

Труды

ISSN 1816-210X

Нижний Новгород (2010)

№ 2 (81)

Нижегородского
государственного
технического
университета
им. Р.Е. Алексеева

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

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

№ 2 (81)

Нижний Новгород 2010

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, 2010. № 2 (81). – 358 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор В.П. Кириенко

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

А.Б. Лоскутов (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
В.В. Беляков (отв. секретарь), О.В. Пугина (отв. редактор),
Т.В. Третьякова (технич. секретарь), Т.П. Новикова (технич. редактор),
М.В. Ширяев (редактор электронного издания)

Члены редколлегии: О.М. Власова, В.Л. Башкатов, В.Г. Баранов,
В.П. Хранилов, А.А. Куркин, А.Ю. Панов, С.М. Дмитриев, В.К. Майстренко,
А.М. Грошев, С.Н. Хрунков, С.В. Хватов, И.О. Леушин, М.Г. Михаленко,
А.Н. Зайцев, Е.А. Зайцева, Е.А. Чернышов, О.С. Кошелев, В.В. Глебов,
В.Ф. Кулепов, Е.Н. Соснина

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

© Нижегородский государственный
технический университет
им. Р.Е. Алексеева, 2010

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

**STATE EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEKSEEV**

TRANSACTIONS
of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL
UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEKSEEV

№2 (81)

Nizhny Novgorod 2010

**Transactions of NIZHNY NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y.
Alekshev / NSTU n.a. R.Y. Alekshev. - Nizhni Novgorod, 2010. № 2 (81). – 358 p.**

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief V.P. Kiriyenko

EDITORIAL BOARD:

A.B. Loskutov (Deputy Editor-in-Chief), Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief),
V.V. Belyakov (Executive Secretary), O.V. Pugina (Executive Editor),
T.V. Tretyakova (Technical secretary), T.P. Novikova (Technical Editor),
M.V. Shiryaev (Editor of Electronic Edition)

Members of Editorial Board: O.M. Vlasova, V.L. Bashkatov, V.G. Baranov,
V.P. Khranilov, A.A. Kurkin, A.Y. Panov, S.M. Dmitriev, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhalenko,
A.N. Zaytsev, Y.A. Zaytseva, Y.A. Chernyshov, O.S. Koshelev, V.V. Glebov,
V.F. Kulepov, Y.N. Sosnina

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Фролова О.А., Мишин А.Ю. Комплексный радиоинерциальный измеритель параметров маловысотного полета над водной поверхностью.....	11
Грушин П.И., Логинов В.И., Ямпурин Н.П. Сравнительная характеристика алгоритмов расчета комбинационных составляющих на основе рядов Фурье.....	21
Новоселова Н.А., Раевский С.Б., Титаренко А.А. Расчет характеристик распространения симметричных волн круглого волновода с радиально-неоднородным диэлектрическим заполнением.....	30
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	39
Абрашкин А.А., Громов Е.М., Тютин В.В. Спектр идеальной турбулентности.....	39
Катаева Л.Ю., Белоцерковская И.Е. Численное и аналитическое решение математической модели низового пожара с учетом влияния угла наклона подстилающей поверхности.....	44
Хвостова О.Е., Авербух Е.Л., Куркин А.А. Исследование сценариев цунами несейсмического происхождения на французском побережье Средиземного моря.....	49
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	57
Исаев Ю.К., Кляпнев Д.А. Алгоритм сбоезащиты при цифровой обработке информации инерциальных датчиков.....	57
Утробин В.А. Элементы теории активного восприятия изображений.....	61
Милов В.Р., Баранов В.Г., Эпштейн А.Ю., Шалашов И.В. Прогнозирование состояния дискретных стохастических систем в условиях неопределенности на основе байесовской методологии.....	70
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	77
Конищев Б.П., Родионов А.А., Митин А.С. Оценка трещиностойкости труб магистральных газопроводов.....	77
Кузнецов С.В. Влияние зазоров и положения привода кривошипно-шатунного механизма механического пресса на величину нагрузок в элементах привода.....	87
Кузнецов С.В. Исследование поперечных сил при выполнении технологических операций обработки металлов давлением.....	92
Симагина Е.В., Агабеков Ю.В. Повышение работоспособности режущего инструмента с наноструктурными покрытиями.....	98
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	104
Раевский А.С., Раевский С.Б., Усков О.В. Спектр волн круглого открытого слоистого диэлектрического волновода.....	104
Денисенко А.А., Назаров А.В., Попов Е.А. Быстрые волны круглого волновода с двумя секториальными диэлектрическими вставками.....	118
Мионов А.В., Андреев В.В. Прогнозирование условий циклического нагружения металлов интеллектуальной информационной системой.....	125

