодателей;
- насколько преподаватели имеют возможность уделить время программе, не в ущерб основным обязанностям;
- насколько есть уверенность в умении персонала качественно разработать, продать и провести программу.

В отношении продукта образовательного учреждения также можно было бы предложить разработку инновационных программ по заказу работодателей.

Что касается **каналов распределения**, целесообразно предоставлять образовательные услуги наряду с образовательной организацией и на объектах работодателя. **Цена** на новую образовательную программу должна отражать реальную обстановку, сложившуюся на рынке, учитывать востребованность выпускников конкретной программы на рынке труда, и конечно же спрос на конкретные образовательные услуги. Безусловно, новые образовательные программы требуют инвестиций. Поэтому цена на образовательную услугу не должна просто отражать себестоимость затрат.

Для **продвижения** новых программ на рынок можно использовать следующие возможные каналы маркетинга: интервью с руководителями предприятий; презентация программ на предприятиях, в ассоциациях, на выставках, ярмарках, конференциях; использование каналов профессиональных организаций и ассоциаций; рассылка информационных материалов на предприятия; информация по телефону; реклама в прессе и в других СМИ; использование электронной почты, реклама в интернете.

Если говорить о роли **персонала** в реализации новых образовательных программ, то можно предложить следующие возможные варианты организационной поддержки осуществления программы:

- неформальная договоренность о разделении обязанностей по подготовке программы таким образом, чтобы дополнительные обязанности не мешали основной работе;
- проект формально признан, есть его руководитель, работа в рамках проекта признана составной частью основных обязанностей персонала;
- создана должность «координатора программы», в задачу которого входит найм сотрудников для выполнения определенной работы в течение определенного времени;
- масштабы программы достаточны для создания специализированного подразделения, в которое на постоянной основе будут наняты сотрудники.



Рис. 1. Комплекс маркетинга вуза

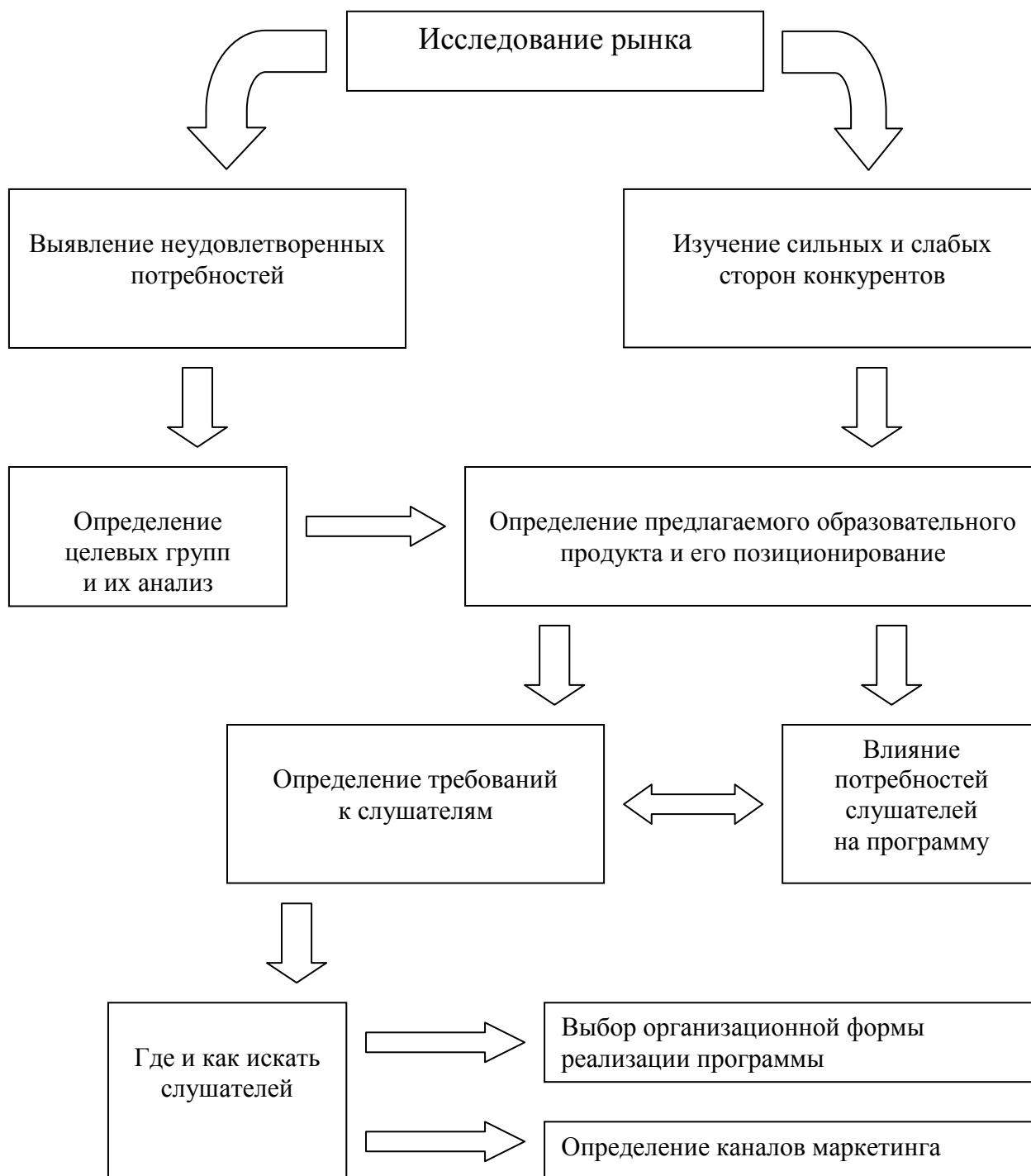


Рис. 2. Схема разработки и продвижения программ

Анализ данных нашего исследования показал также, что нижегородским вузам необходимо проводить более рациональную политику профориентации абитуриентов и введения в направление обучающихся студентов. Этот вывод мы сделали на основе того, что довольно высок процент тех студентов, кто не собирается работать по специальности и еще не определился. Такие высокие показатели весьма настораживают: ведь опрос проводился среди студентов последних курсов обучения! Все это указывает на то, что студенты не в полной мере осознают свое призвание и, возможно, не осознавали его при поступлении.

Очень важным для государства является то, что студенты, получающие конкретную специальность в вузе должны иметь возможность получать информацию и по другим специ-

альностям этого вуза и пользоваться этой базой. Этот факт является важным для государства, так как оно получает специалиста широкого профиля. Наше же исследование показало, что большинство студентов не понимают значимости многопрофильного образования и не пользуются образовательными услугами своего вуза по другим специальностям. Поэтому, во-первых, вузам следует проводить популяризацию различных специальностей среди студентов и создавать открытый доступ к информации по ним, и, во-вторых, им следует акцентировать внимание абитуриентов на многопрофильности своего образования.

Если оценивать показатель престижности вуза в целом, то следует заметить, что в первую очередь на определение престижности вуза влияет набор программ, предоставляемых им. Преподавательский состав также весьма влияет на престижность высшего учебного заведения. Именно по этим направлениям следует проводить политику популяризации высших учебных заведений в Нижнем Новгороде.

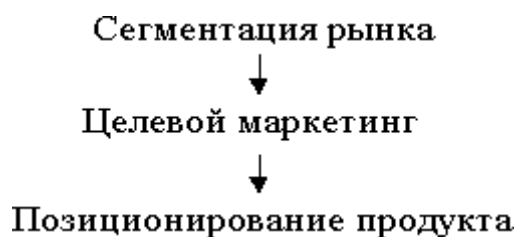
Населению при выборе вуза для получения образования необходимо руководствоваться не фактором престижности направления (специальности), вуза, а качеством предоставляемых вузом образовательных услуг.

Государству же требуются специалисты в различных областях деятельности (здравоохранение, образование, промышленность, сельское хозяйство и др.), нехватка в которых явно обозначилась в последнее время наряду с перенасыщенностью рынка специалистами в области управления, экономики, юриспруденции и т.п. Определенные направления необходимо популяризировать среди населения. А для этого государственные органы должны выделять средства вузам для проведения политики продвижения непопулярных специальностей среди абитуриентов, повышения качества предоставляемых образовательных услуг. Мы надеемся, что в ближайшем будущем это приведет к выравниванию диспропорций на рынке образовательных услуг.

Позиционирование образовательной организации на перспективных целевых рынках

Позиционирование вуза – формирование в сознании потребителей (потенциальных абитуриентов) четкого образа образовательного учреждения, отличного от вузов-конкурентов. При маркетинговом позиционировании вуза следует заметить, что процессы сегментирования потенциальных потребителей образовательных услуг для образовательных учреждений особенно важны. При осуществлении своей деятельности образовательные учреждения контактируют с огромным числом людей. При этом в процессе позиционирования образовательные учреждения должны учитывать интересы каждого из них – иначе целая группа людей может отказаться от использования предлагаемых данным образовательным учреждением услуг.

Потребители могут группироваться по ряду факторов. Их позиция по отношению к этим факторам определяет истинные границы рынка. Процесс позиционирования был разработан для того, чтобы наиболее эффективно использовать процесс сегментации. Существует следующий порядок действий в совокупном процессе



Для вуза целесообразным является исследовать корреляцию между направлениями подготовки (видами образовательных услуг) и целевыми группами. Затем, изучив запросы потенциальных потребителей в каждом сегменте, сделать акцент именно на тех особенностях вуза, которые могут удовлетворить эти запросы.

Совершенствование системы продвижения образовательной организацией

Основные виды продвижения

Реклама – любая оплачиваемая форма персональной презентации и продвижения идей, товаров и услуг, осуществляемая конкретным заказчиком. Реклама - это убеждающее средство информации о товаре или фирме, коммерческая пропаганда потребительских свойств товара и достоинств деятельности фирмы, готовящая активного и потенциального покупателя к покупке. Целями рекламы вуза является создание осведомленности о вузе различными целевыми аудиториями, предоставление информации, напомнить, склонить к решению к выбору определенного вуза. Рекламе присущи следующие достоинства:

- одновременно достигает абитуриентов, живущих далеко друг от друга;
- публичный характер указывает потребителю (абитуриенту), что услуга не противоречит общественным нормам и закону;
- позволяет многократно повторять обращение, а абитуриенту – получать и сравнивать обращения различных конкурирующих вузов;
- широкомасштабная рекламная кампания, проводимая вузом, является своеобразным свидетельством его популярности и успеха;
- выразительность (позволяет вузу эффективно и наглядно представить свою услугу с помощью текста, звука и цвета);
- служит для формирования долговременного устойчивого образа вуза.

Классификация рекламы:

- информативная реклама используется для информирования потенциальных абитуриентов о новых продуктах с целью создания первоначального спроса;
- побудительная реклама используется для создания у выбранного сегмента потребителей спроса на услугу путем внушения потребителям, что рекламируемая услуга является наилучшей в рамках предлагаемого ассортимента рядом вузов;
- сравнительная реклама осуществляет прямое или косвенное сравнение услуг одного вуза с другими; на образовательном рынке применяется редко;
- напоминающая реклама напоминает потребителям о существующих образовательных услугах определенного вуза;
- престижная или фирменная реклама представляет собой рекламу достоинств вуза, выгодно отличающих его от конкурентов. Цель такой рекламы – создание среди общественности и, прежде всего, активных и потенциальных абитуриентов, привлекательного имиджа.

Реклама занимает центральное место в коммуникационной политике вуза. Она призвана решать наиболее сложную и трудно реализуемую в маркетинговой деятельности задачу – формировать и стимулировать спрос на образовательные услуги.

Стимулирование продаж образовательных услуг – это краткосрочные поощрительные меры, способствующие продаже услуг. Самые важные из них – финансовые:

- в частности, применение различных скидок с цены; в Нижегородском институте управления существует Положение о скидках;
- действенным средством стимулирования сбыта является рассрочка платежа: два раза в год, четыре раза в год;
- некоторые вузы, в основном коммерческие, используют систему купонов, находящихся на сайте, предоставляют право на единовременную скидку.

Персональные продажи. Под персональной продажей понимается устная презентация услуги с целью его сбыта в разговоре с одним или несколькими потенциальными покупателями. Это наиболее эффективный инструмент продвижения услуги на определенных этапах её сбыта, особенно для создания у абитуриентов благоприятного отношения к предлагаемым образовательным услугам, вузу в первую очередь к продукции производственного назначения. Однако это наиболее дорогой метод продвижения. Вузы могут адаптировать данный ме-

тод следующим образом: презентации могут проводить студенты в своих школах, районах, городах, если они приехали учиться из другого города. Это повышает лояльность и доверие к вузу потенциальных абитуриентов.

Формирование общественного мнения (связи с общественностью, PR) предполагает создание хороших отношений с различными государственными и общественными структурами и слоями населения путем формирования благоприятного мнения о вузе, его услугах. Связь с общественностью включает также связь с прессой, распространение информации о деятельности вуза. Перед деятельностью по организации общественного мнения ставят несколько задач, в том числе обеспечение вузу благожелательной известности. Для этого необходимы:

- престижная реклама, рекламирующая образовательные программы не сами по себе, а деятельность вуза;
- пресс-конференции по поводу некоммерческих событий в жизни вуза, презентации, открытые лекции.
- проведение различных культурных акций, о чем широко оповещаются широкие слои потребителей через средства массовой информации.

Предлагаемые мероприятия по совершенствованию системы продвижения образовательной организацией

1. Расширение использования информационных технологий, как следствие укрепление имиджа организаций как вуза, использующего инновационные методы управления и стратегического развития:

- активное использование сайта, увеличение и качественное улучшение контента по всем направлениям деятельности;
- продвижение форума, ответы на вопросы студентов и абитуриентов через форум;
- коммуникации студентов и преподавателей академии через интернет, обмен информацией, вопросы к семинарам, презентации лекций, скайп-лекции;
- проведение интернет-конференций (межвузовских, междугородных, международных);
- проведение открытых лекций, семинаров известных преподавателей, специалистов.

2. Продвижение научно-исследовательских услуг института, в том числе через сайт, что:

- повышает известность бренда вуза;
- позиционирует вуз как исследовательский институт;
- дает экономический эффект.

3. Воспитание студентов-исследователей, вовлечение их в научную деятельность потенциальных преподавателей. Предлагаемые методы:

- привлечение студентов к научно-исследовательской деятельности с 1 курса, как следствие: постепенный отбор студентов, которые действительно испытывают интерес к научным исследованиям, определение студентов со сферой научных интересов, привлечение их к исполнению научно-исследовательских проектов;
- участие в различных научных конференциях, общение с учеными из различных научных сфер.

4. Привлечение специалистов, преподавателей под конкретные цели и проекты, как следствие, более высокая мобильность вуза и экономия средств.

5. Разработка фирменного стиля, рекламного стиля: специализированные печатные СМИ, радио, ТВ, и другие носители.

Маркетинговые информационные средства:

- общественные СМИ (газеты, журналы, радио, телевидение);
- специализированные СМИ (справочники, журналы для абитуриентов);
- общедоступные интернет – ресурсы;
- специализированные интернет – ресурсы;
- участие в образовательных конференциях и выставках

б. Работа с абитуриентами и их родителями (курсы, профориентация, дни открытых дверей). “Поставщики” абитуриентов:

- школы;
- колледжи;
- компании рынка труда;
- вузы.

7. Содействие трудоустройству студентов:

- создание и развитие системы содействия трудоустройству и адаптации к рынку труда студентов и выпускников;
- привлечение специалистов в сфере экономики труда, которые бы знакомили студентов с актуальным состоянием рынка труда, объясняли студентам, в каких профессиях можно использовать полученные ими знания;
- разработка долгосрочных и текущих программ развития системы содействия трудоустройству выпускников, студентов и аспирантов вуза.

Развитие и поддержание имиджа вуза

Предполагается разработка единой маркетинговой стратегии, поддержка коммуникационной политики в СМИ и в интернет (размещение рекламы в СМИ, создание корпоративного сайта) а также курирование школ, колледжей.

Сбор и анализ информации

Необходимо осуществлять мониторинг рынка образовательных услуг (мониторинг цен на образовательные услуги в вузах города, проведение анализа востребованности различных направлений (специальностей)). Также предполагается создание баз данных студентов, выпускников, анкетирование, создание списка органов государственной власти. Может быть полезной работа социологической лаборатории, направленная на проведение необходимых исследований для развития и формирования маркетинговой стратегии вуза, обработку статистических данных, опросов студентов и абитуриентов.

Развитие делового сотрудничества с предприятиями, организациями, государственными органами

Данный вид работы предполагает участие вуза в общественно-политической жизни, обучение по целевым программам госслужащих, приглашение бизнес-тренеров, консультантов, ведущих специалистов, общественных деятелей.

Продвижение инноваций в области образования и науки

Необходимо продвижение технологий дистант-образования, которые являются актуальными на сегодняшний день и спрос на услуги дистанционного рода постоянно растет, а также участие в мероприятиях, посвященных развитию инноваций.

Поддержание отношений с выпускниками образовательной организацией и содействие их трудоустройству

Возможно проведение дней встреч выпускников для налаживания деловых контактов, ведения статистики. Также полезна работа по трудоустройству и занятости студентов – направление на практику, поиск места работы, стажировки

Разработка интернет-стратегии образовательного учреждения

Интернет-стратегия высшего учебного заведения является частью общей маркетинговой стратегии, она подразумевает использование средств и возможностей интернет для достижения стратегических целей вуза. Использование методов интернет-маркетинга дает ряд потенциальных преимуществ как пользователям вузовских интернет-порталов, так и самому вузу. Применение комплекса интернет-маркетинга позволяет в значительной степени активизировать и повысить эффективность процессов маркетингового позиционирования высших учебных заведений на рынке образовательных услуг. Это объясняется возросшей ролью интернета как средства коммуникации и источника информации для различных слоев населения современной России. Основные отличия интернета от наружной рекламы, телевидения и печатной прессы заключаются в следующем:

- воздействие на потенциального клиента в интернете происходит по нескольким каналам одновременно (баннерная реклама, блоги, поисковые системы, интернет-СМИ и т.п.), причем каналы взаимодействуют между собой и дают сложный суммарный эффект;
- эффект от маркетинговых действий в интернете проявляется очень быстро, что позволяет получать первых клиентов уже на следующий день после запуска маркетинговой кампании;
- пользователи Интернета мгновенно реагируют на новые события и охотно делятся между собой впечатлениями в блогах, публичных комментариях и социальных сетях. Эта реакция может быть как негативной, так и позитивной, усиливающей эффект от рекламы.

Разработка интернет-стратегии вуза включает три основные направления деятельности:

1. Оптимизация и поисковое продвижение корпоративного сайта вуза;

2. Организация рекламных кампаний в Интернете;

3. Активизация эффективного взаимодействия абитуриентов, студентов и слушателей с сотрудниками и преподавателями образовательного учреждения на корпоративном портале вуза и через социальные сети.

Организация рекламных кампаний в интернете

Интернет-реклама на сегодняшний день является самым оптимальным видом рекламы по таким показателям, как стоимость целевого контакта и возможность оперативного вмешательства в ход проведения кампании, что не под силу таким СМИ, как телевидение и радиовещание. Именно по этим причинам интернет-реклама становится все более популярной. Рассматривая преимущества и недостатки традиционных рекламных носителей (табл. 1) можно заметить, что интернет обладает большинством преимуществ традиционных средств рекламы и избавлен от многих их недостатков.

Таблица 1

Особенности средств рекламы

Средство рекламы	Преимущества	Недостатки
Газеты	Гибкость; своевременность; высокий уровень охвата местного рынка; широкая аудитория; высокий уровень доверия	Недолговечность; невысокое качество воспроизведения; небольшая "вторичная" аудитория
Телевидение	Сочетание изображения, звука и динамики; обращение непосредственно к чувствам; высокий уровень внимания; высокая степень охвата	Высокая стоимость; насыщенность; мимолетность контакта; меньшая степень избирательности аудитории
Прямая почтовая реклама	Избирательность аудитории; гибкость; отсутствие рекламной конкуренции в пределах данного средства; адресность	Относительно высокая стоимость; устоявшееся мнение о такой форме рекламы как о "макулатуре"
Радио	Массовость; высокая степень избирательности по географическим и демографическим признакам; низкая стоимость	Только восприятие на слух; уровень внимания ниже по сравнению с ТВ-обращениями; непродолжительность воздействия
Журналы	Высокий уровень географической и демографической избирательности; доверие и престиж; высококачественное воспроизводство; длинная жизнь; "вторичный" круг читателей	Большие перерывы во времени между объявлениями; высокая вероятность досадных опечаток; нет гарантии своевременного появления
Наружная реклама	Гибкость; высокий показатель повторных контактов; низкая цена; отсутствие конкуренции	Отсутствие избирательности аудитории; творческие ограничения

В числе преимуществ онлайн-рекламы можно выделить следующие:

1. Возможность проводить рекламную кампанию на целевую аудиторию.

Охват целевой аудитории осуществляется по географическим и тематическим признакам. Преимуществом тематического охвата является то, что потребителем рекламы являются заинтересованные в ней люди. Географический охват подразумевает то, что рекламу увидят жители определенного региона, города и т.д.

2. Возможность проведения контроля эффективности рекламной кампании и мгновенной смены их планов. К примеру, можно реально оценить аудиторию, увидевшую рекламу, отклик, который она вызвала, и отдачу от проведенной кампании. Кроме этого, рекламная акция может заканчиваться и начинаться в любой момент.

3. Низкие затраты на проведение рекламной кампании (в расчете на одного привлеченного клиента затраты на сетевую рекламу в 5-10 раз ниже, чем в общепринятых видах рекламы).

4. Существенное расширение рынков сбыта, вплоть до выхода на мировой рынок.

5. Оперативное обновление рекламной информации в режиме реального времени (т.е. практически мгновенно). Это огромное преимущество, по сравнению с рекламой в других медиа. При этом изменение содержания зачастую абсолютно бесплатно.

Интернет-реклама лидирует по вышеуказанным критериям и будет увеличивать свое преимущество в связи с постоянным увеличением количества аудитории в сети. В данный момент по количеству аудитории телевидение несомненно идет на первом месте, однако по качеству аудитории интернет намного предпочтительнее.

Для продвижения как нового бренда вуза в целом, так и официального сайта образовательного учреждения, в частности, целесообразно использовать следующие виды рекламных кампаний:

- 1) контекстная реклама;
- 2) регистрация в поисковых системах;
- 3) размещение информации в каталогах интернет-ресурсов;
- 4) баннерная реклама;
- 5) обмен ссылками;
- 6) E-mail – маркетинг.

Контекстная реклама – это интернет-реклама, которая показывается в поисковых системах и на страницах веб-сайтов. Контекстная реклама отличается от обычной интернет-рекламы тем, что зависит от поискового запроса пользователя или от тематики страницы, на которой демонстрируется. Контекстная реклама хороша тем, что привлекает на сайт целевых пользователей – посетителей, заинтересованных в рекламируемом товаре или услуге. Для интернет-посетителей контекстная реклама гораздо интереснее других видов рекламы. Наиболее популярными сервисами контекстной рекламы являются Яндекс.Директ и Google AdSense. Некоторые профессиональные интернет-маркетологи прогнозируют значительный рост рынка контекстной рекламы, одной из главных причин которого является развитие поведенческих технологий.

Многочисленные исследования в области интернет-продаж показывают, что большая часть покупок осуществляется через результаты поисковых запросов. Поэтому *регистрация в поисковых системах* – это эффективный способ продвижения интернет-ресурса. Поисковые системы работают на основе специальной программы-бота, которая регулярно просматривает множество сайтов, заносит информацию о них (ключевые слова, описание и др.) в индексы (программные базы данных), затем через какое-то время просматривает их повторно и, если вновь полученная информация не совпадает с той, что уже есть в индексах, обновляет свои данные.

Размещение информации в каталогах интернет-ресурсов. *Занесение данных в сетевые информационные хранилища (универсальные и тематические каталоги, классификаторы, "желтые страницы", справочники) входит в первую тройку рекламных средств, благодаря действию которых целевая аудитория чаще всего получает информацию об искомых товарах или услугах.*

Баннерная реклама является одним из самых популярных и эффективных видов сетевой рекламы. Баннерная реклама имеет два стратегических направления: участие в системах баннерного обмена и аренда рекламных площадей. Такой вид рекламы повышает узнаваемость бренда и лояльность аудитории по отношению к нему, а также укрепляет имидж компании. Баннерная реклама начинает работать только при большом объеме показов, поскольку требует постоянного, интенсивного присутствия в информационном поле.

Обмен ссылками обычно осуществляется на договорной бесплатной основе между схожими по тематике интернет-сайтами. Например, когда посетители одного сайта хотят узнать другие ресурсы, аналогичные данному, они заходят в особый раздел, обычно называемый "Полезные ссылки" или "Друзья сайта". В отличие от систем баннерного обмена, учет переходов и статистика такой рекламы не ведется, однако обмен ссылками порой дает более высокие результаты, нежели баннеры.

E-mail-маркетинг. Многие западные эксперты утверждают, что отклик на электронные письма порой бывает гораздо выше, чем на баннерную рекламу или сообщения в форумах. При умелом использовании и рациональном подходе к данному механизму, e-mail-маркетинг может стать мощным и весьма эффективным средством продвижения в интернете.

Кроме всего сказанного, для успешного продвижения бренда образовательного учреждения необходимо освещение деятельности вуза в авторитетных СМИ. Работа с прессой – это важный компонент стратегии присутствия в интернете. Интересные публикации, освещающие главные события в жизни вуза, размещаемые на авторитетных интернет-порталах, увеличивают лояльность клиентов и улучшают имидж вуза. Публикации авторитетных СМИ охотно цитируются, что повышает узнаваемость бренда и усиливает присутствие вуза в интернете.

Библиографический список

1. **Морозова, Г.А.** Разработка маркетинговой стратегии: монография / Г.А. Морозова. – 2-е изд., доп. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2011. – 264 с.
2. **Морозова, Г.А.** Инновационное развитие промышленных комплексов в регионе: монография / Г.А. Морозова. – Н. Новгород: Изд-во Волго-Вятской академии государственной службы, 2010. – 160 с.
3. **Морозова, Г.А.** // Инновации в формировании экономики нового типа // Ученые записки. 2011. Т. 9. С. 5–6.

*Дата поступления
в редакцию 26.03.2013*

G.A. Morozova, V.A. Maltsev, K.V. Maltsev

METHODS OF CONTROL OVER THE EDUCATIONAL ORGANIZATION IN THE REGION: MODERN APPROACHES

Nizhny Novgorod management institute – branch RANHiGS

Purpose: To develop a technique of management of the educational organization in the region.

Methodology: The portfolio analysis, the strategic analysis, approaches and methods to management of the educational organization in the region.

The results and their application area: In this article modern methods of control over the educational organization in the region are considered. Result of research is development of methods of management by the educational organization in the region.

Conclusions: On the basis of the developed methods the strategic directions of management by the educational organization in the region are offered.

Key words: society; market researches; strategy; marketing complex; product; price; advance; distribution; sale place; positioning; advertisings; Internet marketing.

УДК 330.341.42

А.Н. Зайцев¹, Д.А. Зайцев¹, С.А. Борисов²**РЫНОК ИНТЕРНЕТ-ПРОЕКТОВ ДЛЯ БИЗНЕСА:
СОСТОЯНИЕ, ДИНАМИКА И ПЕРСПЕКТИВЫ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Иннов», г. Нижний Новгород²

В настоящее время широкое распространение получила деятельность по созданию и продвижению в поисковых системах интернет-сайтов. Данное обстоятельство связано с тем, что руководство компаний приходит к выводу о том, что значительная доля их клиентов предпочитают использовать корпоративные сайты компаний для поиска информации о предоставляемых ею товарах и услугах, а также возможностью покупки товаров с использованием возможностей сети интернет. Руководство многих компаний заинтересовано в создании информативного и красочного сайта, который смог бы заинтересовать пользователей, привлечь к покупке их продукции. Далеко не во всех компаниях в достаточной мере развита собственная ИТ-служба, поэтому часто для исполнения проектов по созданию корпоративных сайтов используются услуги веб-студий, специализирующихся на создании таких сайтов и их последующим продвижением в сети.

В данной статье рассмотрен рынок интернет-проектов, характеристики российских веб-студий, их распределение по городам, численности сотрудников с целью определения основных трендов, присутствующих в данном секторе. Информация, приведенная в статье, может быть полезной как для владельцев различных компаний, задумывающихся о создании и продвижении собственного сайта, так и для самих веб-компаний для планирования своей ИТ-стратегии. Также материалы статьи могут быть полезны для ориентира в поиске работы в сфере интернет-проектов.

Ключевые слова: интернет, корпоративный сайт, веб-студия, маркетинг, интернет-проект.

Экономическая эффективность деятельности любого предприятия в условиях рыночной экономики зависит от того, насколько успешно решаются проблемы, связанные с конкурентоспособностью его продукции или услуг и эффективностью маркетинга [1]. Одним из важнейших каналов продвижения и продаж продукции и услуг как зарубежных, так и российских компаний сегодня является интернет [2, 3].

Профессиональным созданием, поддержкой, продвижением и рекламой корпоративных сайтов, Интернет-магазинов занимаются веб (web)-студии [4]. По данным на начало 2012 года, в Рунете работают порядка 5 000 веб-студий, из них на российском рынке около 2600. Под веб-студиями авторами подразумеваются компании, у которых разработка интернет-сайтов является основным видом деятельности [5].

За 100% примем общее количество веб-студий в России. Каждый город имеет свой «удельный вес» в общей картине [5]. Лидерами являются Москва (28,1%) и Санкт-Петербург (11,9%). Динамика с 2010 года по 2011 год довольно любопытная: так, Москва потеряла около 3% своего «веса» в общей картине, а СПб, наоборот, 1% прибавил. По сравнению с 2010 годом в 2011 году увеличилась доля Новосибирска (4,5%) – она практически сравнялась с Екатеринбург (4,6%). Процентный прирост показали также Нижний Новгород (3%), Краснодар (2,9%) и Самара (2,5%), а вот Ростов-на-Дону (2,7%) и Челябинск (2,2%) последовали за Москвой – их «вес» в общей картине рынка в 2011 году несколько уменьшился (рис. 1).

Учитывая, что распределение количества веб-студий меняется в пользу регионов, можно предположить, что мы наблюдаем постепенное развитие регионального сегмента рынка интернет-проектов. В 2011 году общий объем рынка веб-разработок составил 14,9 млрд руб. По сравнению с 2010 годом прирост составил 53%. Динамика среднегодовых оборотов веб-студий за последние годы наглядно демонстрирует бурный рост интереса биз-

нес-структур к интернет-услугам [5]. Как выглядит традиционный обобщённый «портрет веб-студии» в 2011 году? Проанализируем данные по возрасту компаний, численности сотрудников и количеству проектов в портфолио. Наиболее интересным показателем в этом пункте будет число молодых студий со сроком жизни в пределах одного года. Интересен этот показатель тем, что в период с 2009 по 2011 год он теряет по одному проценту: если в 2009 г. в нашей статистике на «первогодков» приходилось 4,7%, то в 2010 – 3,7%, а в 2011 – 2,7%. Судя по всему, новые студии теперь появляются реже, что может свидетельствовать о входе рынка в стадию зрелости.

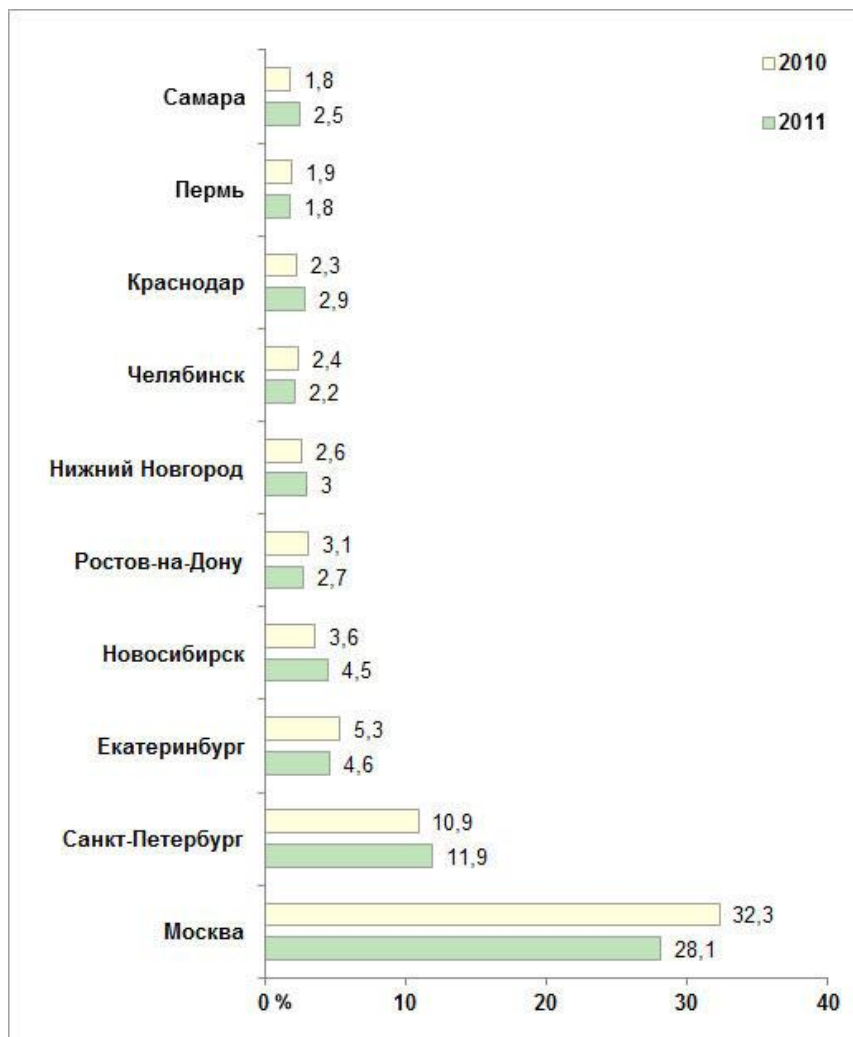


Рис. 1. Распределение веб-студий по городам России (%)

Данные по численности сотрудников стабильны и, видимо, будут таковыми на протяжении многих лет вперёд – 66% студий в 2011 году имели в штате от 4 до 15 человек.

Количество реализованных проектов – это ещё один параметр, который очень мало изменяется со временем. Чисто технически сайты можно производить «на потоке». Но при этом необходимо учитывать специфику конкретной компании и личные предпочтения заказчика, а это существенно ограничивает производственные возможности веб-студии. В итоге абсолютное большинство (82%) студий имеют в своём портфолио менее 50 проектов.

Отслеживание средней стоимости интернет-проекта не даёт ответа на вопрос о том, сколько на самом деле стоит сайт. Однако оно позволяет увидеть тенденции рынка в целом. В 2011 году наблюдался практически повсеместный рост средней цены интернет-проекта: от 28 тыс руб. в Северо-Кавказском федеральном округе до 179 тыс руб. в Центральном (рис. 2).

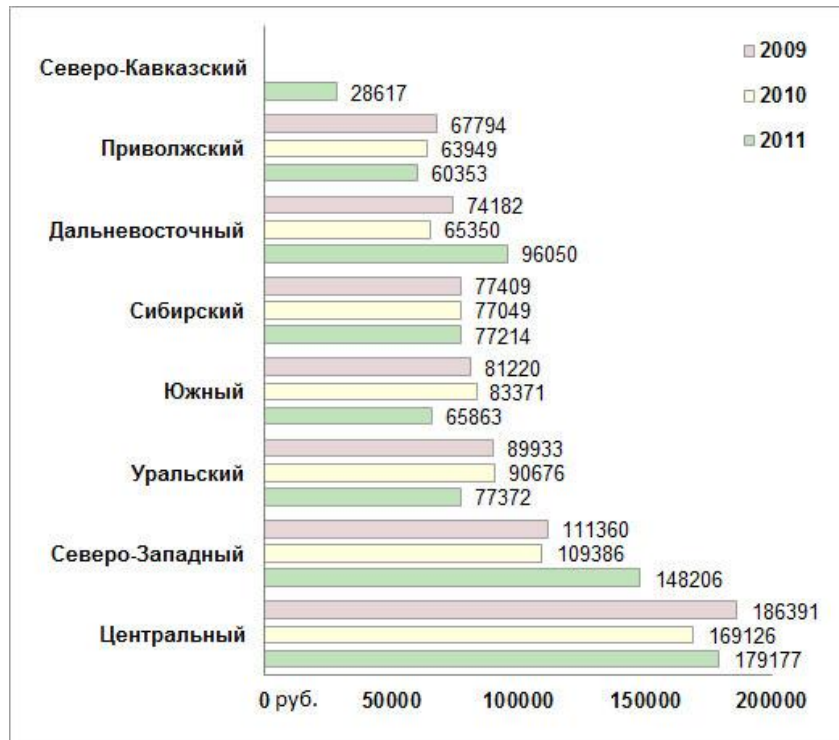


Рис. 2. Средняя стоимость услуг на разработку сайта

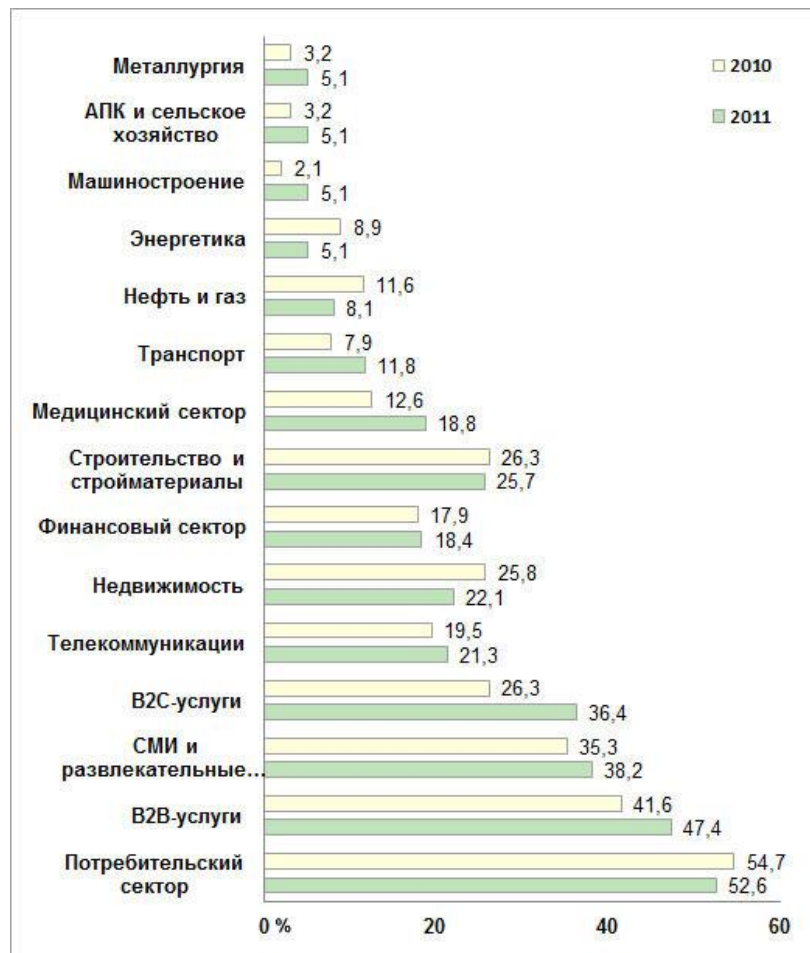


Рис. 3. Прогноз по отраслям экономики, заинтересованных в разработке сайта (ожидания веб-студий, в %)

По сравнению с 2009 и 2010 годами показатели Северо-Западного региона значительно выросли – средняя стоимость разработки повысилась за год сразу на 35%. Похожая динамика наблюдается и в Дальневосточном округе – там годовое увеличение средней цены составило целых 47%! В свою очередь, три округа – Уральский, Южный и Приволжский – продемонстрировали отрицательную динамику, снизив среднюю стоимость разработки. И, наконец, Сибирский округ выглядит на фоне остальных очень стабильно, сохраняя среднюю стоимость разработки неизменной три года подряд.

Отметим, что на значение параметра «Средняя стоимость услуг в федеральном округе» влияет сразу несколько факторов. В целом средняя цена связана с уровнем экономического развития округа – чем более развита его экономика, тем больше в нём кредитоспособных клиентов для веб-студий и, соответственно, возможностей для повышения стоимости веб-разработки. Однако эта зависимость соблюдается не всегда, потому что веб-студии могут работать и с удалёнными заказчиками. То есть появление или исчезновение в округе студий, работающих с дорогими проектами для столичных или европейских заказчиков, будет существенно влиять на среднестатистическую картину по местному рынку. Хотя с местными заказчиками такая студия может вообще не работать.

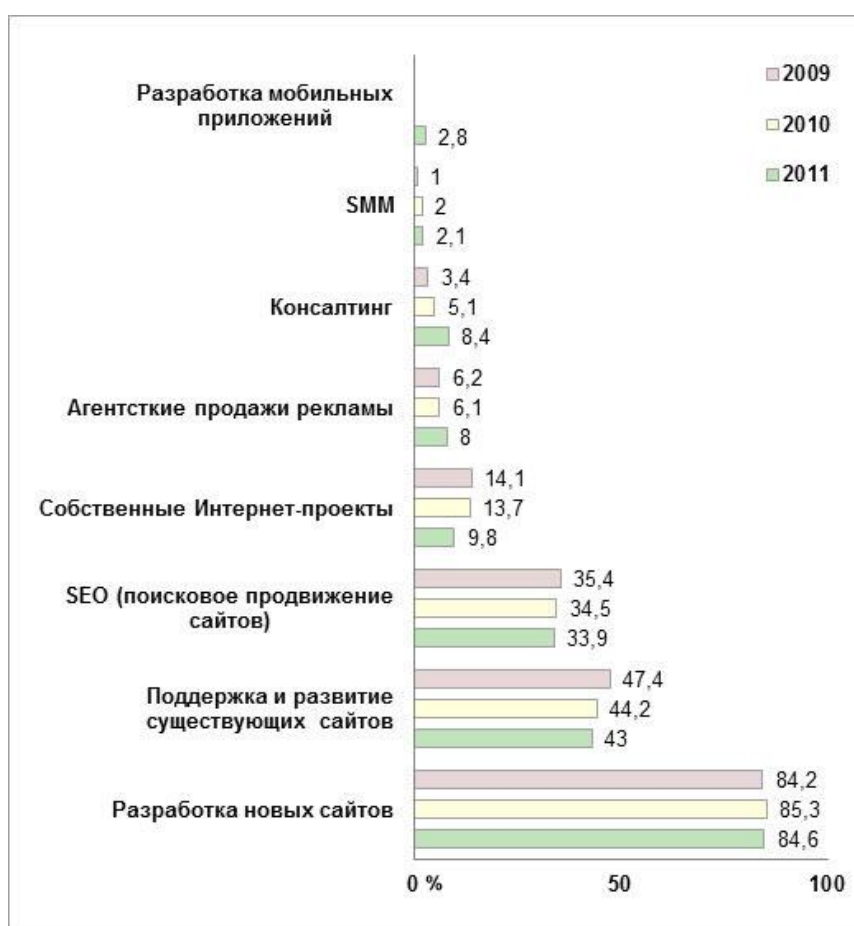


Рис. 4. Источники доходов веб-студий

Важный прогноз, сделанный веб-студиями, касается отраслей рынка, заинтересованных в разработке сайтов. В 2012 году студии ждут появления новых проектов в следующих отраслях, представленных на рис. 3.

Лидером ожиданий был и остаётся потребительский сектор. В прогнозе на 2011 год видно незначительное снижение (примерно на 2%), но эти колебания несущественны – в любом случае, более 50% веб-разработчиков ждёт заказов именно в этой области. Ожидается рост и по четырём следующим отраслям – B2B-услуги, СМИ и развлекательные порталы,

В2С-услуги и телекоммуникации. При этом рост заказов в сфере В2С-услуг ожидается довольно значительный: плюс 10% по сравнению с 2010 годом (с 26,3% до 36,4%).

Очевидно, что основу дохода современных веб-студий составляет разработка новых сайтов. Но на чём зарабатывают студии помимо этого? Общая картина по рынку практически неизменна на протяжении последних трёх лет – наблюдаются лишь небольшие колебания и появляются новые услуги (в данном случае – разработка мобильных приложений), что отобразено на рис. 4.

Маркетинг веб-студий исследован на базе их опроса. Главное – это определить источники, дающие студиям реальных клиентов. Данные представлены на рис. 5.



Рис. 5. Фактические каналы получения заказов на интернет-проекты, 2011 г.

На протяжении всех трёх лет проведения исследования абсолютное лидерство удерживает «рекомендательный маркетинг». Около 90% опрошенных веб-студий получают новых клиентов по рекомендациям, в то время как через рекламу привлекают клиентов не более 20% студий. Впрочем, это вовсе не означает, что реклама имеет 20%-ю эффективность – значительная часть студий вообще не размещает рекламы, довольствуясь другими источниками.

Второй мощный источник клиентов – ссылки с проектов, разработанных студией. На протяжении трёх лет этот показатель несколько снизился, однако остаётся вторым по значимости – его отметило более 60% опрошенных.

Ещё одна примечательная тенденция – рост клиентов, получаемых через участие в тендерах. Этот показатель может означать как возросшую активность самих веб-студий, готовых тратить силы на «соревновательные» проекты, так и то, что заказчики всё чаще используют тендер для поиска исполнителя Интернет-проекта.

Следующий вопрос исследования касался планирования маркетингового бюджета. Студиям предлагалось ответить на вопрос: «На какие каналы продвижения вы собираетесь направить основную часть маркетингового бюджета компании в 2012 году?». Данные примерно соответствуют рис. 5. Главный тренд нынешнего времени – SMM-продвижение (продвижение через социальные медиа). Его вес в маркетинговых планах практически сравнялся с весом SEO, причём если у последнего мы наблюдаем спад, то для SMM пик популярности ещё явно впереди.

Реклама в печатных СМИ, которая и ранее была не очень популярна, в 2012 году теряет ещё полтора процента – тратиться на неё планируют 4,1% опрошенных. И это даже много, учитывая, что в 2010 году отдачу от такой рекламы получили лишь 1,6% студий. Данные по России в целом отличаются от приведенных выше незначительно. Выборка данных по городам-миллионникам без Москвы и СПб показывает рост средних зарплат по всем специальностям, связанным с интернет-проектами – рис. 6.

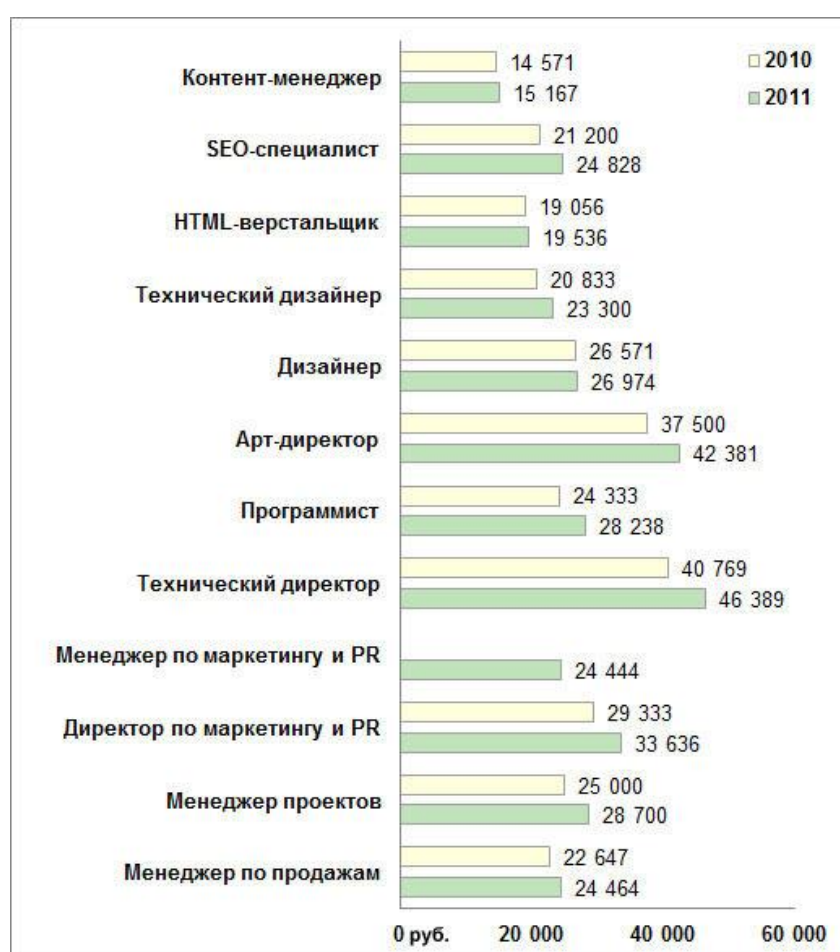


Рис. 6. Динамика зарплат, города-миллионники

В этих городах средний уровень зарплаты по всей отрасли за год вырос примерно на 15%. Динамика средних зарплат однозначно указывает на мощное развитие рынка, при котором, с одной стороны, у игроков появляются средства, позволяющие повышать зарплаты, а с другой – усиливается кадровая конкуренция, вынуждающая работодателей всё увеличивать и увеличивать зарплаты специалистов.

В итоге можно сделать вывод – интернет-бизнес имеет реальные перспективы продолжительного роста в течение ближайших 3–5 лет. Роль Интернет-проектов в деятельности предприятий всех отраслей экономики России будет неуклонно расти.

Библиографический список

1. Элитариум. Центр дистанционного образования. Электронный ресурс.
2. Режим доступа: <http://www.elitarium.ru/>
3. Уральский государственный технический университет. Кафедра «Прикладная информатика». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.capri.ustu.ru/>
4. Интернет - портал «Иннов». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.innov.ru/>
5. Дизайн – студия «Иннов». Электронный ресурс. Режим доступа: <http://design.innov.ru/>
6. Рейтинг Рунета. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://www.ratingruneta.ru/>
7. Колесов, К.И. Методологические аспекты стратегического контроллинга на основе многоуровневого подхода: дисс. ... канд эконом. наук / Нижегородский государственный технический университет / Колесов К.И. – Нижний Новгород, 2007.
8. 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 26.03.2013*

A.N. Zaytsev ¹, D.A. Zaytsev ¹, S.A. Borisov ²

MARKET INTERNET PROJECTS FOR BUSINESS: STATE PERFORMANCE AND OUTLOOK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
LLC “ Innov”, Nizhny Novgorod ²

Purpose: At present many companies are interested in establishing their own websites to promote products and services. For creating websites, many of them prefer to use the services of a professional web studios. The main purpose of this paper is to study the market web studios, conducted on behalf of companies who are interested in the creation of the corporate website for the company. Also, this article might be of interest to firms by the creators of websites, as well as people who want to find work in this area.

Design/methodology/approach: The main research method presented in this paper is the study of materials sites, which reflect the dynamics of the various services web studios, the average cost of website development, industries that are interested in developing the site, sources of income web studios, the dynamics of salaries of employees in the area of Internet projects. After careful study of this web sites, reflecting the figures, was held systematization of the data by constructing various charts and graphs.

Findings: The main results obtained by this study show the effectiveness of the business web studios reflect the most important trends in this kind of business. Also they indicate a further development of this area in the future.

Originality/value: A study in the article is complex and describes various aspects of the market web studios in Russia.

Key words: Internet, corporate web –site, web studio, marketing, internet project

УДК 338.2

Р.Ш. Мансуров, Е.С. Лещенко

**ОСНОВНЫЕ ЦЕННОСТИ И ПРОБЛЕМЫ СОВРЕМЕННЫХ КОМПАНИЙ,
ДЕЙСТВУЮЩИХ В РЫНОЧНЫХ УСЛОВИЯХ ХОЗЯЙСТВОВАНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено, каким образом утверждается власть гражданского общества; какое влияние оказывает электронная коммерция нового поколения на процессы менеджмента; а также вопросы социальной ответственности корпораций и кому следует отдавать предпочтение из заинтересованных сторон.

Ключевые слова: экономика, власть, электронная коммерция, менеджмент, виртуальный рынок, электронная коммуникация, глобализация, маркетинг, конкуренция.

В настоящее время три основных направления эволюции оказывают и будут продолжать оказывать глубокое влияние на функционирование рынков: 1) глобализация мировой экономики; 2) интеграция электронной коммерции в профессиональную и личную жизнь; 3) появление новых ценностей, укрепляющих модель рыночной экономики, нацеленную на устойчивое развитие. В индустриально развитых странах потребители более образованны и испытывают влияние культуры консьюмеризма, вследствие чего представляют собой реальную силу ответственных граждан-потребителей, которую фирмы и власти более не в состоянии игнорировать.

Нового потребителя отличают шесть характерных особенностей:

1. Чувство власти: потребители имеют дело с рынками многочисленными предложениями и множеством торговых марок; на этих рынках идет интенсивная конкуренция за лояльность покупателя и существует множество источников информации.

2. Профессиональное покупательское поведение: хорошо образованные и опытные потребители являются умными покупателями, которые способны сделать выбор между торговыми марками, магазинами, рекламой и рекомендациями продавцов. Из пассивных потребителей они превращаются в активных.

3. Взаимосвязь между удовлетворением, восхищением и лояльностью: новый покупатель, не получив удовлетворения, возлагает ответственность на фирму. Таким образом, неудовлетворенный покупатель является потерянным покупателем, что имеет разрушительный эффект на рынках с нулевым ростом, где найти замену утраченному потребителю сложно и дорого.

4. Поиск новых ценностей: в индустриально развитых странах экономическое процветание и массовое потребление подняли планку ожиданий потребителей и заставили их перейти от материальных потребностей к поиску новых ценностей.

5. Потребность в диалоге: потребителей представляют сильные и влиятельные общества защиты прав потребителей и неправительственные организации.

6. Помимо всего прочего, потребители нуждаются в этичном поведении: они не хотят испытывать чувство вины из-за покупки какого-то товара или рекламы, связанной с этим торговыми марками.

Изменения, произошедшие в самое последнее время, получили название «политически корректного потребления» (или ответственного потребления). При совершении покупки потребитель уделяет большое внимания тому, что приобретение того или иного бренда – это своего рода политический акт. Выбор торговой марки или компании сравним с политическим голосованием: мы выбираем того кандидата, которому доверяем. Аналогично, на рынке люди принимают политически корректные решения о покупке.

Усиление власти граждан порождает новые ожидания, которые вносят свой непосредственный вклад в улучшение деятельности и повышение прозрачности рынка: в свободу выбора, улучшение качества информации, ценовое давление, безопасность товаров, послепродажные обязательства производителей и экологически чистые товары. Эта власть является мощным противовесом власти компаний и даже государственных органов. В настоящее время развиваются новые и более ответственные отношения между потребителями и индустриальным миром, что бросает вызов стереотипу беззащитного и легко управляемого потребителя. Глобализация мировой экономики повышает сложность рынка: обостряется конкуренция, новые действующие лица превращаются в сильных игроков, потребители обретают право голоса, а инновации в сфере спроса и технологий меняют структуру традиционных рынков. Усложнение рынка создает огромные сложности для фирмы и требует более глубокого понимания глобальной ситуации и более детального стратегического анализа поведения рынка.

Новые информационные и коммуникационные технологии в течение последних пяти лет росли экспоненциально. Однако скорость изменений нередко вызывала у компаний замешательство, порождая дискуссии о том, как в будущем должны быть организованы рынки и какие стратегии маркетинга следует разрабатывать. Фактически в настоящий момент мы имеем дело со вторым поколением электронной коммерции. Под электронной коммерцией мы подразумеваем любой обмен с помощью электронных средств коммуникаций, относящийся к коммерческой и маркетинговой деятельности фирмы, который способствует установлению и развитию отношений между покупателями, поставщиками и / или любыми другими партнерами.

Основные особенности электронной коммерции хорошо известны: виртуальная вездесущность спроса и предложения – легкий доступ к качественной информации для широкой публики в любое время и в любом месте – сравнение предложения и цен в масштабах всего мира – отсутствие барьеров для вступления на рынок онлайн-торговли – разделение производства и продажи – равные возможности для каждого продавца и прочее. Эти особенности электронной коммерции повышают эффективность рынков. Мы близки к ситуации чистой (или совершенной) конкуренции, при которой в какой-то степени нейтрализуются методы стратегического маркетинга (дифференциация, инновация и лояльность). В этом контексте задача по созданию ценности для клиента усложняется, учитывая существующие ограниченные возможности для дифференциации и отсутствие защиты новых идей. В условиях такой новой ситуации фирма, контролирующая доставку товаров и услуг на рынок, обладает важным конкурентным преимуществом. В традиционных структурах бизнеса продавца рассматривается и организуется как «служанка производства». В случае электронной торговли, вместо того чтобы продавать произведенный товар, виртуальная компания продает то, что она может доставить, и неважно, кто именно произвел эти товары и услуги. Основной компетенцией становится контакт с рынком средствами физического сбыта и логистики [1].

Одной из основных причин неудач компаний-новичков новой экономики было отсутствие предложений, надлежащим образом дифференцированных от предложений традиционных магазинов. Онлайн-операции вовсе не должны прийти на смену традиционным видам деятельности. Задача заключается в том, чтобы внести изменения в традиционное предложение: сделать его более глобальным или представить в виде комбинации нескольких традиционных предложений, чтобы предоставить клиенту большую ценность.

Анализ добавленной стоимости, основанный на так называемой метарыночной концепции, позволяет сделать предложение или целый спектр предложений, соответствующее всем элементам деятельности и услугам и охватывающее когнитивное пространство клиента. Хотя в настоящее время рынки, как правило, организованы по принципу товаров и услуг,

процесс приобретения потребительских товаров организован в соответствии с видами деятельности, имеющими отношение к когнитивному пространству.

Онлайновые фирмы могут сочетать концепцию рыночного предложения, основанную на товарах, с концепцией метарынка, базирующейся на логике и восприятия потребителя. Итак, концепция метарынка открывает перед виртуальной фирмой возможность реализовать на практике стратегию ориентации на покупателя. Благодаря этому онлайн-рынок может позиционировать себя как нового посредника между покупателями и продавцами, разрушая традиционные сектора и создавая конкуренцию, выходящую за рамки привычных рыночных границ.

Как только компании идентифицировали потенциальные сферы использования электронной коммерции, необходимо выяснить, дополняют ли или заменяют онлайн-операции физические.

Тем не менее, онлайн-операции не полностью заменяют собой реальные. Во многих случаях лучшее решение подразумевает комбинацию двух видов деятельности, взаимодополняющих и стимулирующих друг друга (концепция сочетания виртуальных и реальных операций). Нередко совершается классическая ошибка: в онлайн-режиме выполняется то, что в реальном мире делается вручную, просто чтобы сократить издержки. В этом случае стратегия маркетинга должна диктовать политику компании.

Другой стратегический вопрос, возникающий в связи с онлайн-торговлей, – это изменение конфигурации сети дистрибуции. Существует широко распространенное мнение о том, что электронная коммерция поможет компаниям напрямую контактировать с конечными покупателями, «перепрыгнув» через существующую сеть дистрибуции и сократив, таким образом, транзакционные издержки. Благодаря электронным средствам связи можно напрямую контактировать с покупателем, открывая перед ним возможность осуществить прямой заказ по более низкой цене. Эта тенденция называется «устранение посредников».

На самом деле все обстоит гораздо сложнее. В отдельности стоимость прямого контакта, естественно, гораздо ниже, однако менеджеры должны учитывать полные транзакционные издержки. Во многих случаях снижение стоимости межличностных отношений с лихвой покрывается существенно выросшими расходами на логистику. Вопрос заключается не в том, чтобы обойти стороной дистрибьюторов; скорее нужно перераспределить задачи и функции между существующими участниками сети сбыта. Это перераспределение задач прежде всего касается информации о товаре, консультирования покупателей, послепродажного обслуживания, физической доставки, пакетов услуг и демонстраций товара.

Итак, проблема состоит прежде всего в перераспределении задач среди действующих участников сети сбыта. Поэтому фирма может напрямую иметь дело с конечными покупателями там, где речь идет о предоставлении самой свежей информации, а посредникам можно оставить задачи, решение которых требует физической близости к потребителю [2].

Использование технологий онлайн-торговли вовсе не означает, что компания немедленно должна начать действовать на глобальном уровне. Хотя электронная коммерция облегчает коммуникацию, международная доставка товаров и логистика все еще требуют специфического опыта и значительных финансовых ресурсов. Поэтому решения о географическом охвате рынка следует принимать только после рассмотрения физических (доставка) и психологических (коммуникация) аспектов.

Впечатляющее развитие новых информационных и коммуникационных технологий и обусловленная им глобализация мирового рынка могут создать иллюзию того, что отныне расстояния ничего не значат. На самом деле понятие расстояния имеет много аспектов; необходимо различать четыре параметра расстояния: географический (физическая удаленность), административный (соглашения о преимущественной торговле), экономический (различия в богатстве) и культурный (лингвистические связи). Новые информационные и ком-

муникационные технологии уничтожили всего лишь один компонент географического расстояния: коммуникацию.

Развитие электронных методов коммуникации не только изменило роли личной продажи и рекламы, но и модифицировало задачи и содержание рекламного сообщения. Самым важным следствием электронной коммуникации стало резкое снижение расходов, связанных с взаимодействием, то есть общефирменных расходов, которые тратятся на то, чтобы склонить людей к совместной работе, собирать информацию, координировать деятельность и обмениваться товарами и услугами. В компаниях, действующих в условиях развитой экономики, эти расходы составляют до 55% от общих расходов на административные нужды. Снижение расходов на телекоммуникацию и транспорт, а также массовое распространение более дешевой информации уничтожает барьеры между рынками и открывает доступ на международный рынок любому человеку, у которого есть талант или идеи.

Индивидуализация онлайн-коммуникации создает потребность в персонализированных данных, необходимых для кастомизации предложения. Следовательно, любая информация, способная дифференцировать потенциального покупателя и нарисовать его детальный профиль, имеет коммерческую ценность. Такая ситуация, сложившаяся в результате сложного взаимодействия различных факторов, оказывает влияние на компании и заставляет их переосмыслить свои обязанности по отношению к обществу и рассматривать рыночную экономику в совокупности с окружающей средой, со всеми ее сильными сторонами, а также слабостями и ошибками. Сегодня все больше голосов (Европейской комиссии, лидеров бизнеса, негосударственных организаций и т.д.) раздается в поддержку устойчивого развития и так называемого менеджмента в интересах всех групп влияния (заинтересованных сторон).

Осведомленность о дефиците природных ресурсов отражает изменение отношения к потреблению, которое более не рассматривается само по себе; отныне не учитываются восходящие (альтернативные издержки) и нисходящие (расходы на профилактику и ремонт) последствия. Глобализация способствует распространению этой новой культуры, по мере того как взаимосвязь рынков непрерывно усиливается, а сбыт и производство распространяются все шире по планете. Глобализация мировой экономики ставит вопрос о роли государства и глобального управления. Рыночная экономика нуждается в сильном управлении, которое бы определяло и контролировало правила конкурентной борьбы. Государство должно обеспечить необходимый баланс между важнейшими макроэкономическими вопросами (например, поддерживать ценовую стабильность) и хотя бы минимальной социальной сплоченностью и солидарностью. Для того чтобы рыночная экономика, будь она национальной или глобальной, нормально функционировала, необходимо сильное управление.

Во всем мире фирмы принимают на вооружение концепцию корпоративной гражданской ответственности. Ответственная корпорация признает, что она несет ответственность не только перед своими акционерами, но и перед обществом в целом. Участвуя в социальной жизни, ответственная корпорация направляет свои ресурсы и опыт на решение социальных проблем, зачастую сотрудничая с властями. В современном мире корпорации представляют собой самую могущественную силу, ведущую к переменам.

В условиях новой мировой экономики этичное поведение не только не противоречит целям современного капитализма, но и является конкурентным преимуществом, поскольку отвечает требованиям рынка. Опять-таки взаимозависимость рынков, обусловленная глобализацией, приводит к тому, что эти новые стандарты поведения становятся императивом для любой фирмы, которая хочет стать участником мирового рынка.

Предприятия должны отчитываться за качество своей работы по экономическим, природоохранным и социальным критериям и пытаться удовлетворить интересы заинтересованных сторон по всем группам критериев.

Главная проблема социальной ответственности корпораций связана с контекстуаль-

ной природой того, что составляет «общественное благо». Отношения с работниками и покупателями занимают господствующее место в вопросах, связанных с заинтересованными сторонами. Существуют очень убедительные данные о связи между ориентацией на покупателя и финансовой эффективностью корпорации. Как правило, компании, более чутко относящиеся к покупателям, получают большую прибыль. Что касается других задействованных сторон, кроме работников и покупателей, то доказательства связи между отношениями с ними и финансовой эффективностью достаточно слабы [3].

Таким образом, в условиях конкурентной рыночной экономики нет иного пути создания сначала ценности для покупателей. Цель удовлетворения покупателей должна стать главной заботой фирмы, исповедующей философию ориентации на рынок. Поэтому цель удовлетворить покупателей в конечном итоге побуждает фирмы ориентироваться на все заинтересованные стороны. Фирма, ориентированная на рынок, с радостью пойдет по такому пути, поскольку это обеспечит повышение ценности для акционеров.

В условиях глобализации экономики роль стратегического маркетинга важна как никогда прежде. Он остается лучшим механизмом адаптации спроса к предложению, но, помимо этого, стимулирует развитие широкого спектра направлений экономического и социального развития. Стратегический маркетинг подкрепляется социальными, культурными и технологическими изменениями, наблюдаемыми на сегодняшнем рынке. Эти изменения во взаимосвязанной мировой экономике создают повод для оптимизма: они вносят свой вклад в развитие более демократической прозрачной экономики, основанной на новых ценностях. В этой новой среде ключевую роль предстоит сыграть национальным и наднациональным властным структурам: они должны проводить мониторинг и контролировать инициативы, направленные на удовлетворение возникающих потребностей, что позволит примирить рыночную эффективность с императивами социального видения.

Парадигма ориентации на рынок имеет комплексный характер; ее можно определить с точки зрения трех параметров: культуры, анализа и действия.

Культура. Корпоративная философия – это философия социальной рыночной экономической системы. Именно создавая ценность для покупателя, фирма достигает своих собственных целей, заключающихся в получении прибыли и росте, и, следовательно, создает ценности для акционеров. Еще важнее то, что достижение этих целей усложняется в глобальной и взаимосвязанной конкурентной экономике. Более того, чтобы соответствовать ожиданиям новых покупателей, компании должны объединить цели устойчивого развития и социальной солидарности. Такая интеграция является отличительной характеристикой социальной рыночной экономической системы, модели, общепринятой в Европейском союзе.

Анализ. Цель стратегического маркетинга – предложить четко определенному рыночному сегменту устойчивую ценность, одновременно отличную от ценностей конкурентов и доступную фирме. В условиях новой экономики эта цель усложняется, учитывая сложность мирового рынка, на котором появились новые могущественные силы – волеизъявления гражданского общества, власть потребителей, мощные негосударственные организации, торговые фирмы для массового потребителя и т.п. Сложность рынков делает необходимым создание стратегического мозга фирмы.

Действие. Благодаря развитию информационных и коммуникационных технологий коммерческий арсенал фирмы обладает немислимыми ранее возможностями: индивидуальной сегментацией, персональной коммуникацией, доступом на мировой рынок в любое время и в любом месте, низкими барьерами при входе на рынок, кастомизированным ценообразованием, продажей, основанной на отношениях, и т.д. Таким образом, возникла возможность отойти от «стратегии товара» и перейти к «стратегии решения». В результате этих изменений массовый маркетинг превращается в «массу ниш».

Библиографический список

1. **Anderson, E.W.**, Fornell, C. and Mazvaneryl, S.K. (2004), Customer Satisfaction and Shareholder Value, Journal of Marketing, 68, 4.
2. **Keegan, W.J.** (1989), Global Marketing Management, Englewood Cliffs, NJ, Prentice-Hall International, 4th edition.
3. **Ламбен, Ж.-Ж.** Менеджмент, ориентированный на рынок: [пер. с англ. под ред. В.Б. Колчакова] / Ж.-Ж. Ламбен, Р. Чумпитас, И. Шулинг. – 2-е изд. – СПб.: Питер, 2012. – 720 с.

*Дата поступления
в редакцию 26.03.2013*

R.Sh. Mansurov, E.S. Leshenko

MAIN VALUES AND PROBLEMS OF MODERN COMPANIES WORKING IN THE MARKET ECONOMIC CONDITIONS

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

This article will be useful for companies planning to use the services of web-studio, as well as by the Web companies. In addition, it will be interesting to anyone who is planning to devote himself to a career in the field of Internet projects.

Key words: Internet, corporate web –site, web studio, marketing, internet project.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 316.653 (07)

Е.В. Коровина¹, Е.А. Андреев²

КОММУНИКАТИВНЫЕ АСПЕКТЫ РАБОТЫ С ПЕРСОНАЛОМ В ОРГАНИЗАЦИЯХ СОЦИАЛЬНО-КУЛЬТУРНОГО СЕРВИСА И ОБРАЗОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Российский государственный торгово-экономический университет
(Волгоградский филиал)²

Практики коммуникационного менеджмента давно выявили связь между успешной работой организации и коммуникативной политикой по отношению к персоналу, которая проводится руководством организации через менеджеров разного уровня. Умелое направление внутрикоммуникативных потоков крайне важно не только для включения персонала в процесс принятия решения, но и изменения поведения работающих, их мотивации к труду, целям организации, внешнему имиджу и репутации. Авторы рассматривают коммуникативные аспекты менеджмента организаций и возможные действия коммуникативных менеджеров по разрешению возникающих проблем. В качестве примера рассмотрены организации, предоставляющие услуги в социально-культурной и образовательной сферах.

Ключевые слова: коммуникационный менеджмент, внутриорганизационные коммуникации, коллектив, команда, руководитель, профессиональная подготовка деловые коммуникации, этика.

В условиях жесткой конкуренции среди образовательных учреждений и сервисных организаций проблема профессионализма коллектива и его способности выживать в экстремальной ситуации выходит на одно из первых мест. К тому же в России продолжается сокращение учреждений высшего образования как бюджетных, так и коммерческих. Доказать свой профессионализм и перспективность способен, по мнению авторов, только сплоченный коллектив. Обращение к проблемам коммуникационного менеджмента дает возможность переосмыслить внутриорганизационную коммуникативную политику по отношению к персоналу.

Маркетинг социально-культурного сервиса представлен коммерческими предприятиями крупного, среднего и малого бизнеса. Все эти формы хорошо вписываются в новые экономические, рыночные отношения. Рынок образовательных услуг в сфере высшего образования сегодня представлен коммерческими и некоммерческими учреждениями, среди которых конкуренция значительно усиливается решением Правительства РФ. о сокращении количества вузов.

Повышение жизненного уровня российского общества повлекло за собою динамичное развитие гостиничного, ресторанного и туристического бизнеса, а также сферы образовательных услуг. Другой его стороной явились требования высокого уровня обслуживания в данной сфере. Жесткая конкуренция на рынке социально-культурного сервиса и образовательных услуг сделала этот показатель одним из важнейших в конкурентной борьбе. Задачу организаций, которые работают в указанной сфере, усложняет тот факт, что они тесно связаны между собою, так как выполняют единую для общества миссию – удовлетворять потребности людей в сфере социально-

культурного обслуживания. Отдых и туризм, командировки и участие в конференциях приводит нас к необходимости сталкиваться с организациями социально-культурного сервиса.

Разработка эффективных внутрифирменных коммуникаций крайне важна как для включения персонала в процесс принятия решения, так и для изменения поведения работающих, их отношения к труду, целям организации. Эффективность деятельности коммуникативных менеджеров во многом зависит и от менеджмента руководителя, которому следует помнить о своей доле ответственности за морально-психологический климат в коллективе.

Для того, чтобы обеспечить стабильность предприятия сервиса: ресторана, гостиницы, туристического агентства или экскурсионного бюро, его финансовую устойчивость и хорошую репутацию на рынке, руководитель должен располагать такими работниками, которые способны к творческой деятельности. Те же требования характерны и для сферы образования. Выбор предприятия или учреждения сервиса не всегда определяется только возможностями кошелька, но квалификацией коллектива, его умением ненавязчиво предоставить спектр возможных услуг.