Боровков М.Н., Белов С.Е., Новинский Э.Г. Разработка страховочных подшипников вертикальной турбомашин установки ГТ-МГР.....	134
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	143
Молев Ю.И., Прошин Д.Н. Определение максимально-допустимой разницы в величинах коэффициентов сцепления колёс передней и задней осей автомобиля с дорогой, обеспечивающих устойчивость автомобиля при торможении.....	143
Орлов Л.Н., Грошев А.М., Тумасов А.В. Расчетная оценка пассивной безопасности несущих систем автотранспортных средств с внесенными в их конструкцию изменениями.....	149
Кузьмин Н.А., Зеленцов В.В., Донато И.О. Исследование отложений в автомобильных двигателях.....	156
Палутин Ю.И. Критерии гидродинамического подобия при оценке вентиляционных систем автомобилей.....	166
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	171
Сутырин В.И. Методология конечно-элементного анализа судовых корпусных конструкций при их проектировании.....	171
Захаров Л.А., Захаров И.Л., Хрунков С.Н. Моделирование смесеобразования и горения в рабочей камере поршневого двигателя внутреннего сгорания.....	178
Петров М.П., Лубенко В.Н., Пичугин Д.А. Задача внешнего проектирования флота, обслуживающего углеводородные месторождения Северного Каспия.....	187
Кузнецов Ю.П. Согласование параметров пневматического двигателя с гидравлическими характеристиками воздухоподводящего рукава при проектировании ручных пневматических машин.....	193
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	202
Вагин Г.Я., Севостьянов А.А., Юртаев С.Н. Электромагнитная совместимость дуговых печей и систем электроснабжения.....	202
Кириенко В.П., Ваняев В.В., Копелович Е.А. Особенности режимов работы конденсаторов в преобразователях электрофизических установок.....	211
Назарычев А.Н., Животягина С.Н., Жулина Т.А. Оценка расхода ресурса электрооборудования с учетом режимов его работы и условий окружающей среды.....	219
Копелович Е.А., Ваняев В.В., Хватов С.В. Импульсный источник питания для создания ускоряющего электрического поля в мощных электрофизических установках.....	225
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	232
Евстигнеев А.И., Петров В.В., Дмитриев Э.А., Тарасова А.А. Исследование свойств смесей с связующими на основе сульфата магния.....	232
Бикулов Р.А., Астащенко В.И., Колесников М.С., Астащенко Т.В. Влияние сфероидизирующего модифицирования на механические свойства термически обработанных аустенито-бейнитных чугунов.....	238
Севастьянов Г. М., Одинокое В. И., Сапченко И. Г. Об одном алгоритме решения уравнения теплопроводности для керамической оболочковой формы в литье по выплавляемым моделям.....	243
Скляр С.Ю., Одинокое В.И., Ловизин Н.С. Решение тепловой задачи для процесса получения металлоизделий на литейно-ковочном модуле вертикального типа.....	250