Коммуникативный менеджмент по отношению к персоналу и внутриорганизационным коммуникациям должен быть направлен на мотивацию к нововведениям, развитию сотрудничества внутри коллектива, достижения оптимального конечного результата. В современных рыночных условиях необходима не просто группа сотрудников, а дружный, творческий, самонастраивающийся коллектив. На создание и совершенствование подобного партнерского, корпоративного сотрудничества в организациях сервиса в различных сферах должна направляться деятельность руководителя. Например, руководитель коммерческой организации обеспечивает финансовое благосостояние своего заведения не столько личными решениями и указаниями, сколько благодаря оптимальному, творческому, нестандартному использованию находящегося в его распоряжении персонала. Приобщение сотрудников к целям организации требует определенных совместных усилий коммуникативных менеджеров и руководителя. Одной из целей совместных усилий является формирование поведения, которое ориентирует персонал на совместную деятельность. В качестве условий и предпосылок формирования кооперативной взаимозависимости следует выделить:

- свободу и открытость информационного обмена;
- взаимную поддержку действий, убеждение в их оправданности;
- доверие, дружелюбие в отношениях сторон [1, с 44].

К примеру, в обязанности руководителя входит разработка концепции управления трудовым коллективом. Главная задача в этой области состоит в создании условий, которые способствуют реализации каждым работником своих потенциальных возможностей, возбуждения в сотрудниках энтузиазма, стремления выполнять производственные задания с наибольшей отдачей. Общеизвестно, что успех в сервисном бизнесе во многом предопределяется умением руководства работать с коллективом. При этом большое влияние оказывают и личные качества руководителя. Поэтому в организациях сервиса сегодня очень высоко ценятся способность ресторатора, управляющего гостиницей или заведующего кафедрой, который отвечает за качество образовательных услуг, найти оптимальный способ организации успешной деятельности коллектива, его умение выстраивать коммуникации с каждым сотрудником на основе современных требований психологии и педагогики управления. В каждом конкретном случае руководитель должен найти наилучший метод воздействия на сотрудника.

Современная теория менеджмента предлагает рекомендации по решению всех этих важнейших проблем. Среди таких рекомендаций: улучшение профессиональной подготовки сотрудников, налаживание оптимального взаимодействия между подразделениями организации, усиление роли подразделений и отделов организации в решении оперативных (текущих) задач, расширение стратегических возможностей в работе управленческого персонала (менеджмента) [3].

Важнейшим принципом, который должен быть положен в основу руководства персо-

налом, является ответственность каждого работника за результаты своего труда. К тому же каждый работающий обязан знать, кому он подчинен и от кого может получать приказания.

Сегодня социально-экономические и социально-психологические методы управления персоналом должны преобладать над административными. Умелый руководитель направляет свои усилия на осуществление сотрудничества персонала и администрации для достижения поставленных перед организацией целей. Все чаще применяется принцип коллегиальности, при котором менеджеры работают в тесном контакте друг с другом и с обслуживающим персоналом.

Главным в менеджменте организаций сервиса и образования становится побуждение работников к развитию их способностей, так как данный фактор необходим для более интенсивного и продуктивного труда. Менеджер выстраивает коммуникации с членами своей команды, ориентируя их на проблемы, стоящие перед организацией. Эти коммуникации не должны принимать вида приказа. Здесь, на наш взгляд, более уместен «вопрос» или «доброволец», в котором заключается реальная оценка работником своих способностей.

Коммуникативному менеджеру, так же, как и руководителю, крайне необходимо выбрать правильную форму подачи информации и распоряжений, учитывая, прежде всего, два фактора: 1) ситуацию, выход или разрешение которой требует времени; 2) личность подчиненного (кто перед вами, добросовестный и квалифицированный работник или человек, которого нужно подталкивать на каждом шагу). В зависимости от этого менеджеру следует выбирать соответствующие этически наиболее приемлемые нормы собственного поведения и формы распоряжения.

Управленческая психология, этика и нормы делового общения предлагают нам следующие формы распоряжения:

Приказ. Эта форма чаще всего используется в чрезвычайной ситуации, а также применима в отношении недобросовестных сотрудников.

Просьба. Используется в условиях рядовой ситуации в случае доброжелательных, доверительных отношений между руководителем и подчиненным. Такая форма позволяет сотруднику высказать свое мнение на проблему в том случае, если она по каким-либо причинам не может быть решена. А если соответствующим образом произнести фразу, то у сотрудника не возникнет никакого сомнения, что это приказ.

Вопрос. «Есть ли смысл заняться этим?», «Как мы должны это сделать?». Данную форму распоряжения лучше применять в тех случаях, когда руководитель стремится вызвать обсуждение, и найти оптимальные пути, чтобы сделать работу или подтолкнуть сотрудника к тому, чтобы он взял инициативу на себя. При этом сотрудники должны быть добровольными и достаточно квалифицированными. В противном случае некоторые могут воспринять вопрос менеджера как проявление слабости и некомпетентности.

«Доброволец». «Кто хочет это сделать?». Подходит для такой ситуации, при которой работу не хочет делать никто, но, тем не менее, она должна быть сделана. В этом случае доброволец надеется, что его энтузиазм будет соответствующим образом оценен в дальнейшей работе [2].

К тому же коммуникативный менеджер ранжирует стоящие перед командой проблемы по значимости, помогая раскрытию способностей каждого работника, формирует вокруг себя группу единомышленников.

Как известно, особое значение в наше время отдается созданию и функционированию гибких, самонастраивающихся структур, которые именуется командой. Команда — это тщательно сформированный, хорошо управляемый, самоорганизующийся коллектив, быстро и эффективно реагирующий на любые изменения рыночной ситуации. Поэтому весьма желательно, чтобы коллектив предприятия сервиса (ресторана, гостиницы, туристического агентства) или образовательного учреждения был единой командой, умеющей самостоятельно решать возникающие проблемы. В этом случае топ менеджмент любого из перечисленных предприятий имеет больше времени для решения стратегических задач.

В последнее время особое значение стали иметь следующие положения менеджмента:

- основной стимул – стабильность и перспективность служебного положения работников;
- увольнение работника по инициативе администрации осуществляется довольно редко, поскольку сопряжено с необходимостью соблюдения множества различных правил;
- воспитание у работников чувства приверженности своей организации (ресторану, гостинице, туристическому агентству и т.д.) или учреждению осуществляется посредством издания информационных бюллетеней, журналов, демонстрации престижных видео- и кинофильмов, совместного проведения праздников и коллективных дней отдыха. На подобные цели многие представители крупного бизнеса расходуют значительные денежные средства [2; 3; 4].

Совершенствование руководства персоналом обычно происходит за счет:

- улучшения организации рабочих мест персонала;
- обеспечения более рационального планирования и использования имеющихся служебных помещений;
- проведения систематической переподготовки и повышения квалификации всех сотрудников организаций сервиса и образования;
- создания условий для стабильной занятости персонала;
- разработки и успешной реализации самых различных социально-экономических программ [3; 4; 5].

Проблема профессионализма, качества кадров является одной из важных для большинства российских предприятий социально-культурного сервиса и образования. В силу этого необходимо уделять особое внимание планомерной подготовке и переподготовке квалифицированных специалистов.

Нормативная база системы переподготовки кадров и повышения их квалификации, особенно в растущем секторе социально-культурного бизнеса, требует своего совершенствования. При этом следует определить права, преимущества и льготы для лиц, прошедших вышеназванные виды подготовок. Важно внедрение новых активных методов обучения — метод обсуждения проблем в группах (case-study), лекционный метод и программное обучение на базе специально разработанных учебных пособий.

Программы, используемые в процессе обучения и переподготовки менеджеров социально-культурного сервиса, как и во всех других сферах, должны соответствовать возросшим в настоящее время требованиям к руководителям и членам команд. К наиболее востребованным и часто используемым относятся следующие программы: улучшения коммуникаций в коллективах, формирования команд, разработки стандартов исполнения решений, управления конфликтами. Программы призваны ориентировать менеджеров на бесконфликтное управление как вверенной его заботам команды, так и организации в целом, повышение конкурентоспособности за счет максимального использования в работе человеческих ресурсов. Такой подход стимулирует экономический рост, достигаемый за счет дополнительных капиталовложений.

Следует отметить, что образовательная подготовка менеджеров социально-культурного сервиса и туризма, так же как и индустрии гостеприимства, требует значительной корректировки. Опыт преподавания в вузе по подготовке менеджеров данного направления выявляет имеющиеся недостатки, которыми, на наш взгляд являются сокращение социально-гуманитарной составляющей, минимальное количество часов профессиональной этики, отсутствие углубленного изучения профессиональных особенностей как клиентов, так и работы в многонациональном коллективе, а также другие знания, необходимые менеджеру в условиях ускоренной глобализации.

В качестве примера возьмем ресторанный бизнес. В настоящее время в некоторых ресторанах разрабатываются и энергично используются комплексные системы, стимулирующие творческую, нестандартную деятельность сотрудников. Участие в инновационной работе в возрастающих объемах становится формой самовыражения, новаторства, компетенции большинства работников ресторанов. Инновационный подход к обслуживающей деятель-

ности требует внедрения новой концепции подготовки кадров для ресторанов. В ее основе должно лежать становление и развитие творческой личности работников. Управление инновационной деятельностью в ресторанах предполагает создание таких организационных отношений, которые позволили бы использовать творческий потенциал всего коллектива. Поэтому благоприятный морально-психологический климат в коллективе ресторана, становится его важнейшим стратегическим ресурсом. Это особенно важно, так как некоторые исследователи предрекают скорый конец «золотого века быстрых денег». Наступает время обычной нормы прибыли. При этом встает вопрос мобилизации многих неиспользованных ресурсов с тем, чтобы оставаться прибыльным предприятием.

По прогнозам экономистов, XXI век будет веком человеческого измерения экономики. Главнейшим условием развития ресторана будет не столько успешная динамика его экономических показателей, сколько его положение в сфере коммуникаций. Ведущую роль при этом будет играть состояние и качество человеческих ресурсов ресторанов. Таким образом, профессиональный кадровый ресурс выходит на первый план.

Уже отмечалось, что эффективная работа ресторана зависит от компетентности, предприимчивости сотрудников, их интеллекта и творческого потенциала. Но главной причиной провалов инновационных проектов остается плохой подбор кадров. Напомним, что важной задачей кадрового менеджмента является формирование высокопрофессионального коллектива. Осуществление данной задачи повышает профессиональные требования, как к руководителю, так и менеджерам по работе с персоналом. При этом на наш взгляд, необходимо начать с коммуникационного аудита сложившихся внутрифирменных деловых, нисходящих коммуникаций. Именно они должны обеспечить восприятие коллективом вырабатываемой коммуникационной политики. На основании материала аудита необходимо продумать подход к формированию коллектива, который будет включать типизацию ролевых функций его членов. Также необходимо, чтобы коллектив обладал гибкостью, творческим подходом к ролям и нормам. Главная черта такого коллектива, на наш взгляд, осознание общей ответственности, инициативность всех членов, адекватная реакция на изменения внешних условий. У сформированного таким образом коллектива, необходимо выработать установку на то, что работа в коллективе включает совместное осмысление производственных идей, создание нового продукта общими усилиями.

Исследователи считают, что основными направлениями кадровой политики ресторана в этом случае выступают:

- кадровое планирование;
- разработка профессионально-квалифицированных моделей и требований к персоналу по должностям и профессиям;
- отбор персонала;
- определение заработной платы и льгот, организация системы оплаты и стимулирования труда;
- профориентация и адаптация персонала, работа с увольняющимися;
- оценка персонала и результатов его трудовой деятельности;
- анализ и исследование персонала и рынка труда;
- совершенствование работы с персоналом [4; 5].

При приеме на работу учитываются стаж работы по специальности; опрятный и располагающий внешний вид; профессиональные знания, умения, навыки; уверенность в собственных силах, честность, энергичность, увлеченность и заинтересованность работой. При подборе работников в команды или на определенные должности следует учитывать два вида требований к ним: общепрофессиональные и специальные.

Общепрофессиональные требования к работникам ресторана, как и другим представителям сервиса, таковы:

- персонал должен быть одет в форменную одежду, принятую в соответствии с концепцией ресторана, носить именные значки. Форменная одежда должна быть в

хорошем состоянии, безупречно чистой. На личном значке указывается имя и фамилия сотрудника, его должность и эмблема заведения. Форменная одежда разных категорий обслуживающего персонала, работающих непосредственно с клиентами, должна отличаться элементами официальной отделки;

- персонал должен быть учтивым, дружелюбным, понимать гостя с полуслова;
- персонал должен быть хорошо осведомлен относительно специфики ресторана, уметь отвечать на вопросы гостей, не нарушая конфиденциальности служебной информации;
- весь обслуживающий персонал и руководители должны пройти профессиональную подготовку. Уровень подготовки должен соответствовать предоставляемым услугам;
- метрдотели, официанты, бармены, сомелье должны знать не менее одного европейского языка. В бригаду включают обычно официантов, знающих разные иностранные языки;
- регулярно (не реже одного раза в пять лет) проводится аттестация производственного, обслуживающего, административно-управленческого и технического персонала для подтверждения или повышения квалификационного разряда;
- персонал всех категорий должен проходить периодическое медицинское освидетельствование для получения соответствующего сертификата.

Таким образом, общепрофессиональные требования носят нормативно-этический характер.

Отбор работников на те или иные должности целесообразно осуществлять с помощью соответствующих профессиограмм. В профессиограмме приводится набор требований к способностям, личным и деловым качествам претендента. Аттестация работников ресторана довольно ответственное мероприятие по оценке квалификации работника и целесообразности его дальнейшего использования и повышения профессиональных знаний, навыков и умений. К персоналу ресторана предъявляются следующие требования. Как известно, эффективность работы ресторана определяется, в первую очередь, культурой обслуживания посетителей. Эта культура зависит, прежде всего, от того, насколько подготовлены сотрудники ресторана, непосредственно обслуживающие гостей. Поэтому особо высокие требования предъявляются к уровню профессиональной подготовки метрдотелей, официантов, барменов.

Любые проявления этичного поведения персонала ресторана основываются на соблюдении принципов его корпоративной этики. Обычно в «Этический кодекс» любого ресторана введены как общепрофессиональные, так и специальные требования, которые зависят от многих показателей, определяющих специфику организации: местонахождения, профессионально-демографического состава персонала и другое.

Таким образом, специфика деятельности коммуникативных менеджеров по работе с персоналом и налаживанию контактов между персоналом и руководителем требует от коммуникационного менеджера профессионализма. Поведение менеджера должно стать реально воспринимаемым ориентиром для персонала. Своим поведением он не только просвещает, но и обучает подчиненных формировать деловые коммуникации и отношения в коллективе. Стиль общения менеджера можно сравнить со своеобразным камертоном, по которому члены коллектива выстраивают свои формальные и неформальные коммуникации. Не случайно преуспевающий менеджер, имеющий высокий уровень культуры управленческого общения, добивается наибольших успехов в осуществлении карьеры.

Разработка эффективных внутриорганизационных коммуникаций крайне важна как для включения персонала в процесс принятия решения, так и для изменения поведения работающих, их отношения к труду, целям организации.

Не следует забывать, что внутрифирменные коммуникации должны включать два фактора, с одной стороны, дифференциацию, с учетом структуры и культуры каждой конкретной команды, а с другой, необходимость интеграции усилий всех участников, которые заняты в процессе оказания услуг, в общую технологию, нацеленную на достижение конкретной задачи. Только в этом случае можно обеспечить внимание и осмыс-

ленный отклик (обратную связь) со стороны работников. На наш взгляд, это в итоге будет способствовать повышению мотивации персонала, укреплению общей корпоративной культуры.

Эффективность деятельности коммуникативных менеджеров во многом будет зависеть и от менеджмента руководителя, которому следует помнить о своей доле ответственности не только за морально-психологический климат в коллективе, но и оптимальную работу в организации. От того, насколько быстро, точно, прозрачно и эффективно действует система двусторонних коммуникаций, зависит успех работы всего коллектива.

Библиографический список

1. **Донцов, А.И.** Психология коллектива / А.И. Донцов – М.:МГУ. 1984. С.44-48.
2. Психология и этика делового общения: учебник / под ред. В.Н. Лавриненко. – М.: ЮНИТИ. 1997. С. 213-214.
3. **Мескон, М.Х.** Основы менеджмента: [пер. с англ.] / М.Х. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури. – М.: Дело, 1992.
4. **Коровина, Е.В.** Коммуникационный менеджмент для PR специалистов: учеб. пособие / Е.В. Коровина; НГТУ. – Н. Новгород, 2009.
5. **Базаров, Т.Ю.** Управление персоналом / Т.Ю. Базаров, Б.Л. Еремин. – М.: ЮНИТИ, 2008.
6. **Шепель, В.М.** Управленческая этика / В.М. Шепель. – М., 1998.
7. **Шихарев, П.Н.** Этические принципы ведения дел в России / П.Н. Шихарев. – М.: «Финансы и статистика», 1999.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

E.V. Korovina¹, E.A. Andreev²

COMMUNICATIVE ASPECTS OF THE WORK WITH OFFICE PERSONNEL WITHIN SOCIAL-CULTURAL SERVICE AND EDUCATION ORGANIZATIONS

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev ¹,
Russian state university of trade and economics (Volgograd branch) ²

Purpose. Authors analyze communicative aspects of organization management and possible actions of communicative managers within the process of problem situations dissolving. Social-cultural service and education organizations are described as the analytical model of the research.

Design/methodology/approach. Descriptive theoretical framework is proposed to be the methodological base of the research. The elements of system approach are also used.

Findings. New directions of inter-communicative streams, its coordination models are presented here. The changes of office workers behavior and their labour motivation are of vital importance as for the personnel including in the process of making decisions.

Research limitations/implications. The results of the research provides a starting-point for new way of business communication study.

Originality/value. The communication management practice reveals interconnection of successful activity and personnel-oriented communicative strategy.

Key words: communicative management, inter-organization communication, collective, team, leader, professional preparation, business communication, ethics.

УДК 379.8

М.В. Прохорова

ТУРИСТСКО-ЭКСКУРСИОННЫЙ ПОТЕНЦИАЛ г. НИЖНЕГО НОВГОРОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются возможности развития туристско-экскурсионного потенциала г. Нижнего Новгорода. Нижний Новгород обладает богатым природно-климатическим, историко-архитектурным, социально-культурным, производственно-техническим наследием. С учетом макро- и микро- факторов среды определяются перспективы туристской сферы.

Ключевые слова: туризм, туристский потенциал, экскурсионный потенциал, внутренний туризм, инфраструктура города.

Современные города выполняют различные функции: политические, социально-экономические, научно-исследовательские, образовательные, информационные, транспортные, культурные, туристические [8]. У большинства из них можно зафиксировать усиление туристских функций, которые реализуются через поддержание на определенном уровне системы туристской привлекательности (привлекательности города для туристов), системы обслуживания, системы транспорта, системы знаков-указателей (в том числе на иностранных языках), системы контроля качества обслуживания, системы поддержки инфраструктуры города и страхования туристов.

Города как туристские центры дают возможности для развития, прежде всего, познавательного, событийного, делового, культурного и рекреационного туризма. Но не всегда города обладают всеми необходимыми для создания туристского продукта ресурсами, такими как климатические, историко-архитектурные и социальные и культурные объекты, а также объектами туристского показа, удовлетворяющими потребности туристов [7].

Для того чтобы сложились устойчивые предпосылки к формированию городского туристического центра, необходимым условием также является формирование релевантного отношения жителей к своему городу, которое реализуется через знание истории своего города, памятников архитектуры, исторического наследия и т.п. К тому же многие города обладают огромным туристским потенциалом, но способны предложить лишь экскурсионный, а не туристский продукт. В этом аспекте ценным представляется создание экскурсионного продукта и организация экскурсий для местных жителей.

В теоретико-прикладном плане это представляет несомненный интерес, так как понятие «экскурсионный продукт» недостаточно четко определено в научной литературе. У некоторых исследователей это словосочетание лишь упоминается в контексте анализа туристской деятельности. Например, М.Б. Биржаков в одной из работ [3, с. 102] вводит данное понятие, но не поясняет его содержание. Обобщив теоретические положения автора, приходим к выводу, что под этим понятием подразумевается возможность города демонстрировать только те объекты показа, которые могут заинтересовать экскурсантов, а не туристов. Вместе с тем в теории системно разработано и определено понятие «туристский продукт» и термины, поясняющие его содержание.

В Федеральном законе «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» туристский продукт определяется как комплекс услуг, сопряженных с экскурсионным обслуживанием, а также с перевозкой и размещением туристов, оказываемых за общую цену по договору его реализации [7].

С этих позиций туристский продукт – всегда объективированный комплекс потребительских стоимостей, получаемых человеком в процессе путешествия. Ресурсная основа ту-

ристского продукта может быть представлена, с одной стороны, туристскими ресурсами, включенными непосредственно или опосредовано в объект тура, а с другой стороны, материальными и нематериальными объектами, например, товарами и услугами, предназначенными для удовлетворения различных потребностей туристов, туристскими услугами, а также услугами, направленными на организацию покупки туристского продукта потребителем – туристом.

А.П. Дурович полагает, что туристский продукт состоит из следующих элементов: услуг туроператоров и агентов, услуг компаний перевозчиков, системы общественного питания и гостеприимства, услуг предприятий системы аттракций, товаров, потребляемых в рамках тура, и за его пределами [5, с. 62]. Если туристский продукт всегда объективирован, материален, то туристские услуги, как правило, не принимают материальной формы. К туристским относятся услуги, связанные с размещением и перемещением туристов; обеспечением туристов услугами питания; удовлетворением их социально-культурных потребностей (например, посещение экскурсий, театров, концертов, музеев, картинных галерей, памятников архитектуры, заповедников, фестивалей, спортивных мероприятий и т.д.); удовлетворением деловых интересов (участие в конференциях, симпозиумах, семинарах, лекциях, форумах, ярмарках и т.д.), информационных потребностей (о культурных ресурсах того или иного региона, курсах валют, транспортной развязке, ценах и т.д.); реализацией посреднических функций (бронирование гостиничных мест, транспортных билетов, приобретение подарков, сувениров); организацией спортивно-оздоровительных мероприятий (пользование услугами бассейнов, спортивных сооружений и пр.) [5].

С точки зрения географического детерминизма туризм подразделяется на:

1) внутренний туризм, связанный с организацией туров для постоянно проживающих граждан в Российской Федерации в пределах ее территории;

2) туризм международный:

– выездной туризм, связанный с организацией туров для постоянно проживающих граждан в РФ, в другие страны;

– въездной туризм, связанный с организацией туров в пределах территории России лиц, не проживающих постоянно в РФ.

Отсутствие хотя бы одной составляющей (ресурсы, объекты, услуги) лишает туристский продукт жизнеспособности.

Основной доход в туристском бизнесе приносят гостиницы за счет ночевки. Но в некоторых городах все самое интересное можно посмотреть за один день. Поэтому люди приезжают, осматривают город, его достопримечательности и уезжают. В этом главная проблема туризма, так как он не приносит должных доходов. Это связано либо с тем, что город не обладает туристскими ресурсами, либо с тем, что не может правильно привлечь туристов (именно туристов, а не экскурсантов). Но с другой стороны, отсутствие туристского продукта подталкивает город к развитию экскурсионной индустрии и созданию привлекательного экскурсионного продукта.

Главным отличием экскурсионного продукта от продукта туристского является то, что первый не несет в себе наличия услуг по размещению. Таким образом, экскурсионный продукт мы определяем как общественную деятельность в виде экскурсионных услуг, обладающих потребительской стоимостью. Такое определение позволяет, с одной стороны, фиксировать вещную, материальную сторону оказываемых экскурсионных услуг, а с другой стороны, их ценностную составляющую. В тексте Федерального закона от 24 ноября 1996 г. № 132-ФЗ «Об основах туристской деятельности в Российской Федерации» термин «экскурсионные услуги» лишь упоминается для того, чтобы дать определение понятиям «туристская индустрия» и «тур». Вместе с тем, действующий в РФ ГОСТ Р 50690-2000 «Туристские услуги. Общие требования», утвержденный постановлением Госстандарта России от 16 ноября 2000 г. № 295-ст [4] (пункт 3.11), под экскурсионной услугой понимает туристскую услугу по удовлетворению когнитивных интересов туристов/экскурсантов, а также разработ-

ку и реализацию экскурсионных программ и отдельных экскурсий. Экскурсионная услуга характеризуется тем, что реализуется во временном промежутке от одного часа до двадцати четырех часов, в том числе может проходить и по месту жительства экскурсанта.

В зависимости от объекта экскурсионной деятельности можно выделить внутренний и внешний экскурсионный продукт. Внутренний экскурсионный продукт – это результат социальной деятельности в виде экскурсионных услуг, обладающих потребительской стоимостью, направленных на удовлетворение культурных потребностей местных жителей. Внешний экскурсионный продукт – это результат социальной деятельности в виде экскурсионных услуг, обладающих потребительской стоимостью, направленных на удовлетворение потребностей экскурсантов, проживающих за пределами дестинации, т.е. туристов.

Российская Федерация, несмотря на значительный туристский потенциал, занимает невысокие позиции в мировом туристском пространстве (около 1% мирового туристского потока). Вместе с тем, туристские возможности России позволяют при соответствующих показателях развития инфраструктуры туризма принимать в год до 40 млн туристов-иностранцев. На данный момент количество иностранных туристов далеко от запланированного. Статистика въездного туризма приведена на рис. 1 [6].

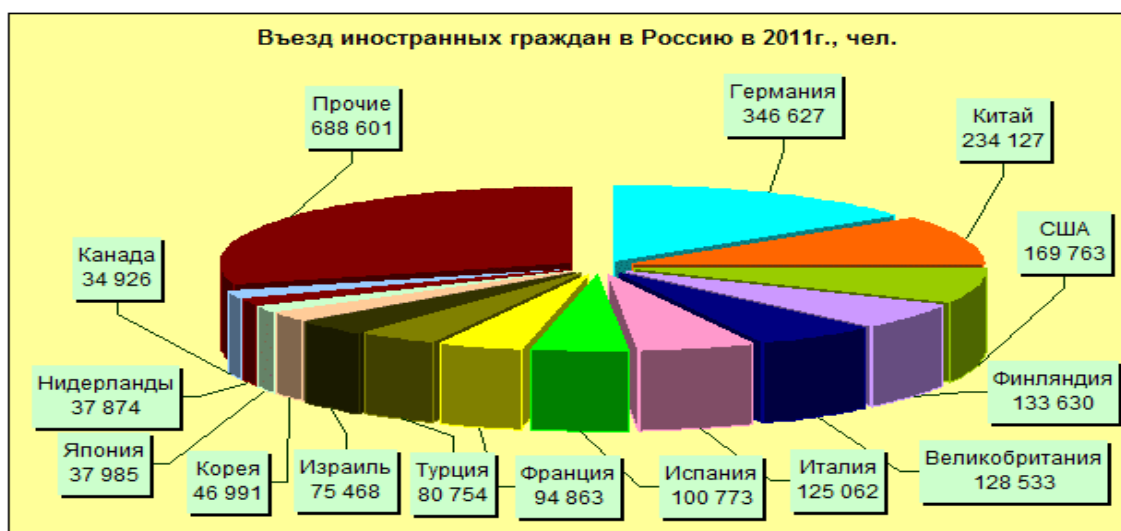


Рис. 1. Въездной туризм в России в 2011 году

Это еще раз подчеркивает необходимость развития внутреннего туризма, а точнее необходимость разработки программ внутреннего экскурсионного продукта. Рассмотрим далее, в чем состоят его отличия от туристских услуг.

Экскурсионный продукт, обладая признаками услуги, несет в себе следующие характеристики: неосвязаемость (отсутствие возможности непосредственного ощущения), нематериальный характер, непостоянство и неспособность к хранению.

Неосвязаемость экскурсионных услуг означает, что их невозможно увидеть, продемонстрировать или попробовать до получения [2, с. 320]. Так, например, достаточно трудно уловить услуги, предлагаемые туристскими компаниями. Производя оплату, экскурсант покупает не памятники архитектуры и музеи, а созерцание прекрасного и познание незнакомого. Туристские компании в своей деятельности сталкиваются с двумя проблемными областями, как выгодно представить клиентам свое предложение и показать, за что они заплатят деньги. Компании для решения этой проблемы описывают преимущества, которые получит экскурсант при приобретении услуги. Однако саму же услугу потребитель сможет оценить только после ее оказания. Увеличить осязаемость услуги можно в разной форме, например, распространять брошюры, туристские путеводители, буклеты и другие материальные носители, помогающие лучше оценить услуги фирмы [2, с. 322].

Непостоянство – следующая важная черта туристских услуг. Изменчивость обусловлена многими обстоятельствами, в том числе сезонностью.

Неспособность к хранению – еще одна отличительная черта туристских услуг. Их невозможно использовать в будущем, только здесь и сейчас. Неспособность услуг к хранению нельзя назвать сложной проблемой при постоянном спросе. Однако спрос на экскурсионные услуги, как и на большинство видов услуг, колеблется. Его величина обусловлена временем года и днем недели и т.п. Резюмируя сказанное, можно сделать вывод, что исследование экскурсионного продукта является актуальным не только с точки зрения теории, но и социально-экономических выгод для отдельных регионов. Важным и перспективным направлением можно считать развитие собственно внутреннего экскурсионного продукта, который реализуется для местных жителей посредством проведения различного рода экскурсий (экскурсионных услуг). Итак, города как туристские центры предлагают возможности для развития, прежде всего, познавательного, делового, событийного, культурного и даже рекреационного туризма.

Но не всегда города обладают всеми необходимыми для создания туристского продукта ресурсами (природно-климатическими условиями, историко-познавательными и социально-культурными объектами), т.е. теми объектами туристского показа, которые способны удовлетворять культурные потребности туристов, способствовать восстановлению их физических сил. Пока города не станут должным образом использовать туристский потенциал, возможным и интересным является изучение их как экскурсионных центров. Например, г. Нижний Новгород обладает широкими возможностями для туристско-экскурсионных показов. Здесь множество уникальных исторических и культурных памятников; многообразие природных ландшафтов; довольно благоприятная экологическая атмосфера; выгодное геополитическое положение. Историко-культурный потенциал г. Нижнего Новгорода объединяет 874 объекта: объекты прикладного искусства, археологического наследия, религиозного назначения и другие архитектурные формы, здания и сооружения.

Основные направления программы по развитию туризма в г. Нижнем Новгороде направлены на:

- проведение активной просветительской работы с жителями города с целью становления и функционирования культуры гостеприимства;
- создание и распространение календаря проводимых ежегодно событийных мероприятий г. Нижний Новгород, разработку новых событийных мероприятий;
- расширение традиционных видов туристской деятельности за счет событийного, делового, этнографического, паломнического, спортивного, культурно-познавательного, историко-культурного, детского и других видов туризма;
- создание принципиально новых городских маршрутов, отвечающих требованиям различных целевых аудиторий, совершенствование и расширение тематики туров;
- организация единой электронной, интернет-системы туристских ресурсов города;
- поддержку и поощрение туроператоров, использующих туристский возможности г. Нижнего Новгорода;
- проведение ежегодных форумов и конференций, в том числе международных, с целью накопления передового опыта и популяризации города Нижнего Новгорода как туристского бренда;
- создание единой службы по бронированию городских гостиниц с предложением разнообразных туристских маршрутов;
- организацию продажи сувенирной продукции на главных туристских маршрутах;
- участие вместе с основными туроператорами в ежегодных выставках по туризму.

Нижний Новгород не может по объективным причинам предоставить релевантный туристский продукт, но у него есть все возможности – для экскурсионного. С каждым годом у нижегородцев можно зафиксировать возрастающую потребность в познании историко-культурного наследия своего города, удовлетворить которую можно благодаря развитому

спектру экскурсионных услуг. Под экскурсией мы понимаем услугу, которая обеспечивает удовлетворение культурных, эстетических, информационных и других потребностей экскурсанта. Однако экскурсионные услуги по большей мере ориентированы на гостей города, а нижегородцы недостаточно осведомлены о предоставляемых турфирмами экскурсионных услугах. Поэтому на сегодняшний момент необходимым является продвижение экскурсионных услуг для такой целевой аудитории, как местные жители.

Рассмотрим подробнее возможности г. Нижнего Новгорода как экскурсионно-туристского центра в микро- и макропространстве.

Внешняя среда довольно благоприятна для развития внутреннего туризма, особенно если рассматривать такие факторы как: реализация целевых государственных программ развития туризма, лояльное отношение к малому предпринимательству и т.д.

Значимые факторы внутренней среды туристской отрасли в г. Нижнем Новгороде можно охарактеризовать следующим:

1. Основные направления туризма в г. Нижнем Новгороде: детско-юношеский, культурно-познавательный, лечебно-рекреационный, деловой, круизный, выездной.

2. Незрелость инфраструктуры. Отсутствие гостиниц класса 3 звезды, которые наиболее популярны у туристов.

3. Ограниченность ассортимента предложения. Рынок предложений ограничивается стандартными турами. В Нижнем Новгороде имеется большое количество турагентств, продающих туристские путевки, при небольшом количестве туроператоров, создающих туры.

4. Проблемы со средствами передвижения. Неудовлетворительное состояние инфраструктуры круизного туризма (речные вокзалы и причалы), недостаточная оснащенность туристских автобусов и т.п.

5. Дефицит компетентного персонала. В целом сохранился дефицит квалифицированных кадров, что обуславливает невысокое качество сервиса во многих секторах индустрии туризма.

6. К конкурентным преимуществам можно отнести, богатое культурно-историческое, а также природное-климатическое наследие. По численности населения и промышленному потенциалу г. Нижний Новгород входит в первую десятку городов России. Уникальными достопримечательностями являются Кремль, Михайло-Архангельский, Староярмарочный соборы, Печерский и Благовещенский монастыри, музеи, улицы Большая Покровская, Большая Печерская, Рождественская, Ильинская.

7. Местонахождение на пересечении путей. Нижний Новгород представляет крупный транспортный узел. В городе располагаются железнодорожный и речной вокзалы, аэропорт, через город проходят автодороги федерального и регионального значения.

8. Незрелость внутреннего туризма для местных жителей.

9. Дорогое проживание в гостиницах, высокая стоимость питания и транспортного обслуживания туристов. Эти показатели существенно превышают среднеевропейский уровень.

Исследование конкуренции:

1. Недостаток информации об отрасли. Наиболее исчерпывающая информация поступает от Росстата только по данным въездного и выездного туризма, а также о платных услугах, оказываемых гостиницами и турфирмами. Внутренние туристские потоки не являются предметом детальной статистической отчетности Росстата, как и показатели по туристским расходам и данным оценки роли туристической деятельности в экономике региона.

2. Высокая конкуренция. Не только внутренняя из-за большого количества туристских агентств, но и со стороны других городов Приволжского федерального округа (Казань, Самара и др.) и Центрального Региона (Кострома, Владимир и др.).

3. Невысокий уровень рыночной культуры (нет эффективного партнерства).

Неудовлетворительный уровень бизнес-коммуникаций между туристическими фирмами (сокрытие информации, демпинг, недоброжелательность, закрытость).

4. В основном ценовая конкуренция. Предоставление разного рода скидок, «горящие туры».

Анализируя сказанное, можно сделать выводы, что у турсферы больше слабых сторон, чем сильных. Основная сильная сторона – это наличие множества турфирм и предложение основных видов туризма. Но при этом нет, например, четкой сегментации целевой аудитории. Также среди слабых сторон стоит выделить неразвитость инфраструктуры туризма.

На основе полученных данных проведем SWOT-анализ, отразив в матрице слабые, сильные стороны, угрозы и возможности (табл. 1).

Таблица 1

Матрица SWOT-анализа

	Возможности:	Угрозы:
	<ul style="list-style-type: none"> • обладание туристскими ресурсами, такими как культурное наследие и транспортные развязки; • поддержка государства, внедрение программ развития в области туризма; • наличие учебных заведений, подготавливающих специалистов; • не охвачены все сегменты целевой аудитории. 	<ul style="list-style-type: none"> • уменьшение численности населения и недостаточная платежеспособность; • несовершенство нормативно-правовых актов, регулирующих сферу туризма; • конкуренция со стороны услуг-заменителей; • отсутствие бренда региона.
Сильные стороны:	Воспользовавшись поддержкой государства можно сделать регион максимально привлекательным, как для туристов, так и для инвесторов. Существующие туристские ресурсы позволяют разнообразить предложение.	За счет информирования о различных видах туризма и широком выборе туристских компаний можно разрабатывать предложения для разной целевой аудитории по уровню платежеспособности, сделать акцент на внутреннем туризме, привлекая иностранцев.
Слабые стороны:	Ограниченный ассортимент и неквалифицированный персонал, а также неразвитая инфраструктура могут помешать воспользоваться программой развития региона.	Отсутствие бренда у региона и слабые стороны отрасли могут привести к тому, что туристы предпочтут другие регионы для удовлетворения своих потребностей.
<ul style="list-style-type: none"> • большое количество туристских компаний на рынке; • предложение различных видов туризма. 		
<ul style="list-style-type: none"> • недостаточно квалифицированный и компетентный персонал; • ограниченный ассортимент предлагаемых услуг: туры однообразны; • «хромает» вся инфраструктура туризма, начиная от гостиниц и заканчивая транспортом; • сезонность предлагаемых услуг; • ценовая конкуренция; • неэффективное партнерство; • слабое позиционирование турфирм; • неразвитость внутреннего туризма. 		

Таким образом, основная возможность для туристской сферы – это развитие за счет поддержки государства. Реализация программ развития региона. Но для этого необходимо:

- 1) осуществлять эффективное партнерство между всеми участниками рынка для обмена информацией, опытом;
- 2) сегментировать потенциальных потребителей по возрастному принципу и разнице предпочтений, создавая свой турпродукт для каждой категории;
- 3) создать бренд региона, чтобы позиционировать себя определенным образом, обособленно от других регионов;
- 4) развивать инфраструктуру туризма за счет федеральных и региональных программ.

Необходимо применение функциональных стратегий:

1. Стратегия сегментации рынка, для туризма – это выбор по образу жизни. Стратегия дифференцированного маркетинга.
2. Стратегия позиционирования – безопасность и возможность испытать новые ощущения. Увидеть то, что нигде не видел.

Если эти стратегии найдут применение, то отрасль туризма сможет развиваться и дальше, а не зайдет в тупик «горящих путевок».

Туризм в г. Нижнем Новгороде находится на стадии развития. Есть прекрасные естественные условия и богатое историческое наследие. Но гостиницы, общая инфраструктура, да и информационное обеспечение в городе далеки от идеальных. Туристы приезжают, смотрят и уезжают. Вместе с тем, можно заинтересовать не только «въездных» туристов, но и проживающих на территории. Общими рекомендациями по преобразованию существующего экскурсионного комплекса являются следующие.

Во-первых, необходимо создание на уровне потребительского рынка и услуг Нижегородской области системы мониторинга туристских услуг в регионе. В рамках системы обеспечить сопровождение в сети интернет, где каждая компания, входящая в единый реестр туроператоров, будет публиковать свои экскурсионные предложения.

Во-вторых, учитывая стратегию развития региона, при разработке экскурсий обращать внимание на особый статус Нижнего Новгорода, который включен ЮНЕСКО в 100 городов мира, представляющих историческую и культурную ценность.

В-третьих, обращая внимание на особую значимость патриотического воспитания молодежи, необходимо усилить просветительский характер разрабатываемых экскурсионных продуктов.

В-четвертых, активно использовать современные электронные технологии для продвижения продуктов, например, SMM-технологии.

В-пятых, сосредоточить внимание на дифференцировании турпродуктов и неценовой конкуренции.

Библиографический список

1. Адресный телефонный справочник «Весь Нижний Новгород» [Эл. Ресурс]. – Режим доступа: <http://all-nn.ru/> – свободный, дата обращения 4.02.2013.
2. **Али, М.** Практический маркетинг и паблик рилейшнз для малого бизнеса / М. Али. – СПб.: Нева, 2004. – 416 с.
3. **Биржаков, М.Б.** Введение в туризм: учебник / М.Б. Биржаков. – СПб.: Герда, 2008. – 614 с.
4. ГОСТ Р 50690-2000 Туристские услуги. Общие требования. - Введ. 2000-11-16. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2002.
5. **Дурович, А.П.** Организация туризма / А.П. Дурович. – СПб.: Питер, 2005. – 320 с.
6. Министерство поддержки и развития малого предпринимательства, потребительского рынка и услуг Нижегородской области [Эл. ресурс] – Режим доступа: [http://tourismnn.ru.](http://tourismnn.ru/)– Загл. с экрана
7. Об основах туристской деятельности в РФ [Электронный ресурс] : [федер. закон Рос.

- Федерации от 24.11.1996 г. №132-ФЗ]: [ред. от 27.12.2009 № 365-ФЗ]. – Режим доступа: <http://ozpp.ru/zknd/turi>, свободный. – Загл. с экрана.
8. Ушаков, Д.С. Страноведение / Д.С. Ушаков. – М.: Март, 2009. – 256 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

M.V. Prokhorova

TOURIST AND EXCURSION POTENTIAL OF NIZHNY NOVGOROD

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

Purpose: The «tour product» term has not been adequately explored in modern science literature. Some researches use it within the context of tourism activity only.

Design/methodology/approach: The theoretical-methodological base of research is the concept of A.P. Durovich, connected with formation of marketing strategy of tour activity realization. The ideas of M.B. Birzhakov, concerned tourist routs calculation and related normative documents are also used here.

Findings: Nizhny Novgorod is far from tourism center leader, nevertheless, its potential is rather big. Information support of tourism activity leaves much to be desired. That's why it's necessary to create new tour products for local residents target audience.

Research limitations/implications: The main items of this work can be used within the further tourism research.

Originality/value: The sales, price and communicative politics of tour products is theoretically developed.

Key words: tourism, tourism industry, tour product, recreation zone, Nizhny Novgorod tourism potential, information support.

УДК 30.001

М.С. Кудрявцев

**НИЖЕГОРОДСКАЯ ЯРМАРКА КАК ШКОЛА РЕКЛАМЫ,
ЧЕРНОГО ПИАРА И САМОЗАЩИТЫ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ:
АНАЛИЗ ИСТОРИЧЕСКОГО ОПЫТА (XIX – НАЧАЛО XX в.)**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Работа посвящена истории рекламы в России и ее влиянию на состояние традиционного общества. Целью работы является анализ развития рекламы в условиях зарождения капиталистических отношений, капиталистического развития и на рубеже XIX-XX веков на конкретном историческом примере. Актуальность работы объясняется значительной ролью рекламы в современном обществе, отсутствием современных отечественных традиций рекламного дела, агрессивностью современной рекламы и засильем иностранных форм, слоганов и штампов. В связи с этим возникает необходимость обратиться к изучению отечественного опыта рекламы, ее традиций и проблем. Работа написана на основе изучения архивных материалов Центрального архива Нижегородской области, периодической печати XIX-начала XX веков, мемуарных источников, проведена статистическая обработка материалов, характеризующих количественные и качественные показатели развития рекламы в Нижнем Новгороде. В результате работы выявлены особенности развития рекламы, техническое обеспечение рекламного дела, формы и методы рекламы, проанализировано поведение нижегородцев, как реципиентов рекламы.

Ключевые слова: история российской провинции, пореформенный период, социально-культурное развитие, нижегородская ярмарка, Нижний Новгород, реклама,

Реклама является неотъемлемой частью современной жизни и вызывает самые противоречивые чувства у телезрителей, читателей газет и пользователей интернета. Безусловно, реклама приносит пользу, информируя о новых товарах и услугах, акциях в магазинах и общественных мероприятиях. Однако назойливость рекламы, низкий уровень этического чутья, эстетического вкуса и элементарной грамотности, характерный для ряда рекламных продуктов вызывает раздражение и возмущение, особенно у представителей старшего поколения, не привыкших к разнообразию товаров и услуг, обилию рекламы и к публичной демонстрации бескультурия.

Разнообразие мнений о рекламе, ее обоснованная критика обуславливают интерес к ней не только непосредственных производителей рекламы, но и специалистов в области пиар-технологий, а также в области других гуманитарных дисциплин. Весьма актуальным в связи с этим представляется изучение исторического опыта развития рекламы и общественного отношения к ней. Исходя из этого соображения, автором было предпринято исследование архивных, мемуарных и эпистолярных источников, материалов нижегородской периодической печати и официального делопроизводства, характеризующих рекламную деятельность на Нижегородской ярмарке и в Нижнем Новгороде в период их непосредственного взаимодействия (с 1817 по 1917 г.). Целями исследования являются:

- установление периодизации развития рекламы на Нижегородской ярмарке и в Нижнем Новгороде,
- определение особенностей рекламы на Нижегородской ярмарке,
- характеристика общественного отношения к рекламе.

Периодизация развития рекламы на Нижегородской ярмарке в целом совпадает с периодизацией социально-экономического развития России и Нижегородского региона в рассматриваемый период. Имеют место незначительные переходные периоды между стадиями развития, обусловленные периодом адаптации народа к новым реалиям.

Первый этап развития рекламы на Нижегородской ярмарке охватывает время с 1817 г. до середины 1860-х годов. Деятельность ярмарки в этот период проходит на фоне крепостного права, сковывавшего предпринимательскую инициативу подавляющего боль-

шинства населения. Торговля на Нижегородской ярмарке в этот период носит преимущественно оптовый характер. Заключая оптовые сделки, предприниматели руководствуются личным знакомством, стремятся установить и поддерживать многолетние контакты. Смена поставщика, установление контакта с новым покупателем рассматривалась предпринимателями, как дело, требующее взвешенного подхода и большой осторожности. А. П. Мельников сообщает, что прежде, чем заключить договор с новым покупателем, предприниматели подробно расспрашивали его о причинах обращения именно к ним, а также о причинах разрыва отношений с прежним поставщиком. В таких условиях рекламе практически не оставалось места [1].

Несмотря на преобладание оптовых сделок, розничная торговля и сфера услуг на Нижегородской ярмарке составляли значительную долю в ее товарообороте. Эта сфера деятельности нуждалась в рекламе, являлась потребителем рекламных услуг и испытательным полигоном инициатив в области рекламы. Основными видами рекламы в этот период были вывески и зазывания торговцев.

Вместе с этими наиболее простыми видами рекламы на ярмарке зародились и применялись такие широко известные в наши дни рекламные акции, как оптовые скидки и подарки при покупке товара. Способ привлечения покупателей подарками при покупке товара начали применять продавцы книг, пионером среди них на Нижегородской ярмарке был предприниматель В. А. Кемарский (позднее он открыл лавку и в городе). Привлекая к своему товару малограмотных и достаточно косных жителей провинциального Нижнего Новгорода, он угощал покупателей кофе и пирожными в располагавшемся при магазине кафе, а посетители кафе могли бесплатно почитать книгу (если книга заинтересовала читателя, он мог взять ее на время домой, оставив денежный залог) [2].

Большинство розничных торговцев и работников сферы обслуживания на ярмарке были нижегородцами. У них сформировалась своя система зазывания покупателей. Привлекая внимание посетителей ярмарки, нижегородец разыгрывал своего рода представление, состоящее из шуток, прибауток, закличек и т.д. Зазывая покупателя, торговцы учитывали пол, возраст и социальный статус. Человек в чиновническом, студенческом или офицерском мундире независимо от возраста именовался «господин», купец или приказчик – «хозяин», женщина среднего или пожилого возраста – «матушка», молодая девушка-дворянка – «барышня», крестьянка или горожанка – «сестрица» или «красавица», служанка – «доченька»

Нижегородские раешники, демонстрировавшие различные познавательные и развлекательные изображения в виде гравюр, лубков и т.д., и сопровождавшие их остроумными комментариями, привлекали публику характерным призывом: «Извольте смотреть и рассматривать, глядеть и разглядывать». Их коллеги и конкуренты из Петербурга и прибалтийских губерний, очевидно, под влиянием немецкой культуры, особенно сильному в этом регионе, привлекали зрителей таким образом: «Ангеманир штук, вот новый вид (вариант – чудесный вид, фантастик вид)...» (далее следовало пояснение того, что изображено на картине) [3].

Особенности ярмарочной торговли настоятельно требовали активной рекламной деятельности, изобретения новых форм рекламы. В течение рассматриваемого периода характерная метаморфоза произошла с посещавшими Нижегородскую ярмарку купцами из Средней Азии. В начале 1820-х годов они характеризуются, как ленивые торговцы, постоянно сидящие в лавке, и лишь вяло показывающие чубуком трубки, где находится тот или иной товар. В 1840-е годы их характер изменился – они улавливали малейший намек покупателя и бросались снимать с полок не только спрашиваемый покупателем товар, но и другой, близкий к нему по свойствам, красочно расписывали достоинства товаров [4].

Потребности ярмарки стимулировали развитие в Нижнем Новгороде сферы рекламных услуг. С 1817 по 1857 годы количество художников в Нижнем Новгороде увеличилось с 7 до 53 человек, большинство из них выполняли заказы ярмарочных и городских предпринимателей на изготовление рекламных вывесок. Содержание надписи и изображения на рекламной вывеске всецело определялись заказчиком, если художник осмеливался возражать

против неприличного изображения или некорректной надписи, заказчик легко мог найти более покладистого мастера. Низкий уровень образования предпринимателей был виден в рекламных вывесках. Например, вывеска на мастерской нижегородского портного сообщала, что он «Икс оменованной портной» (очевидно, имелось ввиду, экзаменованный).

В дореформенный период на Нижегородской ярмарке зародились и получили достаточно широкое распространение недобросовестные рекламные приемы. Наиболее распространенным среди них было использование брендов известных в мире фирм. Чаще всего подделывали этикетки на товарах. Еще А. С. Пушкин в «Евгении Онегине» отмечал продажу на Нижегородской ярмарке поддельных вин «*сюда коней привез индиец, поддельны вина европеец, всяк суетится, лжет за двух и всюду меркантильный дух*», а в 1830-е годы немецкий путешественник А. Эйхель сообщал, что ситуация, когда «*товар туземный за выписной у них идет: ярлык наклеят иноземный и верит ярлыку народ*» не редкость на нижегородской ярмарке. Особенно часто подделывались этикетки на цыбиках – упаковках чая, что было связано с желанием торговцев выдать китайский чай за индийский, который был значительно выше по качеству и дороже.

Нередки были случаи использования поддельных брендов на вывесках торговых лавок, развлекательных заведений, кафе, ресторанов и трактиров. В таких вывесках воспроизводились официальные названия известных марок (чаще всего характерным для этого бренда шрифтом, с использованием характерных цветов, а также почетные атрибуты торговой марки (медали, дипломы, почетные звания и др.). Во избежание конфликтов некоторые предприниматели, прибегающие к такому приему, вносили в свои вывески малозаметные изменения (например, слово «филиал», «бывший», «под маркой» и т. п.), при этом законный обладатель бренда, как правило даже не подозревал о появлении на Нижегородской ярмарке филиала его фирмы [5].

Обилие рекламы и назойливость некоторых торговцев и ремесленников заставила покупателей вырабатывать способы самозащиты от навязчивой рекламы. Наиболее эффективным видом антирекламы были остроумные рифмованные ответы, высмеивавшие продавца или ремесленника и его товар или услуги. В качестве иллюстрации целесообразно привести несколько вариантов рекламных выкриков торговцев различным товаром и бродячих ремесленников и ответы на них покупателей:

Таблица 1 [6]

Вид товара	Выкрики торговцев	Ответы покупателей
Свечи	Свечи сальные, свечи бумажные! Горят они ясно, очень прекрасно!	Горят они, ноют, ничего не стоят!
Мыло	Кому мыльце умыть рыльце? Вот оно! Вот оно! Мыльце серенько, а моет беленько!	Ты дай мне такого мыла, чтобы на четверть входило в тело, и радостно сердцу бы было. Вот это было бы мыло, а нет – так уж что за мыло?
Ремонт обуви	Кому подобьем – недорого возьмем, старые носи – новые не проси	Сегодня поносим, а завтра забросим. На то ты и мастер, чтобы дело знать – где подмажь, где подклей, а где гвоздиком подбей, дырки ваксой замажь, да за новые покажь. Сегодня носим, а завтра мастера просим.

Второй этап развития рекламы на Нижегородской ярмарке охватывает период с середины 1860-х по середину 1890-х годов. Он характеризуется ростом предпринимательской инициативы в связи с отменой крепостного права, увеличением производства, торговой сети и сферы услуг. Началось становление гражданского общества, использовавшего рекламу в социальных целях. Технический прогресс в области типографского дела, а также реформы в

области образования и печати способствовали возникновению спроса на печатную рекламную продукцию и развитию типографской сети.

В этот период основным видом рекламы стала печатная – афиши, рекламные буклеты, листовки. В период с 1865 по 1895 год в Нижнем Новгороде увеличивалось количество типографий и рабочих в них, а также расширялся перечень их услуг в основном за счет выпуска рекламной продукции. Этот процесс можно проиллюстрировать следующими статистическими данными:

Таблица 2 [7]

Количество типографий в Нижнем Новгороде в 1865-1895 гг.

Год	Кол-во типографий
1865	4
1875	12
1885	15
1895	19

Статистические данные демонстрируют устойчивый рост количества типографий, лишь несколько замедляющийся в 1880-е-1890-е годы, что объяснялось, с одной стороны, влиянием контрреформ Александра III, в частности, усилением цензурного контроля, а с другой – насыщением рынка типографских и рекламных услуг.

Далее приведем статистические данные, характеризующие качественное состояние нижегородских типографий и оказываемые ими услуги. Анализ документов того времени позволяет сделать вывод о том, что полный комплекс рекламных услуг включал применение фигурных шрифтов, печати на белой, цветной, или глянцевой бумаге, печати на крупноформатных листах.

Таблица 3

№ пп	Владельцы	Кол-во станков	Кол-во рабочих	Виды услуг			Виды рекламной продукции
				Шрифты	Разные сорта бумаги	Крупноформатная печать	
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Губернское правление	10	61	+	+	+	Афиши и буклеты.
2	Газ. «Волгарь»	4	26	+	+	+	Афиши и буклеты
3	Ройский и Карнеев	10	53	+	-	-	-
4	Афанасьев	2	5	+	+	-	Меню, преискуранты
5	Виленский	2	4	+	+	-	Меню, преискуранты
6	Искольдский	4	33	+	+	-	Меню, преискуранты
7	Литвин	3	5	+	+	-	Меню, преискуранты
8	Макаров	2	8	+	+	-	Меню, преискуранты
9	Машистов	14	87	+	+	+	Афиши и буклеты
10	Муратов	4	6	+	+	+	Афиши и буклеты

Окончание табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
11	Остафьев	8	66	+	+	+	Афиши и буклеты
12	Петров	7	2	+	+	+	Афиши и буклеты
13	Рождественский	4	4	+	+	-	-
14	Серегин	3	20	+	+	-	Визитки, бланки
15	Федотов	1	6	+	+	-	-
16	Филиппова	2	9	+	+	-	Меню, преискуранты
17	Хвоин	3	8	+	+	-	Меню, преискуранты
18	Хейфец	1	6	+	+	-	-
19	Шелеметьев	6	26	+	+	+	Афиши и буклеты

Из таблицы видно, что почти 85% нижегородских типографий оказывали рекламные услуги, третья часть располагала необходимым оборудованием и технологиями для осуществления полного комплекса типографских рекламных услуг – цветной и крупноформатной печати [8].

Одновременно с развитием сети типографий и расширением комплекса полиграфических услуг увеличивалась скорость доставки информации. В течение рассматриваемого периода получила широкое распространение телеграфная связь, которая позволила быстро передавать информацию о направлении в город или на ярмарку новых видов товаров и заказывать их рекламу в нижегородской прессе. Развитие средств связи, рост количества и скорости передачи информации сделал ненужной такую форму рекламы, как слухи.

Количество средств массовой информации в рассматриваемый период в Нижнем Новгороде было невелико, что ограничивало их рекламные возможности. Нижегородская пресса в рассматриваемый период была представлена двумя официальными изданиями – «Нижегородскими губернскими ведомостями» и «Епархиальными ведомостями», а также двумя частными газетами – «Нижегородский ярмарочный справочный листок» и «Волгарь». На страницах «Губернских ведомостей» публиковались рекламные объявления крупных петербургских или московских фирм о продаже продукции по заказу, а также частные объявления нижегородцев (последние не выделялись ни рамками, ни особым шрифтом). «Епархиальные ведомости» были еще беднее рекламой – там публиковались только объявления о продаже каких-либо необходимых для церкви предметов (одеяний, подсвечников, лампад, сосудов и т.д.). Выпуск рекламной продукции для Нижегородской губернской типографии, которая обеспечивала выход тиражей официальных нижегородских газет, был побочным занятием.

«Нижегородский ярмарочный справочный листок» являлся, по существу, первой нижегородской рекламной газетой. Он предоставлял посетителям ярмарки необходимую информацию о наличии мест в гостинцах и на съемных квартирах, ценах на различные товары, новых видах товаров и услуг, появившихся на ярмарке. Выделялись также места для частных объявлений, для них применялись фигурные шрифты. Например, в номере этой газеты от 20 июля 1885 г. рекламировались:

- зрелища (прыжок с воздушного шара, бег на три версты наперегонки с лошастью, выступление женщины-силача Марии);
- лекарства и медицинские услуги (лекарство, гарантирующее мгновенное исцеление от сифилиса);
- американские фотоаппараты «Кодак», домашние станции пожаротушения и электрогенераторы.

Газета «Волгарь» освоила новый вид рекламных публикаций – объемные статьи с из-

ложением мнения экспертов и отзывов потребителей о том или ином товаре, или о деятельности той или иной фирмы, конкретного предпринимателя или чиновника. Публикации «Волгаря» не отличались добросовестностью. Корреспонденты газеты нередко вымогали у чиновников и предпринимателей взятки за публикацию положительной информации, либо за отказ от публикации компрометирующих материалов. Выводы экспертов на проверку оказывались не более, чем мнением самого корреспондента, а подпись была либо вымышлена, либо указывала имя действительно существующего специалиста по данной группе товаров или типу услуг, однако ставилась без его согласия. Из-за этого редакция «Волгаря» неоднократно попадала в скандальные ситуации, подвергалась взысканиям в судебном порядке, принуждалась к уплате штрафов, публикации опровержений, увольнению корреспондентов. Однако разоблачительные статьи, хотя бы даже недостоверные, были весьма популярны среди читателей газеты, большую часть которых составляли мелкие и средние предприниматели. Для них «разоблаченные» махинации крупных предпринимателей являлись удовлетворительным объяснением нестабильности развития их собственного бизнеса.

Активизация социальной жизни в пореформенный период проявилась в возникновении различных общественных организаций, деятельность которых носила преимущественно просветительский и благотворительный характер. Среди них следует выделить Нижегородское общество любителей художеств, основанное А. О. Карелиным, с художественной школой при нем. Необходимо обратить внимание на такой фактор рекламной поддержки культурно-просветительного начинания, как благосклонное отношение и содействие культурно-просветительным инициативам со стороны нижегородской губернской администрации. Например, губернатор А. А. Одинцов предоставил для занятий художественной школы несколько залов в губернаторском дворце, а с ростом школы выделил средства на приобретение отдельного здания. Поддержка деятелей искусства губернской администрацией, городскими и ярмарочными предпринимателями была традицией Нижегородской ярмарки, что являлось важным фактором повышения привлекательности города в глазах деятелей искусства и простых посетителей, то есть рекламным фактором.

Рекламные возможности Нижегородской ярмарки сыграли решающую роль в судьбе новаторского течения в русском изобразительном искусстве – движении художников-передвижников. Первый шаг к созданию этого движения был сделан в 1863 г., когда группа учащихся Академии художеств отказалась выполнять выпускную квалификационную работу, требуя предоставить им право самостоятельного выбора темы работы. В результате бунтари были отчислены из Академии художеств без диплома, что лишало их возможности представлять свои произведения на академических выставках и продавать их, то есть зарабатывать себе на жизнь трудом художников. Однако отказываться от искусства они не собирались и создали своеобразное художественное предприятие – Артель петербургских художников. С разрешения нижегородского губернатора А. А. Одинцова они представили ряд своих картин на Нижегородской ярмарке наравне с художниками Академии. Несмотря на крайне негативные отзывы в столичной печати, нижегородцы и гости ярмарки высоко оценили деятельность нового объединения. Артель петербургских художников получила всероссийскую известность, успешная продажа картин позволила сформировать стартовый капитал, к артели присоединились учащиеся и выпускники Академии художеств (последнее обстоятельство сделало неактуальным название объединения, поскольку в его состав вошли представители нескольких городов России.). Для нижегородцев же выставка картин Артели петербургских художников стала первой ласточкой нового искусства, в котором находилось место и для пейзажей Поволжья, и для видов Нижнего Новгорода и ярмарки. Демонстрация картин с милыми сердцу каждого нижегородца сюжетами развеяла бытовавшее в сознании нижегородцев представление о том, что кисти художника достойны только нечто выдающееся. Под влиянием этой выставки у нижегородцев пробудился интерес к искусству. Ближайшим следствием этого стало возникновение в Нижнем Новгороде Общества любителей художеств и Художественной школы.

Важной проблемой пореформенного периода, решение которой потребовало не толь-

ко административных, но и рекламных мероприятий, было усиление проникновения в Нижегородскую губернию эпидемических заболеваний, в особенности холеры. Причиной этого стало расширение географии контактов Нижегородской ярмарки и увеличение количества посетителей из южных районов страны, являвшихся эпицентрами холерных эпидемий. Ограничительные меры, применяемые в дореформенный период (карантины) вызывали недовольство населения и были неэффективны, так как часто нарушались. Требовалась более тщательное выявление вирусоносителей, их изоляция, а также разъяснение населению вводимых ограничений, повышение медико-санитарной культуры населения, противодействие слухам о злоупотреблениях властей. Значительную роль в обеспечении связи с общественностью во время холерных эпидемий сыграл нижегородский губернатор Н. М. Баранов, который предоставил для размещения заболевших холерой несколько залов своего дворца и лично посещал больных. К решению рекламных задач медико-санитарного просвещения подключились медицинская общественность и духовенство. Нижегородские врачи выпустили несколько брошюр с доступным изложением причин возникновения, симптомов холеры и способах предохранения от нее. Одновременно была обеспечено регулярное информирование населения об умерших от холеры, допуск родственников на похороны. Хорошо организованная пиар-кампания в период острой холерной эпидемии 1881 г. способствовала снижению остроты этой проблемы в дальнейшем. В последующие годы количество заболевших холерой в период эпидемий снижалось (если в 1881 г. было зафиксировано более 3 тыс. случаев заболевания, то в 1892 г. – чуть более 1 тыс. чел., а в 1907 г. – не превысило 100 чел.) [10].

К сожалению, приобретенный в пореформенный период опыт пиара в противодействии холере не был распространен на другие заболевания. Из-за этого долгое время сохранялась острая проблема распространения венерических заболеваний, носители которых считались изгоями и избегали контактов с врачами. Неадекватно жесткие меры нижегородских врачей против кори, оспы, скарлатины и других зимних заболеваний (в частности, сжигание вещей заболевших) также негативным образом сказывались на отношении населения к медицинским мероприятиям [11].

Возникшее в пореформенный период социальное направление рекламы и пиара отразило не только медицинские, но и другие социально-культурные проблемы Нижнего Новгорода. Нижегородские предприниматели научились использовать в рекламных целях благотворительную деятельность. У многих предпринимателей на ярмарке были назначены дни раздачи милостыни, когда к их лавкам выстраивались огромные очереди нищих, ожидавших подаяния и восхвалявших своего благодетеля. В городе возникло несколько благотворительных обществ (например, Общество доступного жилья и Кирилло-Мефодиевское братство), членство в которых привлекало предпринимателей возможностью получения почетных званий и медалей, назвать в свою честь стипендии, объекты недвижимости и т. д. Это также служило предпринимателям средством рекламы.

Третий этап развития рекламы и пиара в Нижнем Новгороде связан с проведением в городе XVI Всероссийской промышленной и художественной выставки 1896. Подготовка города к выставке носила характер тотальной рекламной кампании. Стояла задача не просто повышения привлекательности города для посетителей, а придания ему статуса третьей столицы, «кармана России», социокультурного центра Поволжья. В рамках подготовки к выставке в городе были проведены следующие мероприятия:

- восстановлен театр;
- создан музей, экспозиция которого была посвящена славной странице истории Нижнего Новгорода – организации ополчения К. Минина и Д. Пожарского;
- выпущена литература по истории Нижнего Новгорода, достопримечательностям губернии, а также путеводитель по городу и ярмарке;
- началось развитие общественного транспорта (были открыты первые трамвайные линии, фуникулеры, в летний период действовала переправа через Оку и Волгу на легких пароходах «финляндчиках»);

- благоустроены проезжая часть и тротуары на центральных улицах (применен новый для того времени материал – асфальт);
- на Волжском откосе вырублены деревья и кустарники, проведены работы по защите склона от оползней, склон засеян травой;
- дома на центральных улицах и набережных украшены электрической иллюминацией, гербами и вензелями императора, цифрами 1896 и т.д.

Все эти мероприятия способствовали формированию положительного имиджа Нижнего Новгорода в глазах посетителей выставки, то есть создавали рекламу. Благодаря этим мероприятиям, Нижний Новгород превратился в культурный центр Поволжья. Об этом говорят многочисленные экскурсии, прибывавшие в Нижний Новгород с целью посещения театра, музея, ознакомления с новыми видами транспорта, а также обращения администрации и органов местного самоуправления ряда городов России к соответствующим структурам Нижнего Новгорода с просьбой поделиться опытом решения социально-культурных проблем.

Сама по себе XVI Всероссийская промышленная и художественная выставка являлась грандиозной рекламной акцией, задачей которой было представить достижения России во всех отраслях экономики, науки, техники и культуры. Поставленная задача была выполнена с лихвой (благодаря поддержке предпринимателей, на выставке были представлены произведения, не допущенные официальной комиссией к участию, например, картины художников-модернистов – М. А. Врубеля и др.). Однако нижегородцы восприняли новое искусство без особого интереса. Одна из представленных Врубелем картин – «Принцесса Греза», первоначально приобретенная для одной из нижегородских гостиниц, так и не была выставлена в ее холле, а была спрятана на чердаке, где была обнаружена спустя несколько десятков лет.

Рекламный эффект Всероссийской промышленной и художественной выставки 1896 г. был невысоким. Газеты отмечали, что количество посетителей было ниже запланированного, среди посетителей весьма низок был процент учителей, то есть людей, способных сделать представленные на выставке новации достоянием всего народа [12]. Восприятию новаций препятствовали следующие факторы:

- низкий уровень образования населения (в то время лишь грамотой владело не более 7% населения России);
- отсутствие новых технологий, необходимых для производства новых видов продукции (за исключением отдельных уникальных производств, где и были изготовлены выставочные образцы);
- преимущественно гуманитарный характер образования, имеющий целью воспитание учащихся в духе верности Церкви, престолу и Отечеству, что предполагало преимущественное изучение таких дисциплин, как Закон Божий и история.

Однако выставка 1896 г. оказала значительное влияние на развитие рекламного аспекта деятельности Нижегородской ярмарки. В конце XIX – начале XX века в связи с развитием транспортной системы начали происходить глубокие изменения в торговле. Развитие железнодорожной сети дало возможность доставлять любые партии товара в любую точку страны в любое время года, а также забирать продукцию рассеянных мануфактур и отдельных ремесленников. В связи с этим отпадала потребность в крупной оптовой торговле. Нижегородская ярмарка начала все более превращаться в выставку. Продавцы теперь привозили на ярмарку не оптовые партии товара, а образцы, знакомясь с которыми, покупатель выбирал нужный ему товар и делал заказ на поставку определенного количества в определенное время в указанное место. Новый способ торговли был значительно удобней для покупателя, так как избавлял его от необходимости забирать купленный товар целиком и заботиться о его сохранности в дороге, а позволял оформлять заказ на поставку крупной партии товара по частям. Ответственность за поставку товара и его хранение ложилась на фирму-поставщика и железную дорогу.

При несомненных плюсах такой системы торговли довольно быстро выявились ее недостатки, связанные с недобросовестным исполнением обязательств продавцами, работни-

ками транспорта и самими покупателями. Из-за этого возникали запутанные конфликтные ситуации, требовавшие разбирательства правоохранительных и судебных органов ряда губерний. Например, в 1898 г. владимирский купец М. Г. Васильев оформил заказ на поставку 60 швейных машин во Владимир в течение года в торговой фирме Н. М. Павловского, являвшейся представителем известной германской фирмы «Зингер» на Нижегородской ярмарке. В 1902 г. он подал иск во Владимирский губернский суд, обвиняя поставщика в мошенничестве – в двух из шести ящиках вместо швейных машин находились камни и дрова. При осмотре ящиков и вагонов оказалось, что ни вагоны, ни тара не имеют следов взлома и нарушения пломб. При этом работники железной дороги показали, что доставка груза была произведена своевременно, о чем заказчик был уведомлен, однако до 1902 г. он не забрал товар. В соответствии с решением суда претензии сторон были удовлетворены путем взаимозачета требований [13].

Одновременно с выставкой (хотя и не на ее территории), произошло еще одно событие, важное для последующего социально-культурного развития Нижнего Новгорода вообще и для рекламного дела в частности. В кафе Шарля Омона на территории ярмарки, специализировавшегося на демонстрации различных технических новинок, был показан первый в истории Нижнего Новгорода киносеанс. С этого момента началась эра развития кино в Нижнем Новгороде. Уже в 1897 г. нижегородец А. Кузнецов приобрел киноаппарат и показывал кино в своем доме, а в 1902 г. в Нижнем Новгороде было четыре кинотеатра. Кино стало сильным средством воздействия на общественное сознание. Например, В. Г. Короленко демонстрировал ужасающие сцены страданий людей от голода в районах, пострадавших от неурожая, призывая общество и власти помочь нуждающимся. Циркуляр МВД запретил демонстрацию тенденциозных киноматериалов, но при этом нижегородской губернской администрацией были приняты меры по снабжению голодающих районов продовольствием. Нижегородская интеллигенция использовала возможности кино для просветительской деятельности. Например, врач Н. А. Грацианов подготовил и демонстрировал кинофрагменты для пропаганды соблюдения правил гигиены, что в немалой степени способствовало снижению остроты проблемы эпидемических заболеваний [14].

Само кино также стало предметом рекламы. Сообщения о новых фильмах и их краткое содержание регулярно публиковались на страницах нижегородских газет. Приезд в Россию знаменитого американского киноактера М. Линдера был использован нижегородской прессой, как повод для пропаганды зарождающейся массовой культуры. Газета «Нижегородец» командировала в Москву и Санкт-Петербург, которые планировал посетить М. Линдер, корреспондента, который освещал каждый шаг и каждое выступление актера. Публикации вызвали ажиотаж у нижегородской публики, в адрес Линдера было направлено множество телеграмм с приглашением посетить Нижний Новгород, в которых, в частности, содержались такие призывы: «Гряди, славимый и поклоняемый всеми языками!», «Прочь Гете, Пушкина, Золя! Из их гробов построим арку Для пышной встречи короля!».

В 1902 г. в том же кафе Ш. Омона нижегородцы познакомились с новым изобретением в области фототехники – диапозитивом. Новый вид техники был воспринят нижегородскими педагогами, как мощное средство повышения наглядности обучения, что было весьма важным направлением их творческих поисков. Через несколько лет ими были подготовлены комплекты диапозитивов по биологии, географии, гигиене. Визиты в Нижний Новгород педагогов из других регионов способствовали их знакомству с новыми разработками их нижегородских коллег и вызвали значительный интерес. Информация о применении новых методов преподавания распространялась далеко за пределы Нижегородской губернии. Педагоги Томска, Смоленска и других городов России просили нижегородцев прислать им копии своих наглядных материалов [15].

Кроме педагогической деятельности, диапозитивы применялись в общественно-политических выступлениях. Например, корреспондент Нижегородских губернских ведомостей С. А. Гуменнюков в 1906 г. представил публике комплект слайдов на тему русско-

японской войны. Учитывая требования цензуры, он показывал только эпизоды удачных для русской армии боев, героические страницы жизни солдат, скрыв военные неудачи, нарушения в работе тыла, которые в конечном итоге обусловили поражение России в этой войне [16].

Изменения форм торговли и развитие сферы услуг предъявило новые требования к рекламной деятельности. Новыми чертами рекламы стали многократность публикации одних и тех же рекламных материалов, увеличение массовости охвата и разнообразие рекламируемых товаров и услуг. Удовлетворить все эти потребности рекламного рынка позволило развитие нижегородской периодической печати. Число выходящих в Нижнем Новгороде газет в рассматриваемый период возросло в 4 раза. Большая часть новых периодических изданий была посвящена рекламе, причем их сферы влияния были четко разделены – каждое издание рекламировало определенный спектр товаров или услуг. Уже упоминавшийся «Нижегородец» специализировался на рекламе зрелищ – кинематографа, работы кафе Ш. Омона и т.д. «Квартирный указатель», издаваемый С. А. Жевайкиным, помогал приезжим решить вопрос о месте проживания на период нахождения в Нижнем Новгороде, что было весьма актуально, а также стал первой нижегородской газетой, публикующей объявления о покупке, продаже или обмене жилья. Деятельность волжских судовладельцев нашла свое рекламное отражение на страницах газеты «Волжское судоходство», где, кроме расписания движения судов и рекламы удобств на том или ином из них, публиковалась информация о технических усовершенствованиях, применяемых на новых судах, и разъяснялась их польза для пассажиров и отправителей грузов [17].