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	258
Белов Д.В., Челнокова М.В., Соколова Т.Н., Калинина А.А., Смирнов В.Ф., Карташов В.Р. Влияние адсорбированных на поверхности фенолов и родственных им соединений на биологическую коррозию цинка.....	258
Борисов А.В., Мацулевич Ж.В., Османов В.К., Борисова Г.Н., Фукин Г.К., Коршунова В.А. Новое направление реакций диорганилдисульфидов с алкенами.....	264
Рогожин В.В., Москвичев А.Н., Михаленко М.Г. Исследование катодной стадии процесса электроосаждения покрытий никель-бор из электролитов с добавкой додека-клозо-додекабората калия ($K_2V_{12}H_{12}$).....	271
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	278
Яшин С.Н., Мурашова Н.А. Некоторые аспекты развития технологии управления инновационной деятельностью предприятий	278
Малкина М.Ю. Управление официальными международными резервами государств в условиях глобальных рисков.....	286
Чумаков А.Г., Гусева И.Б. Анализ предпосылок и факторов развития контроллинга научно-производственных предприятий авиастроительной отрасли.....	294
Глебова О.В., Мельникова О.Ю. Современные тенденции развития методологии стратегического управления.....	300
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	305
Комадорова И.В., Пономарева Н.Д. Континуитивность геометрического и философского стилей мышления (эпистемологический аспект среза «классика-постклассика-постнеклассика»).....	305
Щербакова Е.Е., Савичев С.С. Развитие коммуникативных способностей студентов с позиции компетентностного подхода.....	311
Шестакова Л.А., Золотарев М.И. Социально-педагогическое обеспечение контроля качества информирования студентов в инженерно-технических вузах.....	319
Прохорова М.В. Социальная ценность брендов.....	327
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	333
Вавилов В.Д., Вавилов И.В. Разработка микросистемного ДУС с резонирующим кольцом.....	333
Вавилов В.Д., Улюшкин А.В. Настройка корректирующего устройства в контуре микродатчика.....	345
Вавилов И.В., Корнилов А.В. Конструктивные особенности чувствительного элемента типа «несимметричный маятник».....	351

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Frolova O.A., Mishin A.Yu. The integrated radio inertial measurement system for low-altitude flight data estimation over water surface.....	11
Grushin P.I., Loginov V.I., Yampurin N.P. Comparative characteristics of algorithms for computation of combinational components based on the Farey series.....	21
Novoselova N.A., Raevskiy S.B., Titarenko A.A. Calculation of characteristics of symmetric modes propagating in a circular waveguide with radially-heterogeneous dielectric filling.....	30
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	39
Abrashkin A.A., Gromov E.M., Tyutin V.V. Spectrum of ideal turbulence.....	39
Kataeva L., Belotserkovskaya I. The numerical and analytical decision mathematical model for ground fire including slope angle influence.....	44
Khvostova O.E., Averbukh E.L., Kurkin A.A. Analysis of nonseismic tsunami scenarios on the french coast of mediterranean.....	49
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	57
Isaev Yu.K., Klyapnev D.A. Fault-tolerant algorithm for digital processing of inertial sensors data.....	57
Utrobin V.A. Elements of the theory of active perception of images.....	61
Milov V.R., Baranov V.G., Epshteyn A.Yu., Shalashov I.V. Discrete stochastic system state prediction under uncertainty on the basis of bayesian approach.....	70
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION.....	77
Konishchev B.P., Rodionov A.A., Mitin A.S. Gas pipeline pipes crack resistance assessment	77
Kuznesov S.V. Influence of backlashes and position of drive crank-rod of the mechanism of the mechanical press on size of loadings in drive elements.....	87
Kuznesov S.V. Research of cross-section forces at performance of technological operations of processing of metals by pressure.....	92
Simagina E.V., Agabekov Y.V. The enhance of cutting instruments wear and tear by means of nanotechnologies.....	98
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS.....	104
Raevsky A.S., Raevsky S.B., Uskov O.V. The wave spectrum of circular open layered dielectric waveguide.....	104
Denisenko A.A., Nazarov A.V., Popov E.A. Fast modes propagating in a circular waveguide with two sectorial dielectric inserts.....	118
Mironov A. V., Andreev V.V. Forecasting of the cyclic loading conditions on the basis of the generalized models of the metals behaviour at the given kind of the external effect.....	125
Borovkov M.N., Belov S.E., Novinskiy E.G. Development of the gt-mhr vertical turbomachine catcher bearings.....	134