Нижегородская интеллигенция в рассматриваемый период начала осознавать необходимость рекламы своей деятельности и достижений, и эта деятельность стала в своем роде уникальной. Нижегородские медики начали издавать «Вестник санитарного и медицинского состояния Нижегородской губернии», который отразил их опыт – значительно более богатый в сравнении с медиками других регионов вследствие остроты проблем заболеваемости на Нижегородской ярмарке. Отзывы медицинских учреждений других регионов показывают, что публикации нижегородских врачей воспринимались ими, как ценный справочный материал и пособие для повышения квалификации. Нижегородская музыкальная общественность, учитывая пробудившийся в результате деятельности отделения Императорского русского музыкального общества интереса к музыкальному искусству, начала издание единственного в России периодического издания музыкальной тематики. Оно получило название «Нижегородский музыкальный журнал», на его страницах публиковались критические статьи о выступлениях музыкантов и новых произведениях, теоретические статьи, а также реклама музыкальной жизни города.

Социальное направление в рекламе активно поддерживало Общество попечительства о народной трезвости (ПОНТ), и его Особый ярмарочный комитет. Важным направлением его деятельности была реклама замены алкогольных напитков безалкогольными. Значительную помощь в этой деятельности общество получило от российского отделения известной и сегодня германской компании «Келер», производившей газированную воду с различными вкусоароматическими добавками. В то время добавки делались из натурального сырья, вода также добывалась в натуральных источниках, поэтому напитки компании «Келер» были действительно полезной заменой алкоголю. В Нижнем Новгороде и на ярмарке действовало несколько летних кафе, а также был создан парк «Народная забава», где были созданы условия для культурного отдыха нижегородцев.

Значительную помощь ПОНТ оказывали Нижегородское и Канавинское общества разумных развлечений, спортивные общества «Сокол», «Санитас», Общество любителей велосипеда, а также Общество яхтсменов. Они неоднократно устраивали яркие спортивные праздники, которые привлекали нижегородцев и гостей ярмарки красочностью зрелищ, одновременно пропагандируя физическую культуру и здоровый образ жизни. Само общество ПОНТ организовывало исключительно сильные по психологическому воздействию рекламные акции против пьянства, например детские демонстрации под лозунгами «Папа, не пей вина!» [18].

Среди других направлений социальной рекламы, распространенных в рассматриваемый период, следует назвать благотворительные сборы и лотереи, доходы от которых направлялись на помощь больным туберкулезом, на борьбу с другими инфекционными заболеваниями (чумой, оспой, и т.д.). Такие акции вызывали неоднозначную реакцию в обществе – часть нижегородцев была недовольна работой в этих акциях молодых девушек, использовавших свою нежность и обаяние для привлечения жертвователей, что хоть и отдаленно, но напоминало проституцию [19].

С началом первой мировой войны объемы торговли, количество посетителей и рекламно-информационное значение Нижегородской ярмарки значительно снизилось. Последующие события – приход к власти большевиков, их меры по ускоренному построению коммунизма усугубили ситуацию. Даже частичное возрождение торговой деятельности ярмарки в период нэпа не привело к восстановлению ее информационно-рекламного значения, так как уровень предпринимательской культуры в годы революционных преобразований значительно снизился.

Тем не менее, Нижегородская ярмарка за время своей деятельности близ Нижнего Новгорода накопила значительный опыт информационно-рекламной деятельности. Обобщая его, можно выделить три периода развития рекламы (дореформенный период, 60-90-е годы XIX века, конец XIX – начало XX века). Каждый из этих этапов характеризуется совершенствованием форм рекламы, ростом технического обеспечения рекламной деятельности, расширением аудитории (от простейших аудио-визуальных форм к использованию возможностей полиграфии и применению видеотехники). Одновременно возрастает социальная направленность рекламы. Негативным фактором развития рекламы являются распространение недостоверной информации, нагнетание напряженности и психоза в общественном настроении. Противоположностью негативным аспектам воздействия рекламы было недоверчиво-насмешливое отношение к ней, сформировавшееся у нижегородцев еще в дореформенный период, а также использование рекламных возможностей для конструктивных, социально-значимых целей, правовое воздействие на недобросовестных рекламодателей. Характерными особенностями рекламы в Нижнем Новгороде были наличие своеобразного имиджа нижегородских предпринимателей и потребителей, стремление администрации, самоуправления и горожан к формированию и поддержке положительного имиджа города, как культурного центра Поволжья, а также отклик на общероссийские социокультурные проблемы и поддержка социокультурных инициатив.

Исторический опыт рекламной деятельности Нижегородской ярмарки частично продолжается в современных условиях. Она продолжает играть роль крупного выставочного центра Поволжского региона. Значительное место в ее деятельности занимает духовно-просветительская работа, реализуемая в сотрудничестве с русской православной церковью. В качестве рекомендации можно предложить руководству Нижегородской ярмарки и другим заинтересованным структурам усилить выставочно-рекламную деятельность в направлении пропаганды новых образовательных технологий. Это привлекло бы интерес нижегородской интеллигенции, способствовало бы проникновению в Поволжский регион и в Россию в целом новых образовательных технологий, стимулировало бы творчество нижегородских работников образования и способствовало пропаганде их опыта и достижений на общероссийском и мировом уровне.

Библиографический список

1. Мельников, А.П. Очерки бытовой истории Нижегородской ярмарки (1817–1917 гг.) / А. П. Мельников. – Н. Новгород: АО Нижегородский компьютерный центр пользователей (НКЦП), 1993. С. 98–100.
2. ГУ ЦАНО. ф. 2.оп 4, д. 7886, л. 12-24.
3. Народный театр / под ред. А. Ф. Некрыловой [и др.]. – М.: Советская Россия, 1991. С. 361.
4. Свиньин, П.П. Поездка на Нижегородскую ярмарку / П. П. Свиньин // Отечественные

- записки. 1820. Ч. IV Кн. VIII. С. 193. Погодин, М. П. Дорожные записки / М. П. Погодин // Москвитянин. 1841. Ч. 5. № 9. С. 294.
5. **Смирнов, Д. Н.** Картинки нижегородского быта XIX в. / Д. Н. Смирнов. – Горький: Книжное изд-во, 1947. С. 127-131.
 6. Там же, с. 197-198
 7. ГУ ЦАНО, ф. 2, оп. 4, д. 7873, л. 8., ф. 2, оп. 5, д. 393, л. 6, ф. 2, оп. 6, д. 963, л. 6., ф. 2, оп. 6, д. 2312, л. 5.
 8. ГУ ЦАНО ф. 2. оп. 1, д. 920, л. 8.
 9. Описание холерных эпидемий 1892, 1893, 1897 и 1907 гг. в Нижнем Новгороде. / Н. Новгород: без изд., 1908. – С. 18.
 10. Там же, с. 4.
 11. ГУ ЦАНО. ф. 30. оп. 35, д. 3799. л. 140 .
 12. Нижегородский ярмарочный справочный листок, 1896, 18. августа
 13. ГУ ЦАНО, ф. 30, оп. 35, д. 4827, л. 1-48
 14. Нижегородский ярмарочный справочный листок, 1896, 2 июля
 15. Нижегородец, 1913, № 14-18.
 16. Нижегородский ярмарочный справочный листок, 1902, 12 июля
 17. ГУ ЦАНО, ф. 2, оп. 1, д. 591, л. 2-15
 18. Отчет о деятельности ОНЯК ПОИТ за 1906-1911 г. / Нижний Новгород. Тип. Машистова, 1911. – 13 с.
 19. Нижегородский церковно-общественный вестник, 1913, 28 июля.

*Дата поступления
в редакцию 19.04.2013*

M.S. Kudryavtsev

**NIZHNY NOVGOROD FAIR AS ADVERTISEMENT, BLACK PR
AND USER SELF-DEPENDENCE EXAMPLE:
THE ANALYSIS OF HISTORICAL EXPERIENCE
(XIX – THE BEGINNING OF XX CENTURY)**

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

Purpose: The paper reveals advertisement history and advertisement influence on the traditional society development. The research purpose is the analysis of advertisement development under the circumstances of capitalism formation on the example of Nizhny Novgorod fair.

Design/methodology/approach: The work is based on the Nizhny Novgorod Region Central Archive documents study, periodical papers and magazines of the beginning of the XX century.

Findings. Statistic analysis of qualitative and quantitative indexes of advertisement development is presented here.

Research limitations/implications: The advertisement role increases within contemporary society, native advertisement research approaches are weak, so it's necessary to overcome these theoretical and methodological problems.

Originality/value: The specify of advertisement development and its technique equipment, the nature of Nizhny Novgorod citizens as advertisement recipients behavior are revealed.

Key words: Russian province history, reform period, social-cultural development, Nizhny Novgorod fair, advertisement.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов

УСТРАНЕНИЕ ВИБРАЦИОННЫХ И ШУМОВЫХ ПОГРЕШНОСТЕЙ МИКРОАКСЕЛЕРОМЕТРОВ

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)

Статья посвящена вопросам устранения вибрационных и шумовых погрешностей микроакселерометров осевого типа посредством конструктивных решений. Рассмотрены наиболее часто встречающиеся факторы, влияющие на вибрационные и шумовые погрешности микроакселерометров и разработаны методы их снижения до допустимого уровня. Например, для снижения помех, проходящих от корпуса к чувствительному элементу, а также для снижения энергетических потерь монтажную пластину, на которой выполнен ЧЭ соединяют с корпусной с помощью лестничного упора. Лестничный упор может быть выполнен лабиринтным, Микромеханический узел (маятник) и электронный блок рассмотрены отдельно и в совокупности. Получена математическая модель микроакселерометра как динамической системы в виде передаточной функции четвертого порядка и ее реализация в виде компьютерной программы.

Ключевые слова: микроакселерометр, струны подвески, лабиринтная консоль, контурное демпфирование, точка резонанса, спад АЧХ.

Микросистемный акселерометр с электростатической пружиной отработки может быть выполнен по осевому типу (рис. 1). Состоит акселерометр из однородной пластины 1 проводящего кремния, внутри которой размещена монтажная пластина 2. Монтажная пластина 2 соединена с корпусной пластиной 1 посредством упора 9 лестничного типа. Гребенки встречно-штыревых преобразователей 3 и 4 выполнены посредством ионного травления на той же монтажной пластине 2 и электрически изолированы от нее зазорами 8.

Подвижные электроды всех встречно-штыревых преобразователей выполнены на чувствительной массе 7. Для ограничения хода чувствительной массы 7 в ней сделан выступ 5, а в монтажной пластине 2 сделана соответствующая канавка.

Осевой микросистемный акселерометр (рис. 1) со встречно-штыревыми преобразователями перемещения и силы выгодно отличается от маятниковых тем, что его чувствительный элемент выполнен всего лишь на одной пластине. При этом исключаются погрешности от неточности соединений составляющих пластин и от процессов возникающих в местах соединений разнородных материалов.

Микросистемный акселерометр со встречно-штыревыми преобразователями может быть выполнен на любые диапазоны измерений, требуемые в технике. Еще одним преимуществом является то, что его жесткость подвесов может быть выполнена сколько угодно малой за счет увеличения длины пружины подвеса с меандровой формой. Так жесткость одной секции подвеса с меандровой пружиной оценивается следующей формулой:

$$k = \frac{E \cdot a_n \cdot b_n \cdot c_n}{l_n} \quad (1)$$

где a_n, b_n, c_n - соответственно длина, ширина и толщина пружины подвеса в его сечении; n - число витков в меандре подвеса. Причем ширина пружины b_n выполняется более чем на порядок ее

толщины c_n , тем самым устраняется погрешность акселерометра от воздействия боковой составляющей по оси z . Из приведенной расчетной формулы видно, что снижение жесткости пружины в зависимости от числа витков в меандре осуществляется по кубическому закону.

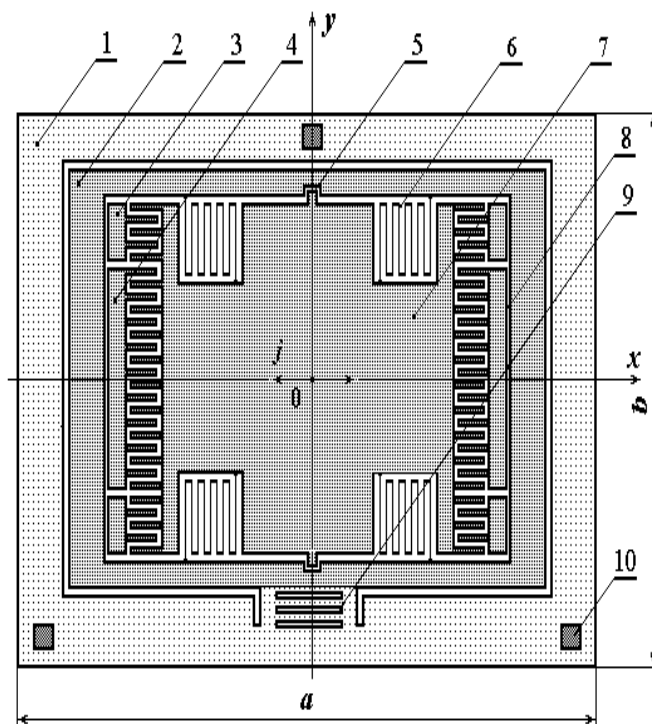


Рис. 1. Чувствительный элемент микроакселерометра:

1 – несущая пластина; 2 – монтажная пластина; 3 – электроды преобразователя перемещений; 4 – встречно-штыревые электроды силовой отработки; 5 – ограничитель перемещений; 6 – упругие подвесы; 7 – чувствительная масса; 8 – зазор между гребенкой электродов и монтажной пластиной; 9 – лестничный упор консольной пластины; 10 – площадка соединения с корпусом

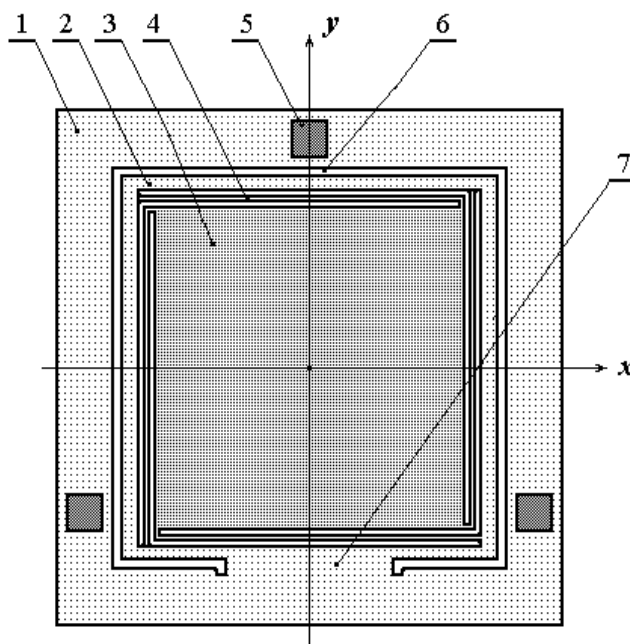


Рис. 2. Чувствительный элемент осевого типа:

1 – несущая пластина; 2 – монтажная рамка; 3 – чувствительная масса (челнок); 4 – упругие подвесы; 5 – площадка для соединения с неподвижной обкладкой; 6 – зазор между подвижным электродом и несущей пластиной; 7 – консоль

Лестничный упор 7 монтажной пластины 2 предназначен для снижения помех, проходящих от корпуса к чувствительному элементу, а также для снижения энергетических потерь ЧЭ через упор. Лестничный упор 9 может быть выполнен лабиринтным, так как это показано на рис. 1.

Соединение несущей пластины 1 с корпусом акселерометра осуществляется по жесткому треугольнику с центром треугольника в центре тяжести чувствительной массы 7. Обычно соединение осуществляют посредством промежуточной ситалловой пластины. Температурные коэффициенты корпуса, несущей и промежуточной пластин должны совпадать. Чаще всего для корпуса применяют нержавеющую сталь типа ковара.

Еще одной разновидностью ЧЭ осевого микроакселерометра является элемент типа «свастика». Названия позиций ЧЭ отмечены в подрисуночных подписях, а его свойства и математические описания аналогичны свойствам ЧЭ по рис. 1.

Даже при оптимальном демпфировании и оптимальных запасах устойчивости по амплитуде и фазе имеется множество факторов могущих отрицательно повлиять на точность микроакселерометров. Например, вибрационные и ударные нагрузки на объект, на котором установлены микроакселерометры. Не маловажное значение на точность микроакселерометров имеют также термодинамические воздействия. В динамическом плане подвижный узел осевого акселерометра имеет одну степень свободы и соответственно описывается передаточной функцией второго порядка:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{m}{ms^2 + K_d s + G}, \quad (2)$$

где K_d – суммарный коэффициент потерь.

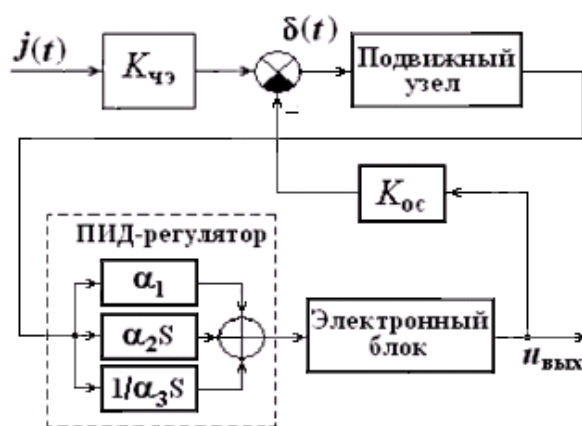


Рис. 3. Структурная схема микроакселерометра

Для определения передаточной функции осевого акселерометра в замкнутом контуре справедлива структурная схема (рис. 3) с соответствующими параметрами. Одно из важных требований, предъявляемых к системам регулирования, заключается в том, чтобы постоянное входное воздействие обрабатывалось без установившейся ошибки. Для статических систем при классическом синтезе этого можно добиться с помощью включения ПИД-регулятора

Таким образом, для определения формы корректирующего устройства можно повторить все, что было установлено для маятникового акселерометра, где было выявлено, что наиболее эффективным корректирующим устройством является устройство по принципу ПИД-регулятора. И тогда передаточная функция корректирующего устройства может быть записана в следующем виде:

$$W_{\text{кор}}(s) = \alpha_1 + \alpha_2 s + \frac{1}{\alpha_3 s}, \quad (3)$$

где α_1 , α_2 , α_3 – постоянные времени звеньев: пропорционального, дифференцирующего и интегрирующего.

Для обеспечения синхронной работы узлов акселерометра постоянные времени механического подвижного узла, дифференцирующего звена и интегратора должны быть равными:

$$T_{\text{мех}} = T_{\text{диф}} = T_{\text{инт}}. \quad (4)$$

Учитывая требование (4) определим постоянные коэффициенты корректирующего устройства в следующем виде:

$$\alpha_2 = \alpha_3 = \sqrt{G/m}. \quad (5)$$

Независимо от типа ЧЭ структурная схема датчика с ПИД-регулятором одна и та же, представлена на рис. 2.

Пользуясь структурной схемой (рис. 3) в замкнутом контуре, найдем передаточную функцию осевого микросистемного акселерометра.

$$W_{\text{акс}}(s) = \frac{M(B_2 s^2 + B_1 s + B_0)}{A_4 s^4 + A_3 s^3 + A_2 s^2 + A_1 s + A_0}, \quad (6)$$

где $M = mK_{\text{мп}}K_{\text{yc}}$; $N = K_{\text{ос}}K_{\text{мп}}K_{\text{yc}}$; $B = 1$; $B_1 = T$; $B_2 = T^2$ – коэффициенты числителя передаточной функции; $A_0 = N$; $A_1 = (G + N)T$; $A_2 = (K_{\text{д}} + G\tau + NT)T$; $A_3 = (m + K_{\text{д}}\tau)T$; $A_4 = m\tau T$ – коэффициенты знаменателя передаточной функции.

Силовой электростатический преобразователь линеаризован по напряжению и работает на притяжение. Зазор между подвижным и неподвижным электродами составляет порядка десяти микрометров. Величина развиваемой силы электростатического преобразователя, определяется следующим выражением:

$$F_э = \frac{2\epsilon_0 b_э c_э}{h^2} u_{\text{оп}} u_{\text{упр}}, \quad (7)$$

с относительной ошибкой нелинейности по перемещению, равной

$$\delta_n = 2z/h, \quad (8)$$

где $a_э$ и $b_э$ – длина и ширина электрода; z – смещение чувствительной массы от нейтрального положения; h – начальный зазор между подвижным и неподвижными электродами.

В связи с тем, что ошибки компенсационных приборов определяются ошибками обратного преобразователя, без принятия специальных мер, его ошибка нелинейности целиком будет присуща всему измерительному прибору. Проблема может быть решена различными путями. Первый, наиболее приемлемый и точный, это использование интеграторов в прямой цепи, что придает компенсационным приборам астатический режим и отработку к нулю смещения x . В тех случаях, когда применение астатизма невозможно, например, из-за потери динамической устойчивости прибором, ошибку нелинейности можно снизить до допустимого значения ограничением величины смещения. Демпфирование подвижного узла во всех случаях осуществляется в электрическом контуре.

Одним из возможных недостатков рассматриваемой конструкции является возникновение высокочастотных колебаний в длинных струнах подвеса, удерживающих чувствительную массу. В нейтральном положении упругого подвеса, выполненных в виде струн без возбуждения колебаний в них, натяжение отсутствует. При возбужденных колебаниях в результате искривления струны возникает натяжение, являющееся как бы начальным. Далее при изгибе подвеса натяжение в струнах изменяется, влияя тем самым на резонансные частоты струн. Колебания струн в данном случае может привести к зашумленности выходного сигнала. Однако этого не произойдет, поскольку в силу специфики конструкции чувстви-

тельная масса может поворачиваться относительно перпендикулярной к массе оси и усилие натяжения струны становится равным нулю. Этому способствует также силовая отработка обратной связи, стремящаяся возратить чувствительную массу в нейтральное положение.

В общем виде колебания струны описываются волновым уравнением с той лишь разницей, что константа, представляющая смысл скорости распространения волн, имеет свои особенности:

$$\frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial t^2} = v^2 \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial x^2}, \quad (9)$$

где ε – смещение участков струны в направлении оси y относительно нейтрального положения; $v = [(T + T_0)/\rho S]^{1/2}$ – константа, имеющая размерность скорости; T_0 и T – соответственно начальное натяжение струны и натяжение, задаваемое изгибом упругого подвеса; ρ – плотность материала струны; S – площадь поперечного сечения струны.

Подстановкой $\varepsilon(x, t) = u(x) \exp(j\omega t)$ уравнение (8) можно преобразовать в обыкновенное дифференциальное уравнение следующего вида:

$$\frac{\partial^2 u(x)}{\partial x^2} + \left(\frac{\omega}{v}\right)^2 u(x) = 0. \quad (10)$$

Из решения (9) с учетом начальных и граничных условий найдем распределение амплитуд колебаний вдоль струны

$$u(x) = A \sin(\omega x/v)$$

и резонансные частоты основного вида колебаний и гармоник

$$F = \frac{\pi n}{a} \sqrt{\frac{T_0 + T}{\rho S}}, \quad (11)$$

где n – номер гармоники; T_0 – технологическое натяжение струны подвеса при изготовлении; T – возможное натяжение струны при ее деформации. Учитывая, что натяжение струн снимается поворотом чувствительной массы (рис. 2) и соответственно возникновение их колебаний отсутствует,

Вибрационная помеха может также проникнуть к чувствительному элементу от объекта через соединения с акселерометром. Неподвижные обкладки чаще всего жестко соединяются с корпусной кремниевой пластиной в которой выполнен подвижный узел чувствительного элемента. Далее от площадок соединения 6 возмущения в виде механических напряжений передаются к упругим струнам 5 по телу корпусной пластины 1. Оценку напряжений в точках корпусной пластины можно провести по следующей формуле:

$$\sigma_i = p \frac{(1 - \nu^2) S}{(1 - \nu^2) S + y_0 L}, \quad (12)$$

где p – давление на контакт; ν – коэффициент Пуассона; S – площадь контакта; L – расстояние от точки приложения сосредоточенной силы до заданного сечения; y_0 – толщина пластины с ЧЭ.

Из формулы (11) видно, что с уменьшением размеров площадки соединения и с увеличением расстояния до упругих подвесов маятника, влияние контактных напряжений снижается. Для того чтобы реализовать свойство, описываемое формулой (11) чувствительная масса 3 выполняется в монтажной рамке 2. В свою очередь монтажная рамка относительно корпусной пластины 1 установлена на консоли 7. Консольное крепление монтажной рамки снижает также температурные напряжения в чувствительном элементе.

Ограничение по нижнему пределу (порогу чувствительности) определяется в основном напряжением тепловых шумов, имеющих место в емкостной мостовой схеме:

$$U_{\text{тн}} = (2k\Theta/\pi C)^{1/2}, \quad (13)$$

где $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж/К - постоянная Больцмана; Θ - температура чувствительного элемента, К; C - емкость между электродами преобразователя перемещений, Ф. В чистом виде напряжение тепловых шумов представляет собой погрешность нулевого уровня. Снизить эту погрешность возможно термостатированием чувствительного элемента при пониженной температуре или увеличением емкости преобразования перемещений. Последнее наиболее приемлемо для применения в микроакселерометрах.

Увеличение емкости между электродами преобразователя перемещений возможно двумя путями: уменьшением зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами, увеличением площади неподвижного проводящего электрода 3 (рис. 2) или одновременно тем и другим способами.

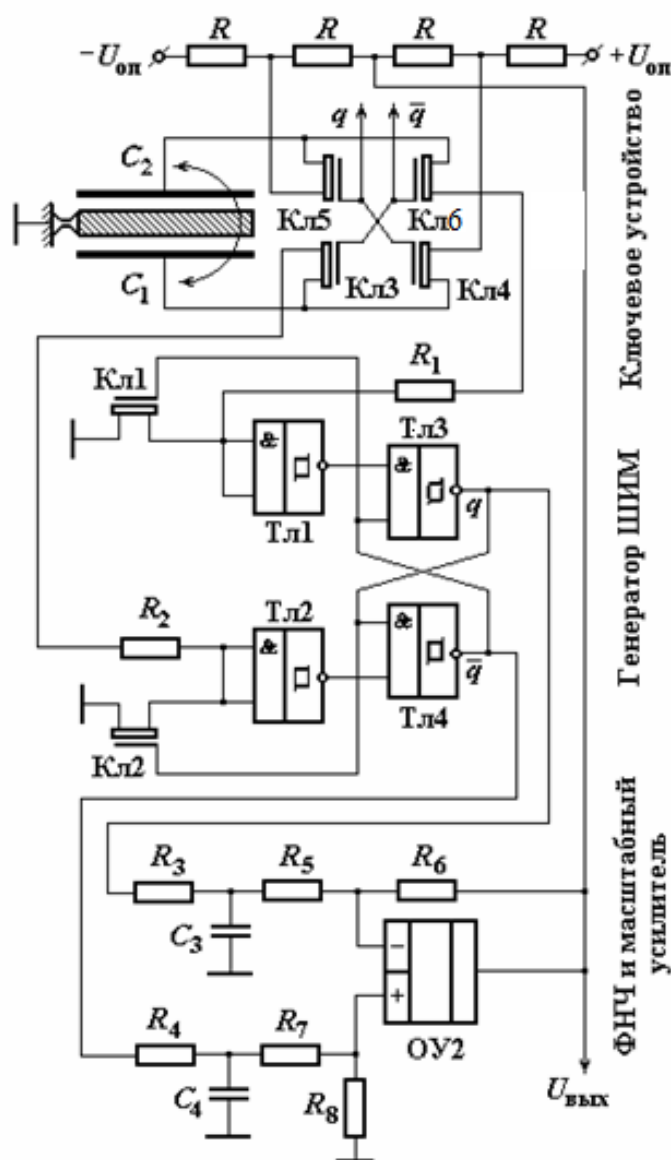


Рис. 4. Электрическая схема микроакселерометра

Уменьшение зазора между подвижным и неподвижным проводящими электродами ограничено критической напряженностью электрического поля, при которой возникает электрический пробой. Например, в среде сухого азота критическая напряженность составляет $E_{кр} \approx 5 \cdot 10^6$ В/м. Electrodes емкостей датчика перемещений и датчика силы размещены на проводящей площади неподвижной обкладки и суммарно не могут превосходить эту

площадь. В данном случае имеет место выбора оптимального соотношения между площадями датчика перемещений и датчика силы.

Одним из возможных вариантов является поочередное использование во времени датчика перемещений или датчика силы (рис. 4) при суммарной площади электродов. Цепочка постоянных резисторов R представляет линейаризатор по напряжению силового преобразователя. Управляется линейаризатор выходным напряжением масштабного усилителя. Посредством ключевой схемы Кл3 – Кл6 измерительные емкости $C_1 - C_2$ могут подключаться с тактовой частотой к выходам линейаризатора или ко входам генератора ШИМ.

Библиографический список

1. ГОСТ 24346-80. ВИБРАЦИЯ. Термины и определения.
2. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.04.2013*

V.D. Vavilov

ELIMINATING VIBRATION AND NOISE ERRORS MICROACCELEROMETERS

Arzamas polytechnic Institute (branch) of Nizhny Novgorod state technical university
n.a. R.Y. Alexeev

Question removal vibratory inaccuracy microaccelerometers axial type is considered In article by means of constructive decisions. They Are Considered most often meeting factors, influencing upon vibratory and noise inaccuracy microaccelerometers and designed methods of their reduction before possible level. For instance, for reduction of the hindrances, passing from body to detector element, as well as for reduction of the energy losses erection plate, on which is executed by CHE connect with with body by means of stair stress. Stair stress can be executed labyrinth. Mikromehanicheskiy node (the pendulum) and electronic block are considered apart and in the aggregate. Mathematical model microaccelerometers is Received as dyne-ческой of the system in the manner of transmission function of the fourth order and its realization in the manner of computer program.

Key words: microaccelerometr, strings of the lavalier, console, contour air-cushion, point reasonable, decline АСНН.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

В.Л. Волков, М.В. Хрисанова

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ И ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ДАТЧИКА УГЛОВОЙ СКОРОСТИ**

Арзамасский политехнический институт (филиал НГТУ)

Сформулированы требования к электромеханическим параметрам МЭМС датчика угловой скорости (ДУС) по критерию статической и динамической точности. Выявлены доминирующие параметры, определяющие нестабильность крутизны статической характеристики датчика. Определены оптимальные параметры, соответствующие минимальной динамической ошибке датчика. Разработана методика расчета параметров ДУС и его статических и динамических характеристик, дающая минимальные среднеквадратические ошибки датчика для реальных диапазонов измерения.

Ключевые слова: МЭМС, датчик угловой скорости, статическая характеристика, точность, чувствительность, средний квадрат ошибки, моделирование.

Постановка задачи

В ряде работ по микросистемной технике затрагивались вопросы обеспечения статической и динамической точности датчиков [1, 2]. Так для микромеханического акселерометра, модель которого представлена в работах [1, 3], была показана возможность построения корректирующего устройства (КУ) с параметрами, обеспечивающими минимальные значения динамических ошибок [1]. Там же были выявлены предельно допустимые отклонения параметров КУ относительно расчетных.

В работе [2] исследовано влияние всех конструктивных параметров микромеханического акселерометра на крутизну статической характеристики и сформулированы требования к предельным значениям параметров на основе обеспечения необходимой статической точности. Эта задача решалась путем выявления параметров, наиболее сильно влияющих на показатель качества статической точности.

Аналогичная задача может быть рассмотрена для микросистемного датчика угловой скорости (ДУС). ДУС конструктивно выполняется так же, как и акселерометр по интегральной технологии на основе конструкционного материала кремния [4]. Однако принцип действия ДУС существенно отличается от акселерометра и соответственно формулы для расчета характеристик ДУС имеют принципиально иной вид.

Задача определения коэффициентов чувствительности параметров для одного из основных параметров ДУС – крутизны статической характеристики (K), как и для акселерометра, может быть решена методом статистических испытаний [2]. При статистических испытаниях производится моделирование работы датчика с номинальными значениями параметров при случайных вариациях этих параметров. В каждом испытании вычисляются отклонения варьируемых параметров от их номинальных значений – $\delta f_j(k)$, а также показателя качества K относительно своего номинального значения – $\delta K(k)$. Коэффициент чувствительности $\Psi_j(k)$ j -го параметра в k -м испытании при этом определяется в виде

$$\Psi_j(k) = \frac{\delta K(k)}{\delta f_j(k)}. \quad (1)$$

Среднее значение коэффициента влияния для каждого параметра вычисляется в виде:

$$\Psi_j = \sum_{k=1}^N \frac{\Psi_j(k)}{N}. \quad (2)$$

где N – число статистических испытаний. Коэффициенты чувствительности показателя каче-

ства K к параметрам необходимо знать для дальнейшего обеспечения допустимой погрешности этого показателя за счет предъявления требований к стабильности влияющих параметров. При этом необходимо выполнить условия, чтобы K попадал в поле допуска. Только тогда датчик по данному свойству будет считаться работоспособным.

При проектировании ДУС, как правило, задается диапазон измерения входной величины угловой скорости и предельная относительная ошибка датчика. Методика расчета ДУС для заданного диапазона измерения предполагает сначала вычисление соответствующего значения номинальной крутизны статической характеристики K . Условие, определяющее коэффициент передачи датчика для заданного диапазона, имеет вид:

$$U_{\max} / f_{\max} = K, \quad (3)$$

где f_{\max} – верхнее предельное значение входного сигнала на заданном диапазоне измерения; U_{\max} – максимальное значение выходного сигнала в вольтах.

Далее на основании предъявления требований к предельно допустимой относительной ошибке датчика становится известным соответствующее абсолютное допустимое отклонение крутизны характеристики K относительно номинального значения:

$$\delta K = \Delta \cdot K, \quad (4)$$

где $\Delta = \delta U_m / U_{\max}$ – предельно допустимая относительная ошибка датчика, δU_m – предельное отклонение выходного напряжения датчика на пределе измерения.

В предположении того, что ошибка датчика возникает только из-за j -го параметра, определим его предельно допустимое отклонение $\delta(f_j)$ от номинального значения по формуле

$$\delta(f_j) = \Delta \cdot U_{\max} / \Psi_j. \quad (5)$$

Для анализа требований к параметрам датчика определим предельную абсолютную погрешность выходного сигнала датчика на границе диапазона измерения, учитывая влияние всех параметров одновременно, по линейному приближенному соотношению

$$\delta U_m = \sum_{j=1}^n \Psi_j \delta(f_j). \quad (6)$$

Важной задачей при расчете ДУС на разные диапазоны измерения является выбор ключевых параметров, наиболее сильно влияющих на крутизну статической характеристики ДУС (этими параметрами в дальнейшем можно будет регулировать задание диапазона измерения датчика). В этом случае в методике расчета датчика сначала решается задача определения величины ключевого параметра, дающего крутизну K , потом рассчитываются другие сопутствующие параметры ДУС. Далее с учетом коэффициентов влияния параметров предъявляются требования к их допустимым отклонениям относительно расчетных.

Математическая модель датчика угловой скорости

Рассмотрим ДУС на основе вибрационного микрогироскопа LL -типа [4]. Принципиальная схема такого ДУС представлена на рис. 1. Датчик включает в себя чувствительный элемент (ЧЭ) из двух интегральных масс, выполненных в виде внутренней 1 и наружной 2 рамок. Внутренняя рамка 1 относительно внешней рамки 2 смонтирована на упругих подвесах 3, в свою очередь рамка 2 посредством упругих подвесов 4 связана с анкерами 5.

Анкеры обеспечивают зазор подвижного ЧЭ относительно подложки-основания. На основании принципа действия ДУС, как вибрационного гироскопа [5], внутренняя рамка 1 относительно внешней 2 посредством гребенок электростатического привода приводится в колебательное движение вдоль оси X (режим движения). Информация о параметрах колебаний считывается емкостными измерителями перемещений $C_{\text{пк}}$ и используется в контуре управления режимом движения.

При воздействии угловой скорости Ω_z обе рамки имеют колебательное движение по оси Y (на основании возникающего эффекта ускорения Кориолиса и соответствующей ему силы). Это режим чувствительности, который обеспечивается считыванием информации емкостными измерителями перемещений $C_{\text{сип}}$.

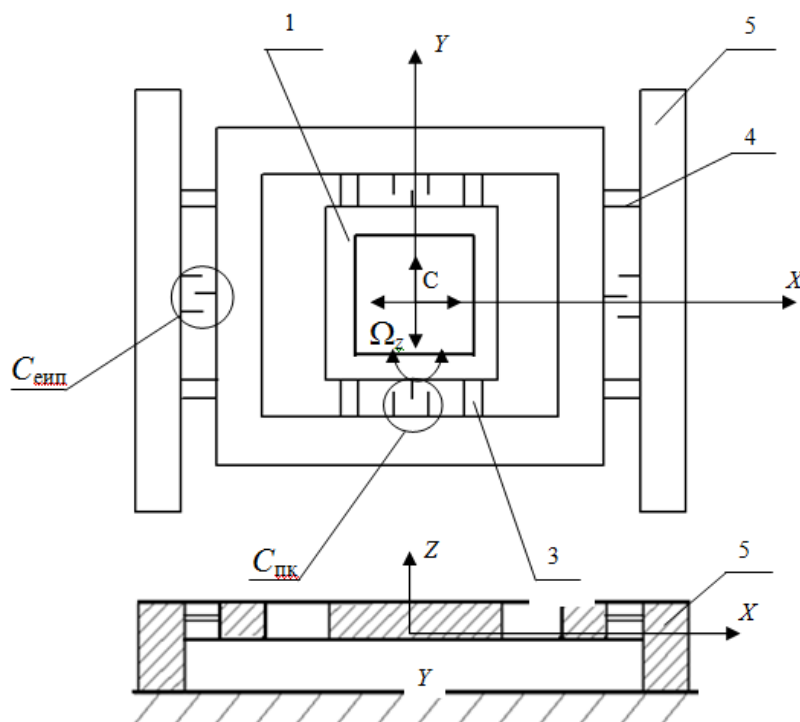


Рис. 1. Принципиальная схема чувствительного элемента ДУС

В результате воздействия входного сигнала ДУС Ω_z обе рамки на основании эффекта прецессии выполняют движение вдоль оси Y . Емкостной измеритель перемещений (ЕИП) включен в дифференциальную мостовую схему, с которой высокочастотный сигнал масштабируется усилителем, в итоге на выходе микросхемы получается сигнал напряжения, пропорциональный угловой скорости. Оптимальный режим движения в режиме чувствительности обеспечивается электростатической обратной связью (ОС).

Дифференциальная мостовая схема включения емкостного преобразователя перемещений дает компенсацию влияния диэлектрической проницаемости среды между измерительными электродами и исключает методическую ошибку – тяжение между ними [5].

Для анализа работы ДУС в режиме динамики с целью оптимизации его динамических характеристик составлена структурная схема, которая представлена на рис. 2.

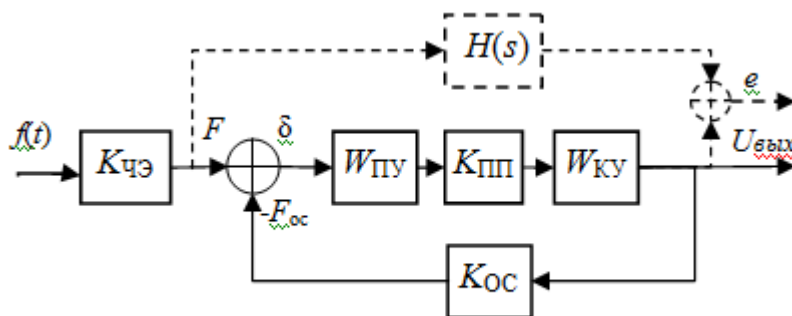


Рис. 2. Структурная схема ДУС:

- $K_{ЧЭ}$ – коэффициент передачи чувствительного элемента;
- $W_{ПУ}$ – передаточная функция подвижного узла;
- $K_{ПП}$ – коэффициент передачи емкостного преобразователя перемещений;
- $W_{КУ}$ – передаточная функция корректирующего устройства;
- $K_{ОС}$ – коэффициент передачи звена обратной связи

Общая передаточная функция, согласно структурной схеме, вычисляется в виде

$$W(s) = K_{чэ} \frac{W_{пв} K_{пш} W_{кв}}{1 + W_{пв} K_{пш} W_{кв} K_{ос}}. \quad (7)$$

Основные математические модели чувствительного элемента, преобразователя перемещения, силового элемента обратной связи используются в соответствии с теоретическими положениями работ [3, 4].

Параметры электростатического возбудителя вибраций, передаточные функции чувствительного элемента и подвижного узла рассчитываются на основе конструкции аналогичной микрогироскопу ADXRS фирмы Analog Device [6].

Коэффициент передачи ЧЭ имеет вид:

$$K_{чэ}(s) = 2m\nu_x \cong 2mX_0\omega \quad (8)$$

где X_0 – амплитуда колебаний в режиме движения подвижного узла; m – масса подвижного узла; ω – резонансная частота.

Максимальное перемещение подвижного узла X_0 при заданных параметрах упругого подвеса и электростатического преобразователя на резонансной частоте рассчитывается по формуле:

$$X_0 = A_{\max} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon a_{мпв} b_{мпв} U_{оп}^2 a_{tx}^2 Q}{1 h E_{[100]} b_{tx} c_{tx}^3} \quad (9)$$

где ε_0 , ε – соответственно диэлектрическая постоянная и диэлектрическая проницаемость среды между электродами; E_{100} – модуль упругости кремния в плоскости 100; $U_{оп}$ – опорное напряжение; h – величина зазора между пластинами конденсаторов; $a_{мпв}$, $b_{мпв}$ – длина и ширина подвижного узла; a_{tx} , b_{tx} , c_{tx} – длина, ширина и толщина торсиона внутренней рамки; Q – добротность колебательной системы.

Передаточная функция подвижного узла, как колебательного звена имеет вид:

$$W_{пв}(s) = \frac{1}{ms^2 + K_{д}s + G_y} \quad (10)$$

где $G_y = E_{[100]} b_{ty} c_{ty}^3 / (16a_{ty}^3)$ – жесткость торсионов, работающих на изгиб в направлении оси Y ; $K_{д}$ – коэффициент демпфирования.

Абсолютный коэффициент демпфирования для колебательных систем в зависимости от массы подвижного узла и жесткости упругих подвесов определяется в виде:

$$K_{д} = \sqrt{2mG_y} \quad (11)$$

Коэффициент передачи емкостного преобразователя перемещений имеет вид:

$$K_{пш} = \frac{U_{он} Q}{h} \quad (12)$$

Коэффициент передачи звена электростатической обратной связи имеет вид:

$$K_{ос} = 2\varepsilon_0 \varepsilon l_k b_k U_{он} / h^2, \quad (13)$$

где l_k , b_k – длина и ширина электрода обратной связи.

Методика расчета основных характеристик ДУС

С целью расчета конструктивных параметров ДУС и передаточных функций в программной среде *Matlab* разработана программа-функция $[Z, W_{пу}, W_{че}, W_{бе}, W] = dus(P)$, входными данными которой является вектор параметров P (подвижного узла, блока электроники, конструкции):

$$P = [Ar1, Adop, Bdop, h, Aco, Bo, Abo, Ayo, C, Dr2, Lr2, lk, bk, Atx, Btx, Aty, Bty, Ctx, Cty, Ky, Uop, T],$$

где в соответствии с конструкцией ЧЭ микрогироскопа [6] обозначено: $Ar1$ – длина стороны внутренней рамки; $Adop$ – длина дополнительной части внутренней рамки; $Bdop$ – ширина дополнительной части внутренней рамки; h – величина зазора между пластинами конденсаторов (в программе $dy0$); Aco – длина центрального окна; Bo – ширина окон; Abo – длина бокового окна; Ayo – длина углового окна; C – толщина подвижного элемента; $Dr2$ – ширина внешней рамки; $Lr2$ – длина стороны внешней рамки; lk – длина пальца конденсатора чувствительности; bk – ширина пальца конденсатора чувствительности; Atx – длина торсиона внутренней рамки; Btx – ширина торсиона внутренней рамки; Ctx – толщина торсиона внутренней рамки; Aty – длина торсиона внешней рамки; Bty – ширина торсиона внешней рамки; Cty – толщина торсиона внешней рамки.

Дополнительно введены обозначения: Ky – коэффициент усилителя мощности, Uop – опорное напряжение, T – постоянная времени блока электроники.

Выходными параметрами программы-функции являются передаточные функции:

Wpu – подвижного узла; $Wche$ – чувствительного элемента; Wbe – блока электроники; W – полная передаточная функция ДУС и вектор расчетных параметров ДУС:

$$Z=[m,w,Gy,Koc,K],$$

где m – масса чувствительного элемента; w – круговая частота электростатического привода; Gy – жесткость одного торсиона внешней рамки; Koc – коэффициент обратной связи; K – коэффициент передачи датчика.

Текст программы-функции $dus(P)$ на языке *Matlab* составлен в соответствии с теоретическими формулами механики, формулами для расчета коэффициента чувствительного элемента, первичного преобразователя, датчика обратной связи [3, 4], формулами для вычисления передаточных функций. Примеры такого рода программ приводились в работах [2, 5].

Использование программы-функции $dus(P)$ осуществляется путем предварительного задания входных данных – вектора параметров P . Все исходные параметры ЧЭ, необходимые для расчета сведены в файл *input.dat* текстового формата *ascii*. Для расчета выходных параметров выполняется вызов $dus(P)$ из управляющей программы *control_dus*:

```
Po=load('input.dat');
```

```
P=Po;
```

```
[Z,Wpu,Kche,Wbe,W]=dus(P) % вызов программы-функции.
```

При расчете параметров Ctx , Cty , определяющих диапазон измерения датчика, сначала рассчитывается коэффициент передачи датчика K , соответствующий диапазону измерения (3), и подбираются численные значения Ctx , Cty , удовлетворяющие этому диапазону.

Пример. При исходных данных ДУС для заданного диапазона измерения 150 град/с определены результирующие параметры. При использовании программы-функции dus рассчитаны все параметры ДУС (основные параметры приведены в табл. 1).

Таблица 1

Основные параметры ДУС для диапазона ± 150 град/с

Параметр	$Kche$	m , кг	w , рад/с	Gy	Koc	K	Kpp	Uop , В	$Umax$, В	T , с
Значение	$2,03e-9$	$4,03e-7$	$1,68e+3$	2,03	$8,85e-10$	2.292	$4e+10$	20	6	$1.6e-3$
Параметр	$Wmax$	Atx	Btx	Ctx	Aty	Bty	Cty	lk	bk	
Значение	$1,9 e-10$	$3,24e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1,0e-4$	$1,0e-5$	$2e-6$	$1e-4$	$1e-5$	

Соответствующие полученным параметрам передаточные функции представлены в табл. 2.

Таблица 2

Передаточные функции ДУС, соответствующие структурной схеме рис. 2

Передаточная функция подвижного узла	Передаточная функция КУ	Полная передаточная функция датчика
$W_{pu}(s) = \frac{1}{4 \cdot 107s^2 + 1,28 \cdot 10^{-3}s + 2,03}$	$W(s) = \frac{4,03s^2 + 1,28 \cdot 10^4 s + 2,03 \cdot 10^7}{s}$	$W_o(s) = \frac{4,54 \cdot 10^{-7}s^2 + 1,44 \cdot 10^{-3}s + 2,292}{2,8 \cdot 10^{-15}s^3 + 2,0 \cdot 10^{-7}s^2 + 6,3 \cdot 10^{-4}s + 1}$

Далее решая задачу обоснования требований к параметрам ДУС необходимо определить коэффициенты чувствительности параметров (вектора параметров P), на основной показатель качества – крутизну статической характеристики K . Используем стандартную формулу чувствительности (2) с учетом (1).

Вариация δf_j j -го параметра задается относительно номинального значения параметра f_j , соответствующего заданному диапазону измерения датчика. Вариация δf_j производится в пределах стандартного 5% допуска на исходные параметры по равномерному закону распределения. Проводятся многочисленные испытания, в которых фиксируются как вариации δf_j , так и соответствующие изменения крутизны. Оценка коэффициента чувствительности j -го параметра производится на основе среднестатистического значения (3).

На основе метода статистического моделирования составлена управляющая программа *dus_kj.m* для расчета коэффициентов чувствительности параметров, текст которой представлен далее:

```
Po=load('input.dat'); % ввод исходных данных
[Z,Wpu,Wche,Wbe,W]= dus(Po); % расчет параметров ДУС для номинальных значений Po
K=dcgain(W); % крутизна статической характеристики для заданного диапазона
% Вычисление Ko(k) – крутизны при вариации s(k) j-го параметра
j=1;
while j<23
P= Po; an(j)=P(j); k=1;
while k<1000 % задание цикла в 1000 статистических испытаний
P(j)=0.95*an(j)+0.1*an(j)*rand(1,1); % вариация j-го параметра
[Z,Wpu,Wche,Wbe,W]= dus(P); % вычисление параметров ДУС
Ko(k)=dcgain(W); s(k)=P(j); % запоминание K и j-го параметра в массив
e(k)=Ko(k)-K; e1(k)=s(k)-Po(j); % расчет отклонений
kjk(k)= e(k)/e1(k); % коэффициент влияния j-го параметра в k-м испытании
k=k+1; end
kj(j)=mean(kjk); % среднее значение коэффициента влияния j-го параметра
j=j+1; end
save('result2.txt','P','kj','-ascii') % запись результатов в текстовый файл.
```

Эта программа вызывает подпрограмму-функцию $dus(P)$, предназначенную для расчета параметров ДУС. При использовании *dus_kj.m* по формуле найдены коэффициенты чувствительности (коэффициенты влияния) параметров f_i ДПИ на выходную характеристику K (3). Были получены результаты по коэффициентам влияния Ψ_j и допускам δ_j на параметры для различных предельных погрешностей датчика. Результаты для различных предельных погрешностей датчика (0,1 % погрешность и 1 % погрешность) сведены в табл. 3.

Анализ результатов табл. 3 показал, что при 1% предельной погрешности датчика предъявляются вполне реальные требования по стабильности параметров. Особые требова-

ния на уровне 10^{-7} - 10^{-8} м предъявляются только к параметрам торсионов внутренней рамки по ширине и толщине.

Таблица 3

Коэффициенты чувствительности Ψ_j и допуски δ_i параметров

Параметр f_i	Статистический номинал f_i	$\Psi_j = \delta K / \delta f_i$	δ_i (при 0,1% точности)	δ_i (при 1% точности)
$P(1)=Ar1$	$1.5e-3$	$5.5504687e+3$	$1.0809898e-6$	$1.0780415e-5$
$P(2)=Adop$	$1.215e-4$	$2.9833036e+2$	$2.0111933e-5$	$2.0111949e-4$
$P(3)=Bdop$	$8.1e-5$	$4.4750308e+2$	$1.3407729e-5$	$1.3407685e-4$
$P(4)=h$	$2.0e-5$	$1.1458764e+5$	$5.2361667e-8$	$5.2361667e-7$
$P(5)=Aco$	$1.242e-3$	$-7.9524027e+2$	$-7.5448896e-6$	$-7.5400269e-5$
$P(6)=Bo$	$2.16e-4$	$-8.5489977e+3$	$-7.0183666e-7$	$-7.0180283e-6$
$P(7)=Abo$	$8.1e-4$	$-7.9576011e+2$	$-7.5399607e-6$	$-7.5427061e-5$
$P(8)=Ayo$	$1.35e-4$	$-1.5911840e+3$	$-3.7707770e-6$	$-3.7704028e-5$
$P(9)=C$	$7,238e-5$	$1.5812170e+4$	$3.7945457e-7$	$3.7773373e-6$
$P(10)=Dr2$	$1.9e-4$	$6.1885089e+3$	$9.6953889e-7$	$9.6953889e-6$
$P(11)=Lr2$	$1.62e-3$	$7.2581277e+2$	$8.2665947e-6$	$8.2665947e-5$
$P(12)=lk$	$1e-4$	$-2.2845917e+4$	$-2.6262899e-7$	$-2.6217972e-6$
$P(13)=bk$	$1e-5$	$-2.3344354e+5$	$-2.5702146e-8$	$-2.6181010e-7$
$P(14)=Atx$	$3,24e-4$	$1.0750782e+4$	$5.5809893e-7$	$5.5643837e-6$
$P(15)=Btx$	$1e-5$	$-1.1013787e+5$	$-5.4477174e-8$	$-5.4691715e-7$
$P(16)=Aty$	$1.0e-4$	$3.8200672e+1$	$1.5706530e-4$	$1.5706530e-3$
$P(17)=Bty$	$1e-5$	$3.8200672e+2$	$1.5706530e-5$	$1.5706530e-4$
$P(18)=Ctx$	$2e-6$	$-1.7396985e+6$	$-3.4488735e-9$	$-3.5071179e-8$
$P(19)=Cty$	$2.0e-6$	$3.6232268e-9$	$1.6559824e+6$	$-2.1959583e+7$
$P(20)=Ku$	$9.0e+4$	$2.3614328e-20$	$2.5408303e+17$	$-6.9695992e+017$
$P(21)=Uop$	$2.0e+1$	$1.1458764e-1$	$5.2361667e-2$	$5.2361667e-1$

Определение параметров корректирующего устройства

В структурной схеме датчика (см. рис. 2) для улучшения динамических свойств датчика предусмотрено корректирующее устройство с передаточной функцией $W_{ку}$, соответствующей ПИД регулятору.

$$W_{ку}(s) = T_1 s + T_2 + T_3 / s, \quad (15)$$

где T_1, T_2, T_3 , – постоянные времени корректирующего устройства.

Такое КУ в микроакселерометре впервые было применено в работе [1], далее обсуждались особенности выбора его параметров в работах [2, 7]. В работе [2], с помощью данного КУ, была показана возможность достижения малой колебательности переходного процесса или даже обеспечения его затухания по апериодическому закону с достаточно малым временем. В работе [2] также показана возможность достижения малых значений динамической ошибки СКО при работе микроакселерометра с применением ПИД КУ (на уровне 10^{-7} , что для подобных приборов достаточно неплохой показатель).

При использовании ПИД корректирующего устройства в ДУС необходимо продолжить исследование его положительных свойств и определить достижимость наибольшей динамической точности датчика в зависимости от параметров КУ. В работе [7] утверждается, что с целью синхронизации работы узлов микросистемного датчика коэффициенты ПИД КУ должны быть одинаковыми, но доказательство этого утверждения не приводится. Очевидно, что при равенстве коэффициентов T_1, T_2, T_3 важные качества переходного процесса датчика получатся далеко не оптимальными.

Для достижения удовлетворительного качества переходного процесса необходимо внести в модель прямой цепи датчика ограничения на параметры КУ.

Запишем передаточную функцию прямой цепи в соответствии со структурной схемой рис. 2 на основании (7) с учетом передаточной функции КУ (15).

$$W_{\text{пр}}(s) = W_{\text{пу}} K_{\text{пп}} W_{\text{ку}} = \frac{1}{Js^2 + K_{\text{дв}}s + G_y} K_{\text{пп}} \left(T_1 s + T_2 + \frac{T_3}{s} \right). \quad (16)$$

Используя эту передаточную функцию можно получить необходимые и достаточные условия для получения графика переходного процесса с малой колебательностью (или вообще с отсутствием таковой).

Наиболее очевидным и простым решением является подбор параметров КУ таким образом, чтобы нули КУ совпали с полюсами подвижного узла. При этом необходимо выполнить условия: $T_2/T_1 = K_{\text{дв}}/J$, $T_3/T_1 = G_y/J$ и тогда скобки $(s^2 + T_2/T_1 s + T_3/T_1)$ и $(s^2 + K_{\text{дв}}/J s + G_y/J)$ сокращаются. В результате из (17) получим более простое выражение для передаточной функции прямой цепи.

$$W_{\text{пр}}(s) = K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s). \quad (17)$$

Полная передаточная функция замкнутой системы (датчика) с учетом коэффициента передачи чувствительного элемента и обратной связи на основании (7) имеет вид:

$$W(s) = K_{\text{чэ}} \frac{K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s)}{1 + K_{\text{ос}} K_{\text{пп}} T_1 / (J \cdot s)} = \frac{K_{\text{чэ}}}{K_{\text{ос}}} \frac{1}{J (K_{\text{ос}} K_{\text{пп}} T_1)^{-1} s + 1}. \quad (18)$$

Обозначая $K_{\text{ку}} = T_1/J$, как коэффициент передачи КУ, а $T_0 = (K_{\text{пп}} K_{\text{ос}} K_{\text{ку}})^{-1}$ – как постоянную времени датчика, получим передаточную функцию замкнутой системы в виде:

$$W(s) = \frac{K_{\text{чэ}}}{K_{\text{ос}}} \frac{1}{T_0 s + 1}. \quad (19)$$

Из теории известно, что полученной передаточной функции датчика соответствует полоса пропускания равная $\omega_0 = 1/T_0$, и время переходного процесса равно $t_{\text{пп}} = 3 \cdot T_0$. Реализация T_0 при ранее вычисленных параметрах $K_{\text{пп}}$, $K_{\text{ос}}$ возможна только за счет T_1 . Параметр T_1 определяет эффективность действия дифференцирующей составляющей КУ. Другие параметры T_2 , T_3 оказываются тесно связанными с T_1 соотношениями: $T_2 = T_1 \cdot K_{\text{дв}}/J$, $T_3 = T_1 \cdot G_y/J$ (в отличие от работы [7], где T_1 , T_2 , T_3 предполагались равными).

Моделирование ДУС в *Matlab Simulink*

С целью реального исследования работоспособности ДУС и проверки его характеристик создана адекватная модель в визуальной среде *Matlab Simulink* [8] при реализации рассчитанных ранее параметров.

Схема моделирования ДУС в *Matlab Simulink* представлена на рис. 3. Схема предусматривает вычисление ошибки отработки входного скачкообразного сигнала структурой ДУС. Причем при дальнейшей, уже программной обработке массива ошибок, полученных в блоке *e*, рассчитывается экспериментальное значение среднего квадрата ошибки.

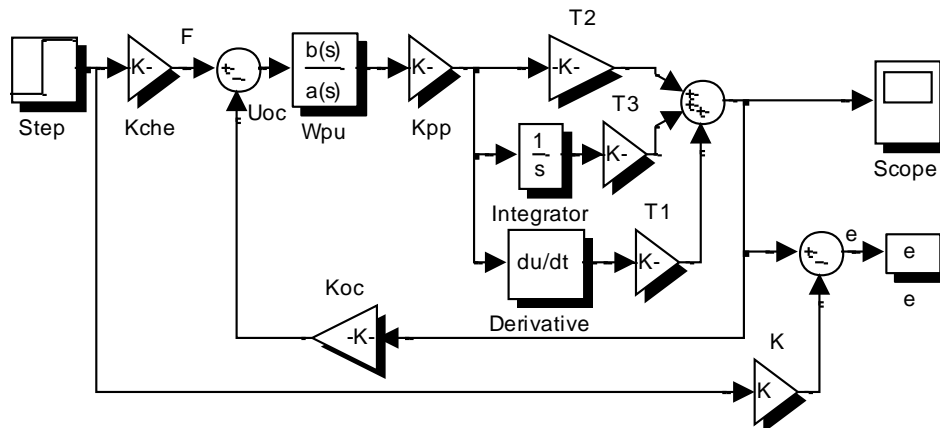


Рис. 3. Схема моделирования ДУС в *Matlab Simulink*

При моделировании получен график переходного процесса при максимальном входном сигнале 150 град/с (см. рис. 4), показывающий аperiodичность достижения максимального выходного сигнала 6 В за время примерно $7 \cdot 10^{-7}$ с.

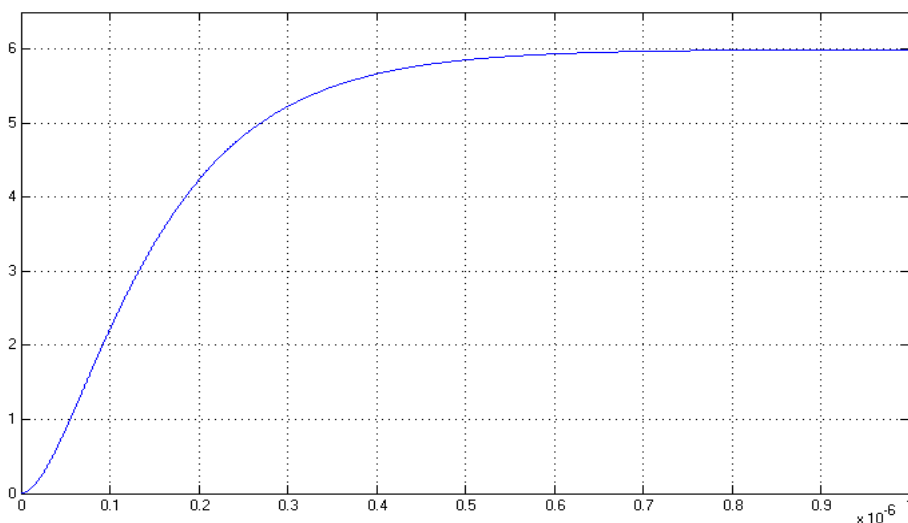


Рис. 4. Переходный процесс датчика

На основе моделирования по схеме 3 произведена оценка СКО, результаты которой для данного примера соответствуют минимальному значению: $\text{СКО} = 3,58 \cdot 10^{-6}$.

Выводы

В данной работе выявлены параметры МЭМС компенсационного ДУС, наиболее сильно влияющие на основную характеристику ДУС – крутизну статической характеристики, сформулированы требования к электромеханическим параметрам ДУС по критерию статической точности, разработана методика расчета статических и динамических характеристик ДУС для заданного диапазона измерений.

Одним из теоретических результатов в данной работе является доказательство возможности получения динамической характеристики микродатчика с аperiodическим переходным процессом с достаточно малым временем переходного процесса ($t_{\text{ПП}} = 3 \cdot T_0$, где постоянная времени T_0 теоретически может быть выбрана сколь угодно малой).

Практическим результатом является построение методики расчета датчика с учетом коэффициентов влияния конструктивных и электрических параметров на крутизну статической характеристики и на качество динамики. Методика позволяет в автоматическом режиме рассчитать ДУС практически на любой реальный диапазон измерения.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация параметров микромеханического акселерометра / В.Д. Вавилов, В.Л. Волков, А.В. Улюшкин // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2010. № 3 (82). С. 308–314.
2. **Волков, В.Л.** Обоснование требований к параметрам микромеханического акселерометра // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. № 2 (87). С. 288–295.
3. **Вавилов, В.Д.** Теоретические основы микросистемных акселерометров и гироскопов / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. – 210 с.
4. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы: учеб. пособие / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

5. **Вавилов, В.Д.** Компьютерное моделирование характеристик микросистемных датчиков / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2007. – 80 с.
6. **Шахнович, И.** МЭМС гироскопы – единство выбора. Электроника НТБ. 2007. № 1. С. 76–85.
7. **Вавилов, В.Д.** Оптимизация характеристик микроакселерометра со смещенной осью качания маятника // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2012. № 2 (95). С. 309–318.
8. **Дьяконов, В.П.** Simulink 5/6/7: самоучитель / В.П. Дьяконов. – М.: ДМК Пресс, 2008. – 784 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.04.2013*

V.L. Volkov, M.V. Chrisanova

VI. PROVISION STEADY-STATE AND DYNAMIC ACCURACY OF THE MICRO ELECTROMECHANIC SENSOR OF ANGULAR VELOCITY

Arzamas polytechnical institute (branch) Nizhny Novgorod state technical universiy
n.a. R.Y. Alexeev

Purpose: Making methods of calculation to accuracy micro electro mechanic sensor on base of analysis of influence constructive parameter on steepness of steady-state feature.

Design/methodology/approach: is Formed mathematical model of micro sensor of angular velocity (DUS) on base principle functioning the micro gyroscope LL-type. The Considered methods of calculation of main features DUS on base of programming in ambience Matlab. The Considered method of modeling DUS for reason statistical discovery factor of influence constructive parameter on steepness of steady-state feature.

Findings: is Presented results of model test DUS in the manner of tables factor to sensitivity parameter and graphics to connecting function. On graph is shown achievement it is enough small time of connecting process of sensor. Will Revealed dominant parameters, defining instability of steepness of steady-state feature of sensor. They Are Determined optimum parameters, corresponding to minimum dynamic mistake of sensor.

Research limitations/implications: Using the offered methods of calculation of features DUS gives the minimum fair square-law of mistake of sensor for given a range of measurement.

Originality/value: On base of considered methods of designing and studies DUS is worded requirements to electro mechanic parameter MEMS sensor on criterion steady-state and dynamic accuracy.

Key words: MEMS, sensor of angular velocity, steady-state feature, accuracy, sensitivity, average square of mistake, modeling.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 53.072

Г.В. Кондратьев

ВОЗМОЖНЫЕ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕОРИИ КАТЕГОРИЙ В ИНФОРМАЦИОННЫХ НАУКАХ

Университет Сан-Паулу, Бразилия

В статье дается краткий обзор теории категорий с возможными перспективами использования ее потенциала в сфере информационных технологий.

Ключевые слова: категория, множество, логика, моделирование.

Моментом рождения теории категорий считается появление статьи [1]. Главный создатель теории категорий Сандерс Маклейн вспоминал [2, 3], что они с Самюэлем Эйленбергом хотели выразить идею естественного преобразования, для чего необходимо было ввести функторы, которые в свою очередь потребовали введения категории. Категории оказались близкими к теории типов, введенной в конце XIX века Бертраном Расселом и упорно игнорируемой математической общественностью вследствие сложности ее понимания. Математики хотели что-нибудь попроще и использовали теорию множеств Георга Кантора, формализованную впоследствии, чтобы избежать парадоксов, в две аксиоматические системы Цермело-Френкеля и Геделя-Бернайса.

Теория множеств – универсальна, в ней только один тип ‘множество’ и одно отношение ‘принадлежности’. Большая часть математики может быть закодирована в теории множеств, но результаты получаются неподдающимися человеческому восприятию и мало способными стимулировать развитие науки. Теория категорий, напротив, оперирует типами, прямо отвечающими человеческой логике, такими как базовые объекты, произведения, суммы, функциональные типы, пустой и единичный типы, что соответствует предложениям, конъюнкции, дизъюнкции, импликации, лжи и истине. При этом типы в категориях не надуманы, а определены универсально, однозначно с точностью до изоморфизма, и универсальные конструкции соответствуют аксиомам конструктивной логики.

Следуя упомянутой выше последовательности С. Маклейна в обратном порядке, видно, что существуют отображения категорий, функторы, сохраняющие основные типы, и отображения между такими отображениями, естественные преобразования, и даже отображения еще более высокого порядка, модификации, в высших категориях, то есть все в теории категорий предназначено для глобального, многоуровневого, социального и гибкого описания объектов и связей между ними в специфическом когерентном стиле. При этом достижения внутреннего теоретико-множественного описания объектов не теряются, а интерпретируются по-новому, в новом качестве, с новыми связями, которые вряд ли можно усмотреть, оставаясь в рамках теории множеств.

Примеры использования теории категорий

В чистой математике теория категорий давно стала стандартным языком и средством развития теорий. Созданная изначально для нужд алгебраической топологии и гомологической алгебры [4, 5], она была перенесена Александром Гротендиком (оказавшим

огромное влияние на всю математику XX века и создавшим, в частности, теории топосов, расслоенных категорий, мотивов) в алгебраическую геометрию [6] и Уильямом Ловером в основания математики [7, 8, 9]. В работах Даниэля Квиллена были созданы модельные категории [10], выражающие высшие гомотопии на языке обычных категорий первого порядка и, более того, позволяющие вводить понятие гомотопии в некоторые категории, которым оно изначально не свойственно, например, в линейную логику. Параллельно развивались тензорные категории, операды и мультиоперады [11, 12, 13, 14], научившие, в частности, математиков работать со слабо ассоциативными алгебраическими системами с равенством с точностью до гомотопии и давшие техническую основу для развития теории слабых бесконечномерных категорий [14, 15, 16, 17].

Не вдаваясь глубоко в теорию, далее будут рассмотрены базовые примеры категорий, которые представляют интерес в прикладных науках. Именно приложимость теории на базовом уровне для интерпретации основных понятий определяет ее адекватность как рабочего средства. Вначале определим формально, чем являются теория типов и теория категорий.

Определение 1. Теория типов представляет базу всякой формальной системы. Простая теория типов состоит из:

- базовых типов (например, A, B, C, \dots),
- конструкторов новых типов (например, $\times, \oplus, \Rightarrow, \dots$),
- правил преобразования термов одного типа в другой (например, $x : X, f : X \rightarrow Y \vdash f(x) : Y$).

Типы могут быть обитаемы или необитаемы. $a : A$ читается, как ‘а обитает в/населяет A’. Примеры производных типов: $A \times B, X \oplus Y, X \Rightarrow Z$.

Если в теорию типов вводится логика, то добавляется унарный конструктор P (назначающий объекту его объект подобъектов), специальный тип Ω (истинностных значений) и правила формирования соответствующих термов, например, $(X : P(A)) : \Omega, \{x : A \mid \varphi(x) : \Omega\} : P(A)$ и другие.

Определение 2 (Язык теории категорий)

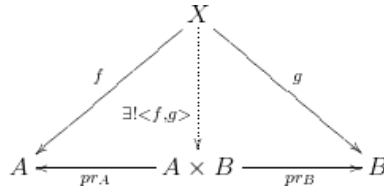
Синтаксическое определение.

- $C : Cat$,
- два типа $Ob(C), Ar(C)$,
- отношение равенства $=$ на объектах $Ob(C)$ и на стрелках $Ar(C)$,
- операции взятия начала и конца стрелки $f : Ar(C) \vdash df : Ob(C), cf : Ob(C)$,
- (композиция стрелок)
 $f, g : Ar(C), cf = dg : Ob(C) \vdash g \circ f : Ar(C), d(g \circ f) = df, c(g \circ f) = cg$,
- (аксиома единицы) $\forall C : Ob(C) \exists 1_C : Ar(C) \forall f : Ar(C)$
 $[(df = C) \Rightarrow (f \circ 1_C = f)] \& [(cf = C) \Rightarrow (1_C \circ f = f)]$,
- (ассоциативность) $\forall f, g, h : Ar(C) \quad (cf = dg, cg = dh) \Rightarrow (h \circ g) \circ f = h \circ (g \circ f)$.

Коммутативные диаграммы.

Для наглядности вместо синтаксического описания в теории категорий используются коммутативные диаграммы, то есть такие графы, составленные из объектов и стрелок между ними, что любые два пути между любыми двумя вершинами дают в композиции одну и ту же стрелку (следовательно, коммутативными диаграммами можно выражать равенство стрелок).

Например, произведение объектов $A \times B : Ob(C)$ для объектов $A, B : Ob(C)$ определяется (однозначно с точностью до изоморфизма) коммутативной диаграммой



которая говорит, что $\forall X : Ob(C) \forall f : X \rightarrow A, g : X \rightarrow B \exists! \langle f, g \rangle : X \rightarrow A \times B$, такая что $pr_A \circ \langle f, g \rangle = f, pr_B \circ \langle f, g \rangle = g$.

Пример 1 (Категория множеств). Стандартный математический универсум с классической логикой.

- Категория множеств состоит из множеств и отображений между ними. Это математический универсум, в котором или над которым строятся все стандартные конструкции.
- Существует (единственный) начальный объект $\mathbf{0} = \emptyset$ (пустое множество), то есть $\forall A : Ob(\text{Set}) \exists! \mathbf{0} \rightarrow A$.
- Существует (единственный с точностью до изоморфизма) конечный объект $\mathbf{1}$ (одноэлементное множество), то есть $\forall A : Ob(\text{Set}) \exists! A \rightarrow \mathbf{1}$.
- Существует объект истинностных значений $\Omega = \{0, 1\}$ (двухэлементная булева алгебра).
- Категории **Set** соответствует теория типов с классической логикой.
- Если (переменная) $x : A$, (предикат) $P(x) : \Omega$, то терм $\{x : A \mid P(x)\} : P(A)$ (содержание предиката P).
- (принцип свертывания) $y : A, P(y) = 1 \Leftrightarrow y : \{x : A \mid P(x)\}$.