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS.....	143
Molev Y.I., Proshin D.N. Determination of maximum allowed difference between grip of the front and rear car wheels, for ensure stability when driver is braking.....	143
Orlov L.N., Groshev A.M., Tumasov A.V. Calculative estimation of passive safety of vehicles bearing structures which constructions were changed or modified.....	149
Kuzmin N.A., Zelentsov V.V., Donato I.O. Research of adjournment in automobile engines.....	156
Palutin Yu. I. Criteria of hydrodynamic similarity in the estimation of vent automobile systems.....	166
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	171
Sutyryn V.I. Methodology of the finite element analysis of ship's hull constructions in their design.....	171
Zakharov L.A., Zakharov I.L., Khrunkov S.N. Simulation of mixing and combustion in the internal combustion engine.....	178
Petrov M.P., Lubenko V.N., Pichugin D.A. Problem of external design of the fleet for north caspian oil fields service.....	187
Kuznetsov Yu.P. Agreement of pneumatic engine and hydraulics inlet hose in design of pneumatic machine.....	193
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY.....	202
Vagin G., Sevostianov A., Yurtaev S. Electromagnetic compatibility of arc-type furnaces and systems of electric energy supply.....	202
Kirienko V.P., Vanyaev V.V. Kopelovich E.A The features of the capacitors operation regimes in the converters of the electro physical installations.....	211
Nazarychev A.N., Zhivotyaguina S.N., Zhulina T.A. Estimation of electric power equipment life time consumption considering its working modes and environment	219
Kopelovich E.A., Vanyaev V.V., Hvatov S.V Pulse power supply for creation the accelerating electric field in the power electro physical installations.....	225
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS.....	232
Evstigneev A.I., Petrov V.V., Dmitriev E.A., Tarasova A.A. Research of properties of mixes binaers based on magnesium sulphate.....	232
Bikulov R.A., Astachenko V.I., Kolesnikov M.S., Fstaschenko T.V. Influence of spheroidizing modification on the mechanical properties of thermally treated austenite and bainite cast iron.....	238
Sevastyanov G. M., Odinkov V. I., Sapchenko I. G. The solution algorithm for heat conduction equation for ceramic shell mold in investment casting.....	243
Sklyar S.J., Odinkov V.I., Lovizin N.S. Decision of the heat problem for process of the metal goods production in the vertical type casting-forging module.....	250
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES.....	258
Belov D.V., Chelnokova M.V., Sokolova T.N., Kalinina A.A, Smirnov V.P., Kartashov V.R. Influence of adsorbed on the surface of phenols and related compounds on the biological corrosion of zinc.....	258

Borisov A.V., Matsulevich Zh.V., Osmanov V.K., Borisova G.N., Fukin G.K., Korshunova V. A. New direction of reactions of organyldisulfides with alkenes.....	264
Rogozhin V.V., Mosckvichev A.N., Michalenko M.G. Research of cathode stage of electrodeposition nickel – boron coatings from electrolytes with the $K_2B_{12}H_{12}$ additive.....	271
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT.....	278
Yashin S.N., Murashova N.A. Some aspects of development management technology of activity enterprises innovation.....	278
Malkina M.Yu. Official foreign reserves management in conditions of global risks	286
Chumakov A.G., Guseva I.B. Background and factor analysis of the controlling development for research-and-production enterprise of the aircraft branch.....	294
Glebova O.V., Melnikova O.J. Modern progress of methodology of strategic management trends.....	300
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	305
Komadorova I.V., Ponomareva N.D. Continuovity of geometrical and philosophical stiles of thinking (epistemological aspect of classic, post-classic, post-non-classic.....	305
Sherbakova E.E., Savichev S.S. Development of communicative abilities of students from position of the competence approach.....	311
Shestakova L.A., Zolotareva Socially-pedogogical maintenance of the control quality informing of students in engineering college.....	319
Prochorova M.V. Brand social value.....	327
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	333
Vavilov V.D., Vavilov I.V. Developing a microsystem DAS with a resonating ring.....	333
Vavilov V.D., Ulyuschkin A.V. Tuning of a correcting device in a microsensor circuit.....	345
Vavilov I.V., Kornilov A. Features of a sensitive element of the “asymmetric pendulum” kind”.....	351

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 681.586.325

О.А. Фролова, А.Ю. Мишин¹

КОМПЛЕКСНЫЙ РАДИОИНЕРЦИАЛЬНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ ПАРАМЕТРОВ МАЛОВЫСОТНОГО ПОЛЕТА НАД ВОДНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

Произведен синтез комплексного измерителя высоты для обеспечения маловысотного полета беспилотного летательного аппарата, защищенного по отношению к отказам и выдаче ложной информации радиовысотомера. Приведены результаты моделирования, доказывающие эффективность работы комплексного измерителя высоты.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, система управления, инерциальная навигационная система, радиовысотомер, защита информации, фильтр Калмана.

Введение

В работе рассматриваются беспилотные летательные аппараты (БПЛА), траектория движения которых включает длительный участок полета на малой высоте над водной поверхностью. Для выполнения поставленной задачи БПЛА снабжается системой управления, которая формирует его траекторию полета в соответствии с заданной пространственной и временной программой. Задачу обеспечения системы управления данными о параметрах движения выполняет входящая в ее состав информационно-измерительная система. Формирование параметров вертикального движения обеспечивает комплексный измеритель высоты.