Пример 2 (2-категория частично упорядоченных множеств POSet)

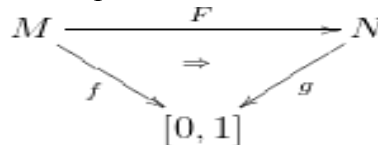
- (объекты) частично упорядоченные множества $(M, \leq_M) : Ob(\text{POSet})$,
- (1-стрелки) монотонные функции $(f : (M, \leq_M) \rightarrow (N, \leq_N)) : Ar_1(\text{POSet})$,
- (2-стрелки) $(M, \leq_M) \xrightarrow[\underset{g}{\Downarrow}]{\underset{f}{\Downarrow}} (N, \leq_N) : Ar_2(\text{POSet})$ если и только если $\forall m \in M f(m) \leq_N g(m)$,
- (горизонтальная композиция 1-стрелок) обычная композиция отображений,
- (вертикальная композиция 2-стрелок) определена транзитивностью отношения \leq ,
- горизонтальная композиция 2-стрелок)

$$(M, \leq_M) \xrightarrow[\underset{g}{\Downarrow}]{\underset{f}{\Downarrow}} (N, \leq_N) \xrightarrow[\underset{k}{\Downarrow}]{\underset{h}{\Downarrow}} (P, \leq_P) \quad (M, \leq_M) \xrightarrow[\underset{h \circ g}{\Downarrow}]{\underset{h \circ f}{\Downarrow}} (P, \leq_P) = \beta g \circ h \alpha = k \alpha \circ \beta f .$$

Утверждение 1. $\text{Set}^\circ \text{POSet}$ (полная подкатегория).

Пример 3 (Категория нечетких множеств FuzzySet([0,1])). Логически незамкнутый универсум с интуиционистской логикой.

- (объекты) нечеткие множества $(f : M \rightarrow [0, 1]) : Ob(\text{FuzzySet}([0, 1]))$, если $(f : M \rightarrow [0, 1]) : Ar(\text{Set})$ (**Set** рассматривается как подкатегория **POSet**),



- (стрелки) слабые коммутативные треугольники, то есть $\forall m \in M f(m) \leq (g \circ F)(m)$,
- (композиция стрелок) определяется соединением треугольников.

Утверждение 2. В категории **FuzzySet**([0,1]) с объектом истинностных значений отрезком [0,1]

- логика является интуиционистской (так как $[0,1]$ с естественным порядком является алгеброй Гейтинга и не является булевой алгеброй),
- не все формулы интуиционистской логики выполнимы в категории **FuzzySet**($[0,1]$) (так как фактор-множество нечеткого множества может не быть нечетким множеством, но оно всегда является гейтинговозначным множеством).

Следствие.

- В нечеткой логике нельзя применять закон исключенного третьего $p \vee \bar{p}$ (или, эквивалентно, закон двойного отрицания $p = \bar{\bar{p}}$).
- Требуется расширение категории нечетких множеств в категорию гейтинговозначных множеств.

Пример 4 (Гейтинговозначные множества). *Естественное расширение нечетких множеств.*

- Алгеброй Гейтинга называется решетка H , в которой существуют наименьший 0 и наибольший 1 элементы, и операция пересечения $- \wedge b$ имеет правую сопряженную операцию $b \Rightarrow -$, то есть $\forall b, c \in H \exists (b \Rightarrow c) \in H$, такой что $\forall x \in H \ x \leq (b \Rightarrow c)$ если и только если $x \wedge b \leq c$.
- Пусть H – алгебра Гейтинга. Множество X вместе с функцией $=_x : X \times X \rightarrow H$, такой что $(a =_x b) = (b =_x a)$ и $(a =_x b) \wedge (b =_x c) \leq (a =_x c)$, называется гейтинговозначным множеством.
- Категория гейтинговозначных множеств **Set**(H) является топосом (аналогом конструктивной теории множеств).
- Категория **FuzzySet**(H) является полной подкатегорией категории **Set**(H).
- В категории нечетких множеств **FuzzySet**(H) не все коуровнители (фактор-объекты) существуют, то есть не все конструктивные логические утверждения имеют смысл. Присоединение фактор-объектов приводит к категории гейтинговозначных множеств **Set**(H).
- Естественным универсумом нечеткой математики с конструктивной логикой является категория **Set**(H).

Связи теории категорий с вычислительными и информационными науками

Несмотря на потенциальную мощь теории категорий, ее стандартными приложениями к компьютерным наукам остаются в основном функциональное программирование [18], теория типов [19] и, вообще, прикладная логика [19, 20]. Основной причиной этого является то, что указанные дисциплины почти один к одному моделируются декартово-замкнутыми категориями в силу так называемого изоморфизма Карри-Говарда-Ламбека [21, 22]. В наиболее распространенной формулировке изоморфизм устанавливает полную идентичность теории доказательств, лямбда-исчисления, являющегося универсальной моделью вычислений, и декартово-замкнутых категорий. Коротко он выражается так: доказательства = вычислениям, формулы = типам. Методы одной из этих теорий переносятся в другие (например, доказательство является лямбда-выражением, устранение сечения (Gentzen's Hauptsatz) является бета-редукцией, программа в функциональном языке типа Haskell является доказательством). Это приводит к взаимному обогащению теорий.

Пример 5 (логическая формула интуиционистски истинна, если и только если ее тип населен).

- $0 \Rightarrow A$ соответствует одной стрелке из пустого типа в тип A ,
- $A \Rightarrow 1$ соответствует одной стрелке в синглетон (одноэлементный тип),
- аксиоме $A \wedge B \Rightarrow A$ соответствует проекция на первый множитель $p_A : A \times B \rightarrow A$,

- если $a: A, f: A \Rightarrow B$, то $f(x): B$, следовательно, $A, A \Rightarrow B \vdash B$ (modus ponens).

Указанное соответствие означает, что изолированные процессы вычислений, рассуждений или конструкций все сводятся к одному и тому же классу функций (расширенный тезис Черча).

Для неизоллированных взаимодействующих вычислительных процессов ситуация оказывается не столь однозначной. Модели конкуренции составляют другое приложение теории категорий в компьютерных науках [23]. Они основаны на временной логике, бисимуляции, теории пучков, но такой идеал соответствия, как изоморфизм Карри-Говарда-Ламбека, там отсутствует.

Одним из первых приложений теории категорий к инженерным наукам явилась теория систем управления в духе Калмана-Арбиба-Мэйнса [24, 25].

Пример 6 (Дискретные системы управления над категорией множеств Set).

- (объекты – системы управления) Система управления (над категорией множеств **Set**) – это три множества $\{U, X, Y\}$ и две **Set**-стрелки $f: X \times U \rightarrow X$ и $h: X \rightarrow Y$,
- (стрелки – динаморфизмы) Динаморфизм (симуляция) – это тройка отображений $(\alpha: U \rightarrow U', \beta: X \rightarrow X', \gamma: Y \rightarrow Y')$, сохраняющих структуру системы, то есть таких, что диаграммы коммутативны

$$\begin{array}{ccc}
 X \times U & \xrightarrow{f} & X \\
 \beta \times \alpha \downarrow & & \downarrow \beta \\
 X' \times U' & \xrightarrow{f'} & X'
 \end{array}
 \qquad
 \begin{array}{ccc}
 X & \xrightarrow{h} & Y \\
 \beta \downarrow & & \downarrow \gamma \\
 X' & \xrightarrow{h'} & Y'
 \end{array}$$

Стрелки переводят траектории первой системы $f: X \times U \rightarrow X$ в траектории второй $f': X' \times U' \rightarrow X'$.

В категории гладких систем управления с базовой категорией гладких многообразий **Diff** системами управления соответственно будут пары, состоящие из коммутативного треугольника

$$\begin{array}{ccc}
 X \times U & \xrightarrow{f} & TX \\
 & \searrow p_1 & \swarrow p \\
 & & X
 \end{array}
 ,$$

то есть **Diff** – отображения тривиального расслоения в касательное, и стрелки-наблюдателя $h: X \rightarrow Y$, а морфизмами – наборы из трех стрелок, сохраняющие структуру системы.

В работе [25] приводится категорный вариант теоремы о минимальной реализации системы управления.

Теория баз данных (представляющих собой набор разноуровневых таблиц и отношений) хорошо вписывается в теорию категорий [26].

Систематические приложения теории категорий собственно к информационным наукам в настоящее время почти отсутствуют. В качестве первых попыток в этом направлении можно отметить работы П. В. Голубцова [27, 28] по категориям преобразователей информации и близкую к ним работу [29] по формализации и категорной аксиоматизации теории информации Клода Шеннона.

Малое количество работ в этой области объясняется с точки зрения автора тем, что существующая в настоящее время теория информации во всех ее аспектах (синтаксическом, семантическом, прагматическом) представляет лишь часть единой теории этой фундаментальной величины. Информация занимает какое-то промежуточное и нетривиальное положение между морфологией и логикой системы. Скорее всего, она гейтингово- или булево-значна, поскольку можно брать объединение, пересечение и дополнение имеющейся информации. Это вполне согласуется с теорией информации К. Шеннона, в которой основным сравнением между количеством информации является отношение порядка \leq на неотрицательных вещественных числах R^+ . Измерением в

расширенном понимании будет гомоморфизм информационной алгебры в решетку R^+ . Скорее всего, информация, также как и структуры на объектах и логика, обитает в расслоенной категории над базовыми объектами и зависит как от базового объекта, так и выбранной структуры и логики.

Возможные точки приложения теории категорий к информационным наукам.

Таковыми приложениями могут быть:

- разработка фундаментальных понятий теории информации в более широком, иерархическом и гибком контексте расслоенных категорий, пучков, топосов и высших категорий, в частности, для выражения многомерных аспектов информационных процессов, плохо объясняемых линейным языком, как, например, отношение между процессами,
- применение операд и тензорных категорий в теории нейросетей для управления всевозможными конфигурациями, композицией и отношением между нейросетями,
- использование категорных понятий для короткого и точного выражения сути явлений без переизбыточности (например, достаточно сказать, что гомоморфизм свободных моноидов, представляющий код, допускает однозначное декодирование, если и только если его образ есть свободный моноид),
- применение к вопросу однозначного (с точностью до изоморфизма) моносемантического представления знания, важного в теории искусственного интеллекта.

Могут быть и другие неожиданные применения, так как новый многомерный, иерархический язык позволяет видеть и выражать незамечаемые прежде связи и отношения.

Библиографический список

1. **Eilenberg, S.**, MacLane S. A general theory of natural equivalences. Trans. Amer. Math. Soc., 58: 231-294 (1945).
2. **Maclane, S.** Categories for the working mathematician. Springer-Verlag (1971).
3. **Maclane, S. A.** Mathematical Autobiography. A K Peters, Ltd., Wellesley, Massachusetts (2005).
4. **Eilenberg, S.**, Steenrod N. Foundations of Algebraic Topology. Princeton University Press (1952).
5. **Maclane, S.** Homology. Springer-Verlag (1963).
6. **Grothendieck, A.**, Dieudonné J.: Éléments de Géométrie Algébrique. Publications Mathématiques, Paris (1960).
7. **Lowvere, F. W.** Diagonal Arguments and Cartesian Closed Categories, Springer Lecture Notes in Mathematics No. **92**, Springer-Verlag (1969).
8. **Lowvere, F. W.** Quantifiers and Sheaves. Proceedings of the International Congress on Mathematics, (Nice 1970), Gauthier-Villars (1971).
9. **Lowvere, F. W.** Continuously Variable Sets: Algebraic Geometry = Geometric Logic, Proceedings of the Logic Colloquium, Bristol (1973), North Holland (1975).
10. **Quillen, D. G.** Homotopical algebra. Lecture Notes in Mathematics, **43**, Berlin, New York: Springer-Verlag (1967).
11. **Boardman, J. M.**, Vogt R. M. Homotopy invariant algebraic structures on topological spaces. Lecture Notes in Mathematics, **347**, Berlin, New York: Springer-Verlag (1973).
12. **May, J. P.** The Geometry of Iterated Loop Spaces. Springer-Verlag (1972).
13. **Markl, M.**, Shnider S., Stasheff J.: Operads in Algebra, Topology and Physics. American Mathematical Society (2002).
14. **Leinster, T.** Higher Operads, Higher Categories. Cambridge University Press (2004).
15. **Baez, J. C.**, Shulman M. Lectures on n-Categories and Cohomology. arXiv:math/0608420 (2007).
16. Joyal A. Quasi-categories and Kan complexes. Journal of Pure and Applied Algebra **175** (1): 207—222 (2002).
17. **Lurie, J.** Higher topos theory. Annals of Mathematics Studies, **170**, Princeton University Press (2009).

18. **Thompson, S.** Haskell: The Craft of Functional Programming. Harlow, England: Addison-Wesley Longman Ltd. (1996).
19. **Crole, R.** Categories for Types. Cambridge University Press (1994).
20. **Jacobs, B.** Categorical Logic and Type Theory. Elsevier (1999).
21. **Girard, J.-Y.,** Lafont Y., Taylor P. Proof and Types. Cambridge University Press (Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science, 7) (1987).
22. **Johnstone, P.** Sketches of an Elephant: A Topos Theory Compendium. I, II, Oxford University Press (2002).
23. **Winkel, G.,** M. Nielsen: Models for concurrency. In Handbook of Logic in Computer Science. Oxford University Press (1995).
24. **Kalman, R. E.,** Falb P. E., Arbib M. A. Topics in Mathematical System Theory. New York: McGraw-Hill (1969).
25. **Arbib, M. A.,** Manes E. G. Arrows, Structures, and Functors: the Categorical Imperative. Academic Press (1975).
26. **Плоткин, Б.И.** Универсальная алгебра, алгебраическая логика и базы данных / Б.И. Плоткин. – М.: Наука, Физматлит, 1991.
27. **Голубцов, П.В.** Аксиоматическое описание категорий преобразователей информации. Проблемы передачи информации, 1999. **35** №3. С. 109–127 ().
28. **Голубцов, П.В.** Информативность в категории многозначных преобразователей информации. Проблемы передачи информации, 1998. **34** №3. С. 60–80.
29. **Allen, B.** The Category-Theoretic Arithmetic of Information. arXiv/math.CT:0803.3608v3 (2011).

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2013*

G.V. Kondratiev

POSSIBLE APPLICATIONS OF THE CATEGORY THEORY IN INFORMATION SCIENCES

University of San Paulo, Brazil

The subject of the paper is a brief overview of the well-known applications of the Category Theory in order to spread its ideas and methods to the field of Information Sciences. For that it has all necessary abstraction, generality, a rich hierarchical structure, specific computing methods. The categories are considered from the logical viewpoint as a type theory corresponding to the base Intuitionistic Logic.

Such a parallel definitely grounds this highly abstract science and makes it more attractive and accessible to the applied researchers. Some examples and potential application points of the Category Theory in the Information Sciences are given.

Key words: category, logic, set, modeling.

УДК 513.015.2

В.М. Галкин, М.Е. Елисеев

КВАЗИГРУППЫ И КООРДИНАТИЗАЦИЯ ПРОЕКТИВНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье предлагается введение координат на проективной плоскости с помощью квазигрупп. Дается определение полной системы ортогональных квазигрупп. Такая система позволяет строить проективную плоскость и эта связь обратима. Описывается координатизация двойственной плоскости и обсуждается принцип двойственности.

Ключевые слова: тернар, теорема Дезарга, полная система ортогональных квазигрупп, принцип двойственности.

Интерес к исследованию проективных плоскостей в свое время был вызван установлением Д. Гильбертом ([1]) того факта, что планиметрическая теорема Дезарга (о ней будет сказано далее) не может быть доказана построениями в плоскости, не использующей ее метрических свойств. Интригующим обстоятельством является справедливость теоремы Дезарга в евклидовых (и аффинных) пространствах размерности большей двух, то есть недезарговыми могут быть только плоскости. Прогресса в изучении недезарговых плоскостей пришлось ждать около трех десятилетий – до 30-х годов XX века. Причиной сложившейся ситуации, как это теперь представляется, были два обстоятельства. Первое из них – это неэффективность использования синтетических методов. Альтернативой к синтетическим методам являются координатные. Но, как оказалось, для их введения понадобились объекты нетрадиционных типов. И действительно, в 1935 году Руфь Муфанг ввела класс неассоциативных объектов, называемых в настоящее время лупами Муфанг. Это позволило ей открыть класс недезарговых плоскостей – плоскостей Муфанг. В 30–60 гг. была достаточно хорошо разработана теория квазигрупп [6], частными случаями которых являются лупы Муфанг. Это позволило ввести удовлетворительный аналог системы координат на проективной плоскости. В традиционном изложении теории проективных плоскостей [3,4] исходным объектом служит так называемый тернар. С точки зрения авторов это довольно тяжеловесно определяемый объект. Кроме того, он почти (или совсем) не встречается нигде, кроме приложений к проективным плоскостям. По этой причине в этой статье предлагается использовать (вместо тернаров) для координатизации проективных плоскостей более простые и вместе с тем широко употребляемые объекты, а именно квазигруппы. В общности при этом ничего не теряется, но некоторые вопросы становятся более естественными, а другие – например, описание двойственной плоскости – допускают красивые решения.

Изложение материала в статье производится следующим образом. В разделах 1 и 2 приводятся необходимые определения и основные факты о проективных плоскостях и квазигруппах. Более полную относящуюся сюда информацию можно найти [3, 4]. В разделе 3 вводится основной объект – полная система ортогональных квазигрупп (ПСК) и показывается, что каждую проективную плоскость можно координатизировать с помощью ПСК. В разделе 4 описывается двойственная плоскость и обсуждается, так называемый принцип двойственности.

1. Проективные плоскости и теорема Дезарга

Проективная плоскость это множество элементов двух типов. Элементы одного из них называются точками, а другого – прямыми. Прямые и точки связываются отношением, которое в педантичных изложениях называется «инцидентностью». Этот термин далее будем

заменять на более привычные – «принадлежать», «проходить через» и т. д. Следующие три аксиомы это все, что требуется для определения проективной плоскости.

P1. Через две точки проходит одна и только одна прямая.

P2. Две прямые пересекаются в единственной точке.

P3. Существует 4 точки, никакие три из которых не лежат на одной прямой.

Первая аксиома не требует пояснений. Вторая означает, что в отличие от евклидовой плоскости в проективной не существует «параллельных» прямых. Наконец, третья аксиома обеспечивает существование достаточного количества точек и прямых на плоскости.

Простейший и наиболее важный пример проективной плоскости доставляет следующая конструкция. Берется аналог обычной плоскости, в котором точки задаются парой координат (x, y) , принадлежащих заданному полю F . Прямые состоят из точек, координаты которых связаны линейными уравнениями. Эта, так называемая аффинная плоскость дополняется несобственной («бесконечно удаленной» прямой) L_∞ .

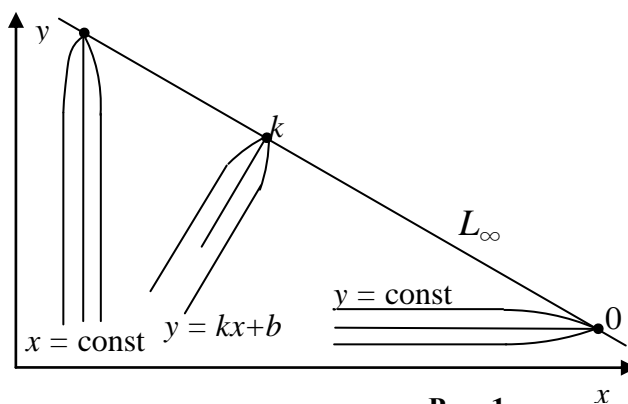


Рис. 1

Точками ее являются элементы из F и символ ∞ . Прямая аффинной плоскости дополняется точкой из L : для прямых $x = \text{const}$ это ∞ , а для прямых $y = kx + b$ это k . В приложениях, например, в алгебраической геометрии, используются однородные координаты. Точка проективной плоскости задается тройкой $x = (x_1, x_2, x_3)$ координат. Тройка $(0,0,0)$ исключается из рассмотрения и считается, что тройки $x = (x_1, x_2, x_3)$ и $\lambda x = (\lambda x_1, \lambda x_2, \lambda x_3)$ с $\lambda \neq 0$ определяют одну и ту же точку. Прямая $p = (p_1, p_2, p_3)$ также задается однородными координатами и состоит из точек, координаты которых удовлетворяют уравнению $p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 = 0$. Неоднородные координаты связаны с однородными следующим образом: точке $x = (x_1, x_2, x_3)$ с $x_3 \neq 0$ соответствует точка $(x_1 / x_3, x_2 / x_3)$ аффинной плоскости. При $x_3 = 0$ мы выходим на несобственную прямую и при $x_2 \neq 0$ получаем точку $k = x_1 / x_2$ на ней. Наконец, точке $(x_1, 0, 0)$ соответствует точка ∞ на L_∞ .

В приведенной конструкции поле F можно заменить на произвольное тело, например, на тело кватернионов. Необходимо только соблюдать осторожность в вычислениях, связанную с некоммутативностью умножения. Так, если мы сохраняем уравнение прямой в виде $p_1 x_1 + p_2 x_2 + p_3 x_3 = 0$, то координаты точек допускают множитель λ справа, а координаты прямой – слева.

В проективной плоскости может выполняться или нет утверждение, известное под названием теоремы Дезарга (см. рис. 2).

Если точки пересечения P, Q, R соответствующих сторон треугольников ABC и

$A_1B_1C_1$ лежат на прямой L , то прямые AA_1, BB_1, CC_1 , соединяющие соответствующие вершины треугольников, пересекаются в одной точке S . Очевидным образом формулируется и обратная теорема, которая также может выполняться, а может и не выполняться в проективной плоскости

Фундаментальное значение теоремы Дезарга состоит в том, что она выполняется тогда и только тогда, когда проективная плоскость может быть построена приведенной выше конструкцией, исходя из произвольного тела F . Есть и геометрический критерий того, чтобы F было полем: в плоскости должна выполняться так называемая теорема Паппа.

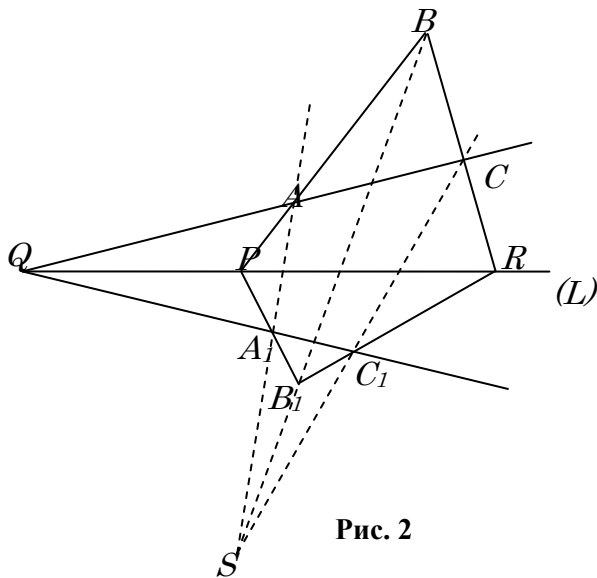


Рис. 2

Истинной причиной сравнительно простой структуры дезарговских плоскостей (то есть плоскостей, в которых выполняется теорема Дезарга) является наличие достаточно большого количества коллинеаций (автоморфизмов) в таких плоскостях. По определению коллинеация – это биекция плоскости в себя, переводящая прямые в прямые и сохраняющая отношение инцидентности. Так линейные невырожденные преобразования однородных координат точек дезарговой плоскости приводят к коллинеациям. Более точно, в случае поля F , коллинеации отождествляются с элементами факторгруппы $SL_3(F)$ по ее центру, состоящему из скалярных матриц. Здесь мы встречаемся с

известной в математике ситуацией: чем более «симметричен» объект, тем проще он устроен. В недезарговских плоскостях коллинеаций значительно меньше, чем и объясняется трудность построения соответствующих примеров.

2. Латинские квадраты и квазигруппы

Квазигруппа – это множество, в котором можно «умножать» и «делить». Более точно, множество $G(\cdot)$ с бинарной операцией (\cdot) называется квазигруппой, если уравнения $ax = b$ и $xa = b$ однозначно разрешимы. Часто квазигруппы снабжаются дополнительной структурой, требующей выполнения в квазигруппе тех или иных тождеств. Наиболее известное из них – тождество ассоциативности $(xy)z = x(yz)$ (здесь $xu \equiv xu$), превращающей квазигруппу в группу. Укажем еще некоторые употребительные тождества:

- 1) $(xy)(zt) = (xz)(yt)$ (медиальность);
- 2) $x(y(xz)) = ((xy)x)z$ и равносильное ему $((zx)y)x = z(x(yz))$ (тождества Муфанг);
- 3) $(x(yx))z = x(y(xz))$ и $z((xy)x) = ((zx)y)x$ (левое и правое тождества Бола);
- 4) $x(yz) = (xy)(xz)$ и $(xy)z = (xz)(yz)$ (левая и правая дистрибутивности).

Как известно, в группе существует элемент e такой, что $ex = xe$. Квазигруппа с таким свойством называется лупой. Если квазигруппа конечна, то внутренность ее таблицы Кэли есть латинский квадрат. На рис. 3 изображена таблица Кэли абелевой группы Z_3 и соответствующий латинский квадрат.

По определению в каждой строке (столбце) латинского квадрата элементы различны. Из каждого латинского квадрата можно получить конечную квазигруппу, добавив к нему строку и столбец с обозначениями элементов. По этой причине далее латинские квадраты специально не рассматриваются.

	0	1	2
0	0	1	2
1	1	2	0
2	2	0	1

0	1	2
1	2	0
2	0	1

Рис. 3

Такие алгебраические понятия как гомоморфизм, изоморфизм, автоморфизм очевидным образом переносятся и на квазигруппы. Однако в теории квазигрупп они занимают подчиненное положение, а на первый план выдвигается понятие изотопии. Две квазигруппы $G(\bullet)$ и $G(*)$ изотопны, если $x * y = C^{-1}(Ax \bullet By)$, где A, B, C - подстановки множества G . При совпадении $(*)$ и (\bullet) говорят, что квазигруппы автотопны.

3. Полные системы ортогональных квазигрупп и координатизация проективных плоскостей

Пусть G -множество с выделенным элементом e , на котором определены квазигруппы $G(\cdot)$, перенумерованные элементами $k \in G \setminus \{e\}$. Система таких квазигрупп называется полной ортогональной системой, если выполнены условия:

A1. (ортогональность). Система уравнений $x_k y = a, x_m y = b$ однозначно разрешима;

A2. (полнота). Для $x_1 \neq x_2, y_1 \neq y_2$ найдется единственное значение k такое, что $x_{1k} y_1 = x_{2k} y_2$.

Рабочим примером является система, построенная на поле F , в которой $x_k y = y - kx (k \neq 0)$. Кстати можно проверить, что эти квазигруппы медиальны.

Теорема. Каждой полной системе ортогональных квазигрупп соответствует некоторая проективная плоскость. Обратно, каждой проективной плоскости соответствует некоторая полная система.

Доказательство. Мы повторим конструкцию, изложенную в разделе 1. Точками аффинной плоскости объявляются пары (x, y) элементов из G . Прямые на ней разделены на три типа: $L_a = \{(a, y)\}$, $L_{e,b} = \{(x, b)\}$ и $L_{k,b} = \{(x, y) | x_k y\}$ для $k \neq e$. Остается пополнить аффинную плоскость несобственной прямой L_∞ . Ее точками служат символ ∞ и элементы G . Прямые из пучков типов $L_a, L_{e,b}$ и $L_{k,b}$ имеют с L_∞ , соответственно, общие точки ∞, e, k . Проверка аксиом P1 и P2 проективной плоскости представляет сложность лишь в случаях пересечения прямых $L_{k,b}$ и $L_{l,c}$ и проведения прямой через точки $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ для $x_1 \neq x_2, y_1 \neq y_2$. Единственность точки пересечения указанных прямых есть следствие ортогональности, а единственность прямой $L_{k,b}$, проходящей через указанную пару точек, следует из аксиомы полноты. При этом $b = x_1 y_1 = x_2 y_2$. Что же касается аксиомы P3, то стоит заметить, что число квазигрупп в системе более одной, $|G| \geq 2$ и существуют по крайней мере две прямые. Число точек на каждой не менее трех и выбор четырех нужных точек возможен.

Теперь отправимся от заданной проективной плоскости P и выберем одну из прямых плоскости в качестве несобственной L_∞ . На ней выделим две точки, обозначив их через ∞ и e . Множество G определяется как множество точек $L_\infty \setminus \{\infty\}$ и тем самым осуществлена

координатизация на L_∞ . Для координатизации точек «аффинной» плоскости $P \setminus L_\infty$ выберем еще одну прямую L (рис. 4, а).

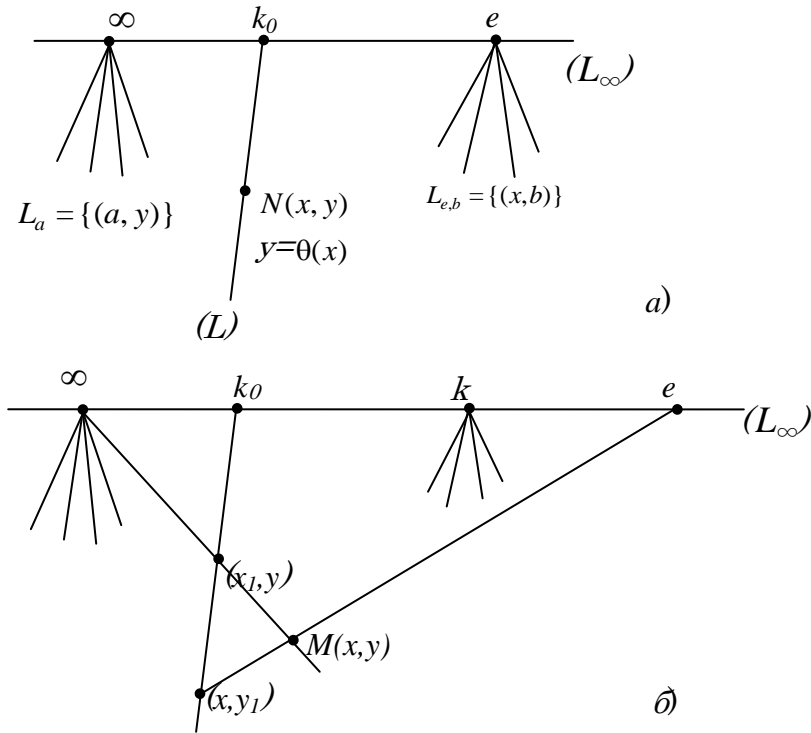


Рис. 4

Как известно, множества точек на различных прямых проективной плоскости равномощны. То же верно и для пучков прямых, проходящих через различные точки. Поэтому, первые координаты точек на $L \setminus \{k_0\}$ можно взять из G . Координату y в $N(x, y)$ полагаем равной $y = \theta(x)$, где θ - любая биекция G в себя. Прямые пучков, проходящих через ∞ и e (за вычетом L_∞) нумеруются элементами из G . Это индексы a в L_a и b в $L_{e,b}$. Координаты точек на них понятны из рисунка.

На рис. 4, б видно как определяются координаты точки M , не лежащей на L . Наконец, при фиксированной нумерации прямых, проходящих через точку $k \neq \infty, e$, полагаем $x \cdot_k y = b$ для точек прямой $L_{k,b}$, где b - «номер» прямой в пучке.

Остается проверить, что таким образом получается полная система ортогональных квазигрупп. Прежде всего, задание одной из координат точки M , лежащей на прямой $L_{k,b}$ вполне определяет точку M и, значит, другую координату. Следовательно операция \cdot_k квазигрупповая. Далее, прямые $L_{l,a}$ и $L_{k,b}$ пересекаются в единственной точке, что влечет выполнение аксиомы A1. Наконец, для точек $(x_1, y_1), (x_2, y_2)$ с $x_1 \neq x_2, y_1 \neq y_2$, прямая, их соединяющая, не совпадает ни с прямой L_a , ни с прямой $L_{e,b}$. Поэтому, она пересекает L_∞ в единственной точке $k \neq e, \infty$ и $x_1 \cdot_k y_1 = x_2 \cdot_k y_2$, то есть верна и аксиома A2.

Надо отметить, что в построении системы квазигрупп имеется большой произвол. Это выбор L_∞, L , биекции $\theta: G \rightarrow G$, а также произвол в нумерации прямых пучков. Это приводит ко многим системам квазигрупп, связанных с данной плоскостью. Ясно, что

различные системы связаны между собой, но как - остается открытым вопросом. Мы рассмотрим частный случай такой связи в следующем разделе.

В заключение этого раздела сделаем несколько замечаний об аксиоматике полных систем ортогональных квазигрупп и конечных проективных плоскостей.

Теорема. Пусть $\{G(\circ), k \in G \setminus e\}$ - множество квазигрупп из полной системы ортогональных квазигрупп. Тогда не существует квазигруппы $G(*)$, ортогональной к квазигруппе из указанного множества.

Доказательство. Предположим противное и пусть $G(*)$ - контрпример. Возьмем две точки (x_1, y_1) и (x_2, y_2) соответствующей плоскости такие, что $x_1 * y_1 = x_2 * y_2 (= a)$. Для этого достаточно задаться a и $x_1 \neq x_2$, после чего y_1 и y_2 однозначно определены. Через эти точки проведем прямую $L_{k,b}$. Тогда $x_1 \circ_k y_1 = x_2 \circ_k y_2 (= b)$ и $x_1 * y_1 = x_2 * y_2 (= b)$ показывает, что система $x \circ_k y = b, x * y = a$ имеет два решения. Противоречит с предположением об ортогональности.

Доказанная теорема оправдывает термин «полнота» использованный в аксиоме A2.

В случае конечной плоскости порядка q число точек на прямой равно $q+1$ и $|G|=q$. Система квазигрупп, соответствующая плоскости, насчитывает $q-1$ ортогональных квазигрупп. Доказанная теорема приводит к известному результату о латинских квадратах.

Следствие. Система ортогональных латинских квадратов порядка q содержит не более $q-1$ квадратов.

Последнее утверждение позволяет в конечном случае дать иное определение полной системы ортогональных квазигрупп (или латинских квадратов). Справедливо следующее утверждение.

Теорема. Система ортогональных квазигрупп полна тогда и только тогда, если она содержит $q-1$ квазигрупп.

Доказательство носит комбинаторный характер. Мы начинаем с построения плоскости, объявив прямыми множества точек $L_a, L_{k,b}$ и L_∞ , как это проделывалось при координатизации проективной плоскости. Ортогональность обеспечивает одноточечность пересечения пары прямых. На каждой прямой содержится $q+1$ точек, а всего точек $q^2 + q + 1$: из них q^2 точек вида (x, y) и $q+1$ точек на L_∞ . Через точку (x_1, y_1) проходит прямая L_x и q прямых вида $L_{k,b}$. Следовательно, в объединении этих прямых содержится $q(q+1)+1$ точек. Но столько точек имеется всего. Поэтому существует прямая, проходящая, помимо (x_1, y_1) , и через отличную от (x_1, y_1) точку (x_2, y_2) . Она единственна и аксиома полноты выполнена.

4. Автотопии, коллинеации и координатизация двойственной плоскости

Как уже отмечалось, различные полные системы ортогональных квазигрупп могут определять одну и ту же плоскость. Здесь мы рассмотрим связь между двумя системами $\{G_k^*\}$ и $\{G_k\}$, координатирующими одну и ту же плоскость при дополнительном ограничении. Именно, пусть прямая L_∞ координатируется однотипно с помощью обеих систем и точки ∞ и e выбраны для систем одни и те же. Связь между квазигрупповыми операциями оказывается достаточно простой и описывается следующим образом.

Теорема. Квазигрупповые операции обеих систем связаны соотношением $x_k^* y = C^{-1} \left(Ax \bullet_k By \right)$, где A, B, C - биекции G в себя, причем A и B не зависят от k .

Доказательство. Индекс k в обеих частях равенства один и тот же, так как он

соответствует точке $k \in L_\infty$. Точки вне L_∞ имеют координаты (x, y) по отношению к операции \bullet и (x', y') - для $*$. Поскольку точки на прямой, проходящей через ∞ имеют одну и ту же первую координату, то x' зависит только от x : $x' = Ax$ при некоторой биекции A . точно также, рассматривая прямые, проходящие через $e \in L_\infty$, заключаем, что $y' = By$ при биекции B . Теперь мы можем заключить, что точка (x, y) с $x \bullet y = b$, лежащие на $L_{k,b}$ переходят в точку $(x', y') = (Ax, By)^k$ и $Ax * By = b'$ и $b' = C^{-1}(b)$ с биекцией $C = C(k)$.

Обращая рассуждения, легко показать, что системы квазигрупп связанные соотношением из теоремы определяют одну и ту же плоскость или, точнее, изоморфные плоскости.