Для задачи маловысотного полета комплексный измеритель высоты осуществляет совместную обработку измерений инерциальной навигационной системы (ИНС) и радиовысотомера. ИНС является источником гладкой непрерывной информации о высоте и скорости ее изменения. Радиовысотомер измеряет геометрическую высоту полета – расстояние от летательного аппарата до подстилающей поверхности. Комплексирование информации ИНС и радиовысотомера обеспечивает компенсацию нарастающих ошибок ИНС при сглаживании шумов радиовысотомера.

Как правило, комплексный измеритель высоты реализует лишь совместную обработку информации измерителей, причем рассматривается как наиболее простой пример построения комплексной системы. Действительно, при нормальном функционировании датчиков он обеспечивает систему управления точной и непрерывной информацией о параметрах вертикального движения без динамических искажений. Однако радиовысотомер в процессе полета может отказывать или выдавать различного характера ложную информацию о высоте. Наиболее вероятными отказы и выдача ложной информации могут быть при полете БПЛА в зоне барражирования самолетов-поставщиков помех, на участках траектории со сменой эшелона, при полете вблизи мощных радиолокационных станций (РЛС) и в ближней зоне заданной

конечной точки при наличии активного радиоэлектронного противодействия. Использование ложной информации в совместной обработке приводит к появлению недостоверных оценок ошибок ИНС и формированию для системы управления параметров вертикального движения, не соответствующих истинному движению БПЛА. Как следствие – нарушение расчетной траектории, нештатное приведение, невозможность выполнения задачи БПЛА.

Проблема защиты от ложной информации обычно решается пороговым контролем текущих измерений и динамической фильтрацией для снижения степени влияния пропущенных помех [1]. Однако эти методы не обеспечивают достаточную надежность исключения ложной информации. Другой известный способ защиты – сопоставление однотипных измерений от разных источников информации, что обеспечивает достаточное качество исключения ложных измерений в реальном времени (2)–(4). Однако это качество достигается аппаратной избыточностью, что во многих случаях является недопустимой ценой за повышенную помехоустойчивость.

Защита усложняется в условиях движения на малой высоте над взволнованной водной поверхностью, поскольку радиовысотомер отслеживает профиль волны, т.е. его измерения содержат погрешность, обусловленную ординатой точки профиля волны, находящейся в центре облучаемой площадки [5]. В рассматриваемых условиях заданная высота полета может быть сопоставима с высотой волны.

Целью работы является синтез комплексного измерителя высоты для обеспечения маловысотного полета над водной поверхностью, защищенного по отношению к отказам и ложной информации радиовысотомера.

Комплексный измеритель высоты

Для достижения поставленной цели необходимо синтезировать комплексный измеритель высоты, решающий следующие задачи:

- фильтрация измерений ИНС и радиовысотомера;
- оценка параметров волнения подстилающей поверхности по измерениям радиовысотомера в процессе движения БПЛА на малой высоте;
- идентификация ложной информации радиовысотомера и исключение из совместной обработки недостоверных измерений;
- оценка ошибок ИНС для расчета безопасной высоты движения при отказах радиовысотомера.

При решении задач однозначно принимается, что ИНС является безотказной надежной системой. Сбой в работе ИНС может произойти, например, при отказе какого-либо датчика первичной информации, в каналах связи или в вычислителе при выполнении недопустимой математической операции. В любом случае, считаем, что сбой в ИНС приведет к невозможности восстановления работоспособности системы.

Таким образом, в состав комплексного измерителя высоты должны быть включены следующие алгоритмы:

- алгоритм комплексирования;
- алгоритм оценки параметров волнения;
- алгоритм идентификации ложной информации радиовысотомера;
- алгоритм оценки ошибок ИНС для формирования высоты безопасного полета.

В данной работе рассмотрены наиболее значимые задачи и соответствующие алгоритмы комплексного измерителя высоты: комплексная обработка и идентификация ложной информации радиовысотомера. Успешное решение выделенных задач обеспечит возможность реализации алгоритмов оценки волнения и ошибок ИНС для формирования высоты безопасного полета.