Отметим два частных случая. Пусть A и B – тождественные биекции, Выбирая C так, чтобы $e \bullet y = C(y)$, получим $e *_k y = y$. Систему квазигрупп с таким свойством будем называть нормализованной.

В другом случае пусть $*$ и \bullet совпадают, т.е. мы имеем автотопию $x *_k y = C^{-1}(Ax \bullet By)$.

Легко проверить, что отображение $(x, y) \rightarrow (x', y') = (Ax, By)$, оставляющее точки L_∞ на месте, есть коллинеация. Коллинеации такого типа образуют группу. Для дезарговой плоскости такие коллинеации имеют простой геометрический смысл. Это параллельные переносы $(x, y) \rightarrow (x + a, y + b)$ на $P \setminus L_\infty$.

Плоскость P' называется двойственной по отношению к плоскости P , если можно установить соответствие, при котором точки P переходят в прямые P' , а прямые из P - в точки P' . Более точно, P' двойственна к P , если существует пара $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ биекций $\alpha_1: P_p \rightarrow P_{l'}$, $\alpha_2: P_{l'} \rightarrow P_p$, сохраняющих отношение инцидентности, то есть если точка p лежит на прямой l в P , то точка $\alpha_2(l)$ лежит на прямой $\alpha_1(p)$ в P' . Через P_p и $P_{l'}$ обозначены множества точек и прямых в P и аналогичные обозначения использованы для P'

Пара биекций $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2)$ называется корреляцией. Отношение двойственности симметрично, так как пара $\alpha' = (\alpha_2, \alpha_1)$ устанавливает двойственность P по отношению к P' .

Предложение. Для заданной плоскости P существует с точностью до изоморфизма двойственная к ней плоскость P' .

Существование устанавливается следующим образом: точками в P' объявляются прямые из P , а прямыми – точки из P . Инцидентность в P' наследуется из таковой в P . Далее, если P' и P'' - плоскости, двойственные к P соответствующие корреляциям α и β , то, как нетрудно видеть $\alpha\beta^{-1} = (\alpha_1\beta_2^{-1}, \alpha_2\beta_1^{-1})$ есть коллинеация из P'' в P' , то есть P' и P'' изоморфны.

Пусть P построена по полной системе ортогональных квазигрупп $\{G_k(\circ), k \in G \setminus e\}$.

Предполагаем, что квазигрупповые операции нормализованы, то есть $e \circ_k y = y$. Новую систему квазигрупп вводим равенствами

$$x *_k y = b \Leftrightarrow k \circ_x b = y \text{ для } x \neq e, k \neq l \text{ и } e *_k y = y \text{ для } k \neq e.$$

Предложение. Система $\{G_k(*), k \in G \setminus e\}$ есть полная система ортогональных квазигрупп.

Доказательство. Прежде всего надо проверить, что введенные операции квазигрупповые, то есть уравнения $a *_k x = b$ и $x *_k a = b$ однозначно разрешимы относительно

x . Для первого уравнения $x = a$ при $a = e$ и $k \circ b$ при $a \neq e$. Для второго уравнения и $a \neq b$ x отличен от e и, значит, $k \overset{x}{*} b = a$ по аксиоме полноты X однозначно определяется. Если же $a = b$, то $x = e$. Остается проверить выполнение аксиом ортогональности и полноты.

Если в системе $\begin{matrix} x \overset{*}{*} y = a \\ x \overset{k}{*} y = b \end{matrix}$ значение x отлично от e , то есть она переписывается так

$$\begin{matrix} k \circ a = y \\ e \circ b = y \end{matrix}$$

В частности, тогда $a \neq b$. Аксиома полноты для системы $\{G(\circ)_k\}$ влечет единственность X и $y = k \circ a$. Если $a = b$, то обязательно $x = e$ и $y = a = b$ и вновь решение единственно. Поэтому ортогональность для $\{G(\overset{*}{*})_k\}$ имеет место.

Пусть теперь $x_1 \neq x_2, y_1 \neq y_2$ и $x_1 \overset{*}{*}_k y_1 = x_2 \overset{*}{*}_k y_2 (= b)$. Если $x_1, x_2 \neq e$, то последнее соотношение эквивалентно равенству $k \overset{x_1}{\circ} b = y_1, k \overset{x_2}{\circ} b = y_2$. Ортогональность в системе $\{G(\circ)_k\}$ влечет единственность k , то есть в $\{G(\overset{*}{*})_k\}$ выполняется и полнота.

Пусть теперь P и P' - плоскости, построенные на системах квазигрупп $\{G(\circ)_k\}$ и $\{G(\overset{*}{*})_k\}$ как это описано выше. Тогда справедливо следующее утверждение.

Предложение. Плоскости P и P' двойственны друг другу.

Доказательство. Введем обозначения для точек и прямых плоскостей.

P : точки - $(\infty), (k), (x, y)$ прямые $L_\infty, L_a, L_{k,b}$;

P' : точки - $[\infty], [k], [x, y]$ прямые $\mathfrak{L}_\infty, \mathfrak{L}_a, \mathfrak{L}_{k,b}$.

Корреляция P в P' устанавливается следующим образом. Точки P - $(\infty), (k), (x, y)$ переходят в прямые $\mathfrak{L}_\infty, \mathfrak{L}_a, \mathfrak{L}_{k,b}$, а прямые $L_\infty, L_a, L_{k,b}$ - в точки $[\infty], [k], [x, y]$. Проверка того, что отношение инцидентности при этом наследуется наименее тривиально лишь в случаях $(x, y) \rightarrow \mathfrak{L}_{x,y}$ и $L_{k,b} \rightarrow [k,b]$. Оба они разбираются однотипно и мы ограничимся первым из них. Точка (x, y) лежит на прямых $L_x, L_{e,y}$ и $L_{k,b}$ ($x \circ y = b, k \neq l$). В P' образами этих прямых служат точки $[x], [e, y], [k, b]$, которые должны лежать на прямой $\mathfrak{L}_{x,y}$. Это действительно так ввиду связи между операциями \circ и $*$ и требования $e \overset{x}{\circ} y = y$ при $x \neq e$.

В заключение обсудим некоторые утверждения, касающиеся, так называемого, принципа двойственности. Симметрия аксиоматики проективной плоскости относительно замены точка \leftrightarrow прямая позволяет каждому утверждению A формулируемому в терминах точек и прямых, сопоставить «двойственное» утверждение A' . Последнее получается из A , указанной выше заменой.

Следующее замечание очевидно: если A выполняется в плоскости P , то A' выполняется в двойственной к P плоскости P' .

В ряде книг ([4], [5]) утверждается, что выполняется «принцип двойственности»: если в P верно утверждение A , то верно в P и двойственное утверждение A' .

Нетрудно видеть, что принцип двойственности, выполняется, если P' изоморфна P . Однако этого нельзя утверждать в противном случае. Изоморфизм $P \cong P'$ имеет место для

классической плоскости над полем F описанной в п.1. В самом деле, нужный изоморфизм устанавливается соответствием $P = (P_1, P_2, P_3) \leftrightarrow x = (x_1, x_2, x_3)$. Далее F можно заменить на тело кватернионов Q . Изоморфизм P с P' получается использованием $p \rightarrow \bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \bar{x}_3)$, где $u \rightarrow \bar{u}$ есть инволютивный антиавтоморфизм сопряжения в Q . Для него $\overline{uv} = \bar{u}\bar{v}$. Авторам неизвестно, существует ли такой антиавтоморфизм в произвольном теле и имеется ли изоморфизм P с P' в этом случае. Контрпримеры к принципу двойственности доставляют, так называемые, плоскости Холла ([2], [3]). Так имеются две действительные друг к другу плоскости Холла порядка 9. группа коллениаций одной из них действует на точках с орбитами длин 10 и 81, а на прямых – с длинами 1 и 90.

Таким образом, действие группы коллениаций на точках и прямых ассиметрично и принцип двойственности не имеет места.

Библиографический список

1. Гильберт, Д. Основания геометрии / Д. Гильберт. – Петроград, 1923.
2. Hughes, D. Piper F. Projective planes. Springer Verlag, 1973.
3. Холл, М. Теория групп / М. Холл. – М.: Изд. ин. лит., 1962.
4. Четверухин, Н.Ф. Высшая геометрия / Н.Ф. Четверухин. – М., 1939.
5. Глаголев, Н.А. Проективная геометрия / Н.А. Глаголев. – М.: Высшая школа, 1967
6. Белоусов, В.Д. Основы теории квазигрупп и луп / В.Д. Белоусов. – М.: Наука, 1967.

Дата поступления
в редакцию 16.04.2013

V.M. Galkin, M.E. Elyseev

THE QUASIGROUPS AND THE COORDINATIZATION OF THE PROJECTIVE PLANES

In this paper a new approach to the projective planes is suggested. This approach use the concept of the complete system of the orthogonal quasigroups. The coordinatization of the dual plane is described. So called «duality principe» is discussed.

Key words: ternar, Desargues theorem, complete system of the orthogonal quasigroups, duality principe.

УДК 656.11

М. Е. Елисеев¹, А. В. Липенков¹, М. Е. Сангалова²**О РЕШЕНИИ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ПРИ ВЫЧИСЛЕНИИ МАТРИЦЫ ПАССАЖИРСКИХ КОРРЕСПОНДЕНЦИЙ.**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Арзамасский филиал Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского²

В статье сравниваются различные методики получения достоверной информации о пассажиропотоках. Рассматривается обратная задача – восстановление матрицы корреспонденций по информации о вошедших и вышедших на остановках. Приводится описание компьютерных программ, реализующих эту методику.

Ключевые слова: пассажиропоток, матрица корреспонденций, пассажирские перевозки, автобусные перевозки.

1. Анализ методик подсчета пассажиропотоков

При моделировании движения пассажирского транспорта [1, 3], а также для решения многих практических задач требуется знать матрицу пассажирских корреспонденций, то есть матрицу строки и столбцы которой – остановки, элементы – количество пассажиров едущих с одной остановки на другую. В действительности это не одна матрица, а несколько «слоев» матрицы – каждый «слой» соответствует определенному временному интервалу. При проведении обследований и последующем моделировании выяснилось, что наиболее удобно выделять временные интервалы длиной 2 часа: более мелкое деление вызывает сложности с отнесением корреспонденции к определенному интервалу, большая длина временных промежутков делает информацию неточной.

Казалось бы, оптимально провести такое обследование (использовать технологию), которое позволяет получить непосредственно матрицу корреспонденций, в действительности это не совсем так. Матрицу пассажирских корреспонденций можно получить при обследовании талонным методом: каждый пассажир, входя в автобус, получает талон, на котором указана соответствующая остановка. При выходе талон отдается кондуктору или специально выделенному для подсчета работнику (счетчику), который помещает его в отделение, помеченное названием остановки выхода. Затем талоны систематизируются и производится подсчет корреспонденций. Недостатки такого метода очевидны: большая трудоемкость (и соответственно стоимость) при проведении, высокие требования к счетчикам – в противном случае погрешность очень велика, трудоемкая обработка результатов.

Другой вариант непосредственного получения матрицы корреспонденций – использование электронных проездных документов (билетов и абонементов). Этот вариант лишен недостатков талонного метода, но его отличает высокая начальная стоимость внедрения (оборудование + программное обеспечение) и дополнительные задержки транспортных средств на остановках с большим пассажирообменом. Зато корреспонденции вычисляются многократно и поэтому точность метода высока.

Третий вариант – табличный метод, при котором обследователи-счетчики едут в автобусе (трамвае, троллейбусе) и считают входящих-выходящих пассажиров (ВВП) на каждой остановке. Он менее трудоемок, чем талонный метод и требования к обследователям не столь высоки – проводить обследование гораздо проще, легче и обрабатывать результаты [2]. Таким образом, при средней квалификации счетчиков (например, обученные студенты) имеет большую точность.

Четвертый метод – установка специальных устройств фиксирующих входящих-выходящих пассажиров. Результат подобен получаемому при табличном методе, но значительно дешевле и на практике оказывается точнее. Экономия происходит и при

проведении обследования (час работы аппаратуры дешевле часа работы счетчика) и при обработке информации – данные автоматически заносятся в базу при помощи соответствующих программ. Кроме того, обследование каждого маршрута (и графика на маршруте) происходит многократно, что повышает точность. К недостаткам надо отнести погрешность оборудования – от 5 до 15%, в зависимости от типа устройств. Основным аргументом в пользу этого метода является его дешевизна – по сравнению со вторым (наиболее близким) методом: разница в десятки раз (ориентировочно в 20-40 раз дешевле). Такая большая разница получается из-за того, что нет необходимости оборудовать датчиками все транспортные средства, достаточно нескольких экземпляров, которые последовательно обследуют все маршруты.

2. Формулировка обратной задачи

Серьезным ограничением использования третьего и четвертого методов является то, что при обследовании получается не матрица корреспонденций, а лишь информация о ВВП (входящих-выходящих пассажиров). Восстановление матрицы корреспонденций относится, к так называемым, обратным задачам: нетрудно подсчитать ВВП на каждой остановке, зная матрицу корреспонденций, гораздо сложнее наоборот, зная число ВВП получить матрицу корреспонденций.

Прежде всего, заметим, что решение прямой задачи однозначно – достаточно сложить элементы в строках и столбцах. Рассмотрим простой пример для 4 остановок и «прямого» направления.

	Ост.1	Ост.2	Ост.3	Ост.4	Вошли
Ост.1		3	2	4	9
Ост.2			1	3	4
Ост.3				1	1
Ост.4					
Вышли		3	3	8	

Решение обратной задачи неоднозначно. В примере 2 приводится еще одна матрица корреспонденций с таким же числом ВВП.

	Ост.1	Ост.2	Ост.3	Ост.4	Вошли
Ост.1		3	1	5	9
Ост.2			2	2	4
Ост.3				1	1
Ост.4					
Вышли		3	3	8	

Таким образом, решение обратной задачи разбивается на две подзадачи:

1) нахождение какого-либо решения;

2) нахождение решения наиболее точно воспроизводящего матрицу корреспонденций.

В данной работе будет рассмотрен алгоритм для нахождения некоторого решения, удовлетворяющего ряду критериев. Для решения задачи 2 необходимо проведение экспериментов: обследований автобусных (троллейбусных, трамвайных) маршрутов талонным методом.

3. Решение частного случая обратной задачи

Итак, пусть даны матрицы-строки ВВП, требуется восстановить матрицу корреспонденций. Заметим, что наиболее простое решение следующее: «высаживать» пассажиров вошедших первыми. Так сначала выходят пассажиры, севшие на первой

остановке, затем севшие на второй и так далее. В программировании этот подход называется очередь. Ниже показано восстановление матрицы корреспонденций, в соответствии с этим принципом, для разобранным ранее примера.

	Ост.1	Ост.2	Ост.3	Ост.4	Вошли
Ост.1		3	3	3	9
Ост.2			0	4	4
Ост.3				1	1
Ост.4					
Вышли		3	3	8	

Недостаток данного решения очевиден: при таком решении длина поездки минимизируется, в то время как она является неизвестной величиной. Более реалистичным является следующий подход: среди находящихся в настоящий момент в автобусе (так для краткости будем далее называть транспортное средство) пассажиров, каждый имеет определенную вероятность выйти на ближайшей остановке. В простейшем случае эти вероятности можно считать равными, пока нет дополнительной информации, которую может дать только обследование.

Приведем строгое решения для случая 4 остановок, которое несложно распространить на общий случай.

	Вошли		Вышли
1	x_1	2	y_2
2	x_2	3	y_3
3	x_3	4	y_4

Сразу заметим, что вошедшие на $(n-1)$ остановке выходят на последней, а вышедшие на 2-й ехали с первой.

Матрица корр. примет (промежуточный) вид:

	1	2	3	4
1		y_2		
2				
3				x_3
4				

Вошедшие и вышедшие преобразуются так:

	В авт.		Надо выйти
1	$x_1 - y_2$	2	0
2	x_2	3	y_3
3	0	4	$y_4 - x_3$

На остановке 3 выходят равновероятно как едущие с ост. 1, так и с остановки 2 (более общо – с предыдущих остановок).

Пусть $[\sim \frac{x}{y}]$ ($x < y$) – случайное число из отрезка $[0, \frac{x}{y}]$, тогда едущих с первой

остановки вышло – целая часть числа $[\sim \frac{x_1 y_2}{x_1 y_2 + x_2} y_3]$ (не более $x_1 - y_2$), обозначим ее a_{13} .

Едущих со второй вышло $y_3 - a_{13}$.

Матрица корр. примет (промежуточный) вид:

	1	2	3	4
1		y_2	a_{13}	
2			$y_3 - a_{13}$	
3				x_3
4				

Вошедшие-вышедшие преобразуются так:

	В авт.		Надо выйти
1	$x_1 - y_2 - a_{13}$	2	0
2	$x_2 - y_3 + a_{13}$	3	0
3	0	4	$y_4 - x_3$

Оставшиеся в автобусе выходят на последней остановке.

Матрица корреспонденций примет (окончательный) вид:

	1	2	3	4
1		y_2	a_{13}	$x_1 - y_2 - a_{13}$
2			$y_3 - a_{13}$	$x_2 - y_3 + a_{13}$
3				x_3
4				

Нетрудно убедиться в правильности решения вычислив сумму элементов в строках и столбцах.

4. Вычисление полной матрицы корреспонденций

План реализации этой задачи следующий:

- 1) подсчитываются ВВП по всем маршрутам;
- 2) по каждому маршруту восстанавливается матрица корреспонденций в соответствии с пунктом 3;
- 3) полученные матрицы сохраняются в формате excel и группируются по маршрутам и временным интервалам;
- 4) формируем «большую» матрицу строками и столбцами которой являются определенным образом упорядоченные остановки и «суммируем» файлы маршрутов по каждому из временных интервалов.

Получаем 9 матриц корреспонденций: $A_{5-7}, A_{7-9}, \dots, A_{21-23}$, где нижние индексы соответствуют временным интервалам.

Разрабатывается программный пакет реализующий указанный алгоритм и табличный метод обследования пассажиропотоков. Он состоит (пока) из двух программ:

- 1) программа для занесения данных с листов обследования в excel-файлы (из пункта 3);
- 2) программа для формирования матриц корреспонденций $A_{5-7}, A_{7-9}, \dots, A_{21-23}$.

На рис. 1 и 2 приводятся листинги бета-версий программ.

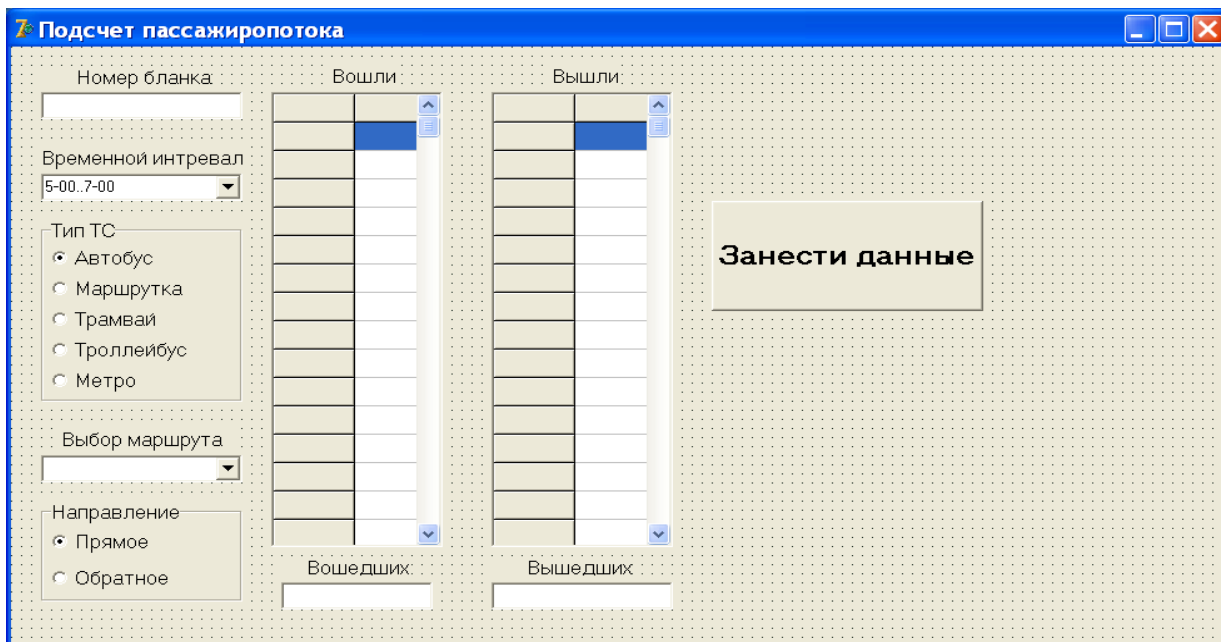


Рис. 1

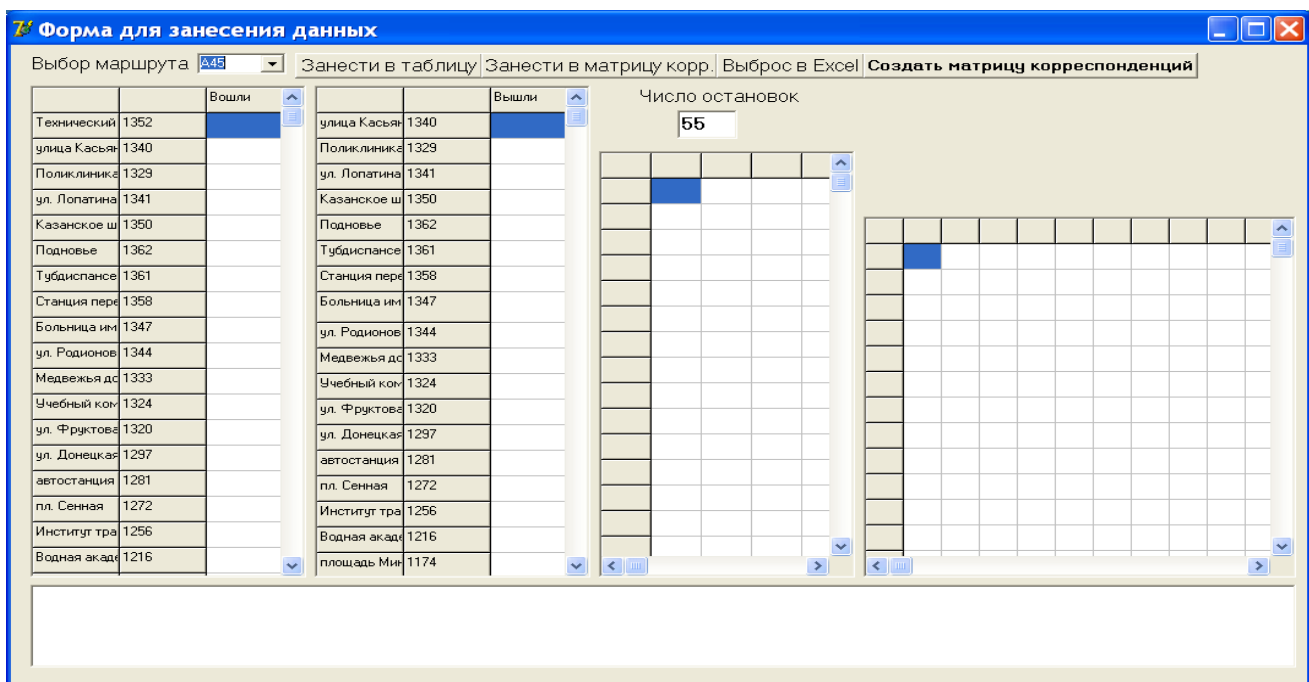


Рис. 2

В дальнейшем программный пакет планируется дополнить функциями (программами) обработки данных о ВПП при подсчете с использованием датчиков и отметок навигаторов, оптимизировать программу для получения excel-файлов в формате требуемом для имитационной модели, созданной в среде AnyLogic [1].

5. Границы применимости методики

Экспериментальные данные [2] и виртуальный эксперимент на модели автобусного маршрута [1] позволяют сделать предварительный вывод о достаточно высокой точности рассмотренного в работе метода. Для получения количественных данных о точности необходимо проведение сравнительных экспериментов.

Разработанная методика имеет, по мнению авторов, большую практическую ценность, так как позволяет получить информацию о матрице корреспонденций значительно дешевле (в разы и десятки раз в зависимости от метода) чем другие методики.

Библиографический список

1. **Елисеев, М. Е.** О модели городского пассажирского транспорта: моделирование логики пассажира // М. Е. Елисеев, А.В. Липенков, Е.М. Елисеев // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород. 2011. № 3. С. 347–352.
2. **Елисеев, М. Е.** О проведении обследований городских автобусных маршрутов с целью их последующего моделирования / М.Е. Елисеев, А.В. Липенков, О.А. Маслова // Автотранспортное предприятие. – М., 2012. №1.
3. **Липенков, А.В.** О разработке имитационной модели городских пассажирских перевозок в Нижнем Новгороде / А.В. Липенков, Н.А. Кузьмин, О.А. Маслова // Актуальные вопросы инновационного развития транспортного комплекса: мат. международной научно-практической конференции. – Орел, 2011. Т. 2. С. 50-54.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2013*

M.E. Eliseev, A.V. Lipenkov, M.E. Sangalova

ON THE SOLUTION OF INVERSE PROBLEMS IN THE CALCULATION OF MATRIX OF THE PASSENGER CORRESPONDENCE

In this paper different methods for the obtaining of reliable information about the passenger traffic are compared. The inverse problem - the reconstruction of the correspondence matrix – is considered. The description of some computer programs is given.

Key words: passenger, a matrix of correspondence, passenger transport, bus transport.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Афонин Игорь Леонидович – СевНТУ
(Украина), д-р техн. наук, проф. каф. СиБС,
тел. (0692) 24 14 24

Бугаев Павел Александрович – СевНТУ
(Украина), ст. препод. каф. Судовождения и
безопасности судоходства, тел. (0692) 24 14 24

Носкович Виктор Иванович – СевНТУ
(Украина), ст. препод. каф. Судовождения и
безопасности судоходства, тел. (0692) 24 14 24

Шишков Глеб Иванович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, проф., канд. техн. наук,
доц., тел. 8(312) 436-82-33.

Щитов Аркадий Максимович – НИПИ
«Кварц», нач. отд., д-р техн. наук, тел. (8312)
466-20- 25

Малышев Григорий Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант,
e-mail: physics@nntu.nnov.ru

Раевский Алексей Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук., проф.,
e-mail: raevsky@nntu.nnov.ru

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМ

Костенко Ирина Сергеевна – Учреждение
РАН СКБ САМИ ДВО РАН, младш. науч. сотр.,
аспирант, тел. 8 (4242) 73-62-94

Зайцев Андрей Иванович - Учреждение РАН
СКБ САМИ ДВО РАН, зав. лаб., канд. физ.-
мат. наук, 8 (4242) 73-62-94

Ялчинер Ахмед - Технический университет
центральной Азии, Анкара, Турция, проф.,
yalciner@metu.edu.tr

Рыбин Артем Викторович - НГТУ им.Р.Е.
Алексеева, студент, 8 (831) 436-63-93

Яркин Станислав Константинович - НГТУ
им.Р.Е.Алексеева, студент, 8(831) 436-63-93,

Мазова Раиса Хаимовна - НГТУ им.
Р.Е. Алексеева, д-р физ.-мат. наук, наук,
доц., e-mail: raissamazova@yandex.ru

Колчина Елена Александровна - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева,
e-mail: kolchinaelena@yandex.ru

Кисельман Бронислав Арнольдович –
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн.
наук, e-mail: bkiselman@mail.ru

Осипенко Наталья Николаевна - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева,
e-mail: nn.osipenko@mail.ru

Катаева Лилия Юрьевна – НГТУ им.Р.Е.
Алексеева, проф., д-р физ.-мат. наук, доц.,
e-mail: kataeval@rambler.ru

Кольчик Ирина Викторовна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р пед. наук, доц.,
тел. 8 (831) 436-63-93

Тарнаева Светлана Анатольевна – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, ст. препод.,
тел. 8 (831) 436-63-93

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Бритвина Екатерина Васильевна – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, аспирант,
e-mail: ek.britvina@gmail.com

Крылов Владимир Владимирович – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, д-р техн. наук, проф.
e-mail: Vladimir.v.krylov@gmail.com

Мальков Юрий Андреевич – ИПФ РАН,
м.н.с. e-mail: ymalkov@merrallabs.com

Соколова Элеонора Станиславовна - НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, д-р техн. наук, проф.,
e-mail: essokolova@mail.ru

Ляхманов Дмитрий Александрович – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, ассистент,
e-mail: cscs@nntu.nnov.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Агапов Михаил Михайлович – Главное
управление автомобильных дорог,
e-mail: agapov@guad. nnov.ru

Панов Алексей Юрьевич – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, д-р техн. наук, проф.,
директор ИПТМ, тел. 8 (831) 436 80 85

Иванов Анатолий Андреевич – НГТУ
им.Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф.,
тел. 8(831) 436 73 54

Манцеров Сергей Александрович - НГТУ
им.Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел.
8(831)436 83 55

Шканов Игорь Николаевич – НГТУ

им.Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8 (831) 43603 01

Дмитриев Александр Иванович – ОАО «Бумснаб», гендиректор, тел. 8(831) 225 66 81

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Большухин М.А. – ОКБМ «Африкантов», нач. отд., канд. техн. наук, доц., e-mail: okbm@nnov.ru

Будников А.В. – ОКБМ «Африкантов», канд. техн. наук, e-mail: okbm@nnov.ru

Фомичев В.И. – ОКБМ «Африкантов», нач. отд., e-mail: okbm@nnov.ru

Свешников Д.Н. – ОКБМ «Африкантов», нач. бюро, e-mail: okbm@nnov.ru

Романов Р.И. – ОКБМ «Африкантов», инженер, e-mail: okbm@nnov.ru

Иксанова Г.Ш. – ОКБМ «Африкантов», нач. бюро, e-mail: iksanova.nntu@mail.ru

Бородин С.С. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, зам. директора ИЯЭиТФ, канд. техн. наук, доц., e-mail: borodin@mail.ru

Варенцов А.В. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: vav88@mail.ru

Доронков Д.В. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, аспирант, e-mail: nevid000@mail.ru

Пронин А.Н. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, магистрант, e-mail: proninaleksei@mail.ru

Дмитриев С.М. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, ректор, зав. кафедры АТСиМИ, д-р техн. наук, проф., e-mail: dmitriev@nntu.nnov.ru

Соборнов А.Е. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, инженер, e-mail: wisestjedi@mail.ru

Рязанов Р.Р. – НГТУ им Р.Е. Алексеева, инженер, e-mail: ryzanov.renat@gmail.com

Котин А.В. – младш. науч. сотрудник, каф. АТС и МТ, e-mail: an.kotin@yandex.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Худяков Владимир Николаевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел., 8 (831) 436-43-83

Тютнев Илья Анатольевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, тел. 8 (831) 436-43-83

Шапкин Виктор Александрович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., тел. 8 (831) 436-43-83

Кошелев Юрий Владимирович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, тел. 8 (831) 436-01-59, (831) 436-63-64,

Молев Юрий Игоревич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф.,

тел. 8 (831) 436-01-59, 8 (831) 436-63-64

Соколов Денис Анатольевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант, тел., 8 (831) 436-01-59, (831) 436-63-64,

Макаров Владимир Сергеевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд.техн. наук, доц. каф. АиТ, e-mail: makv@gmail.com

Беляков Владимир Викторович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, нач. УНИиИР, д-р техн. наук, проф., тел. 8(831) 436 56 72

Зезюлин Денис Владимирович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, ст. препод. каф. АиТ

Беляев Александр Михайлович – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант

Папунин Алексей Валерьевич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Сутырин Валерий Игоревич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., e-mail: Vsutyurin@mail.ru

Короткая Елена Ивановна – БГАРФ, доц., e-mail: Ekkat82@gmail.com

Вешуткин Владимир Дмитриевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831)436 01 78

Кулепов Виктор Федорович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, проф., 8 (831)34 47 30

Двойченко Ю. А. – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., тел. 8(831) 436 78 96

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Герман Леонид Абрамович – МГУПС (Нижегород. ф.), д-р техн. наук, проф., тел.

Серебряков Александр Сергеевич – МГУПС (Нижегород. ф.), д-р техн. наук, проф., e-mail; A.Sereb@mail.ru

Дулепов Дмитрий Евгеньевич – НГИЭИ, аспирант, e-mail: Smirnov@tecomgroup.ru

Чивеенков Александр Иванович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, зав.каф. ПЭ, канд. техн. наук, e-mail: chuyvenkov@mail.ru

Севастьянов Валерий Владимирович - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент, e-mail: valeri.sevast@mail.ru

Асабин Александр Анатольевич - ИПФ РАН, инженер-электроник, e-mail: asanatoly@yandex.ru

Верховский Сергей Яковлевич - НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доц., e-mail: severskh@gmail.ru

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Изотов Владимир Анатольевич – РГАТУ
им. П.А. Соловьева, д-р техн.наук, доцент,
e-mail: iva_111k@mail.ru

Родионова Наталья Александровна –
РГАТУ им. П.А. Соловьева, аспирант,
e-mail: zinkevi4-rodionova@mail.ru

Панфилов Алексей Александрович – ВГУ
им. А.Г. и Н.Г. Столетовых, декан, канд.техн.
наук, доц., 8(4922) 47 98 21

Прусов Евгений Сергеевич - ВГУ им. А.Г. и
Н.Г. Столетовых, канд.техн.наук, доц.,
8(4922) 47 98 21

Кечин Владимир Андреевич - ВГУ им. А.Г. и
Н.Г. Столетовых, зав. каф. ЛПиКМ, д-р техн.
наук, проф., 8(4922) 47 98 21

**ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ
И МЕНЕДЖМЕНТ**

Трифонов Ю.В. – ННГУ
им. Н.И. Лобачевского

Яшин Сергей Николаевич - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р эконом. наук, проф.,
тел. 8(831) 436 73 74

Кошелев Е.В. - ННГУ им. Н.И. Лобачевского
Морозова Галина Алексеевна – РАНХиГС,
д-р эконом.наук, проф.,тел. 8(831) 412 41 64
Зайцев Александр Николаевич - НГТУ им.
Р.Е. Алексеева, декан ФЭМИ, д-р техн. наук,
проф., тел.

Зайцев Дмитрий Александрович -

Борисов С.А. - ООО «Иннов»,

Мансуров Ренат Шарифович - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. эконом. наук, доц.,
e-mail: renat-m1@mail.ru

Лещенко Елена Сергеевна - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. препод.,
e-mail: leshenkoalena@bk.ru

**СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ
В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ**

Коровина Евгения Владимировна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. ист. наук,
доц., e-mail: kpt@nntu.nnov.ru

Андреев Евгений Андреевич – РГТЭУ
(Волгоград. ф), аспирант,
e-mail: andrevan777@yandex.ru

Прохорова Марина Вячеславовна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. соц. наук, e-mail:
Prochus83@rambler.ru

Кудрявцев Михаил Сергеевич – НГИПТиД,
канд. ист. наук, доц., e-mail:
kudr1972@yandex.ru

**МАКРОМИКРОМЕХАНИЧЕСКИЕ
СИСТЕМЫ**

Вавилов Влалимир Дмитриевич – АПИ
(филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева, д-р техн.
наук. проф., тел. 8-83147-44052

Волков Валерий Леонидович – АПИ
(филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева, канд. техн.
наук доц., e-mail: vvl_arzamas@mail.ru

Хрисанова Марина Васильевна – АПИ
(филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева,
магистрант, тел. 8-83147-44052.

**МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ
В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ
И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ**

Кондратьев Геннадий Вячеславович -
Университет Сан-Паулу, Бразилия, науч.
сотрудник, д-р физ.-мат. наук,
e-mail: gennadii.kondratiev@gmail.com

Галкин Владимир Михайлович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. каф ВМ, д-р мат. наук,
тел.

8(831) 257 86 91

Елисеев Михаил Евгеньевич – НГТУ
им. Р.Е.Алексеева, канд. физ.-мат. наук, доц.,
e-mail: vm@nntu.nnov.ru

Сангалова Марина Евгеньевна –
Арзамасский филиал ННГУ
им. Н.И. Лобачевского, канд. пед. наук, доц.
e-mail: smolyanka77@mail.ru

Липенков Александр Владимирович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. препод.,
тел. 8(831) 436 43 83

**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 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, подрисуночная 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.

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

№ 2 (99)

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**
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 06.06.2013. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 45,75. Уч.-изд. л. 41,0. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 44757
«Объединенный каталог Пресса России. Газеты и журналы»