Алгоритм комплексирования

Совместная обработка информации ИНС и радиовысотомера в комплексном измерителе высоты реализуется в алгоритме комплексирования на основе фильтра Калмана. При использовании метода линейной фильтрации в качестве уравнений динамической системы принимаются уравнения ошибок ИНС в вертикальном канале. Фильтр Калмана дает оптимальную оценку ошибок ИНС, подавляя измерительный шум радиовысотомера [6].

Уравнение ошибок ИНС по координатам представляется в виде:

$$\dot{\delta\vec{R}}_g = \delta\vec{V}_g;$$

$$\delta\vec{V}_g = -\vec{\Psi} \times [A_{g1} \cdot \vec{a}_k] + A_{g1} \cdot \Delta\vec{a}_k + \delta\vec{g}(\vec{R}_g) - 2 \cdot [\vec{\Omega}_g \times \delta\vec{V}_g],$$

где $\delta\vec{R}_g$ – ошибка по координатам; $\delta\vec{V}_g$ – ошибка по скорости; $\vec{\Psi}$ – ошибка по ориентации; \vec{a}_k – показания акселерометров; $\Delta\vec{a}_k = [K_g] \cdot \vec{a}_k + \vec{a}_{01} + \vec{\xi}_a$ – инструментальная погрешность акселерометров, где K_g – погрешность масштабных коэффициентов, \vec{a}_{01} – систематическое смещение нулевого сигнала, $\vec{\xi}_a$ – случайный уход акселерометров; $\delta\vec{g}(\vec{R}_g)$ – ошибка при вычислении вектора силы тяжести.

Получим решение уравнения ошибок ИНС по координатам. При этом для упрощения расчетов уравнение переписывается в следующем виде:

$$\ddot{\delta\vec{R}}_g = -\vec{\Psi} \times \vec{f} + \Delta\vec{f} + \delta\vec{g}(\vec{R}_g) - 2[\vec{\Omega}_g \times \dot{\delta\vec{R}}_g],$$

где $\vec{f} = A_{g1} \vec{a}_k$ – показания акселерометров в проекциях на соответствующую систему координат; $\Delta\vec{f} = A_{g1} \Delta\vec{a}_k$ – инструментальные ошибки акселерометров; $\vec{\Omega}_g$ – вектор угловой скорости объекта в ИСК.

Обозначая $\delta x, \delta y, \delta z$ – проекции $\delta\vec{R}_g$, ψ_x, ψ_y, ψ_z – компоненты вектора ошибок по ориентации $\vec{\Psi}$, $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – компоненты вектора угловой скорости $\vec{\Omega}_g$, раскрывая матричное уравнение в скалярном виде, и проводя упрощение полученных выражений, при соответствующих допущениях, получим уравнения ошибок ИНС по координатам в скалярном виде

$$\delta\ddot{x} + v^2\delta x = \Delta f_x + \psi_z f_y;$$

$$\delta\ddot{y} - 2v^2\delta y = \Delta f_y;$$

$$\delta\ddot{z} + v^2\delta z = \Delta f_z - \psi_x f_y,$$

где $v = \sqrt{\frac{g}{R_{зем}}}$ – частота Шулера.

Уравнение ошибок ИНС по координатам в вертикальном канале

$$\delta\ddot{y} - 2v^2\delta y = \Delta f_y,$$

общее решение которого имеет вид:

$$\delta y = \delta y^0 ch(v\sqrt{2}t) + \frac{\delta \dot{y}^0}{v\sqrt{2}} \cdot sh(v\sqrt{2}t) + \frac{\Delta f_y}{2} \cdot \left(\frac{ch(v\sqrt{2}t) - 1}{v^2} \right).$$

Рассматривая накопление ошибок ИНС на временах порядка 60 секунд, с учетом разложения в степенной ряд функций $ch(x)$ и $sh(x)$, исключая компоненты третьего и выше порядка, а также составляющие, содержащие квадрат частоты Шулера v^2 , решение уравнения для ошибок ИНС по координатам в вертикальном канале запишется в виде:

$$\delta y = \delta y^0 + \delta \dot{y}^0 \cdot t + \frac{\Delta f_y t^2}{2}.$$

Таким образом, в рассматриваемых условиях движения БПЛА с учетом времени накопления ошибок ИНС до 60 секунд, ошибка ИНС в вертикальном канале определяется начальными ошибками по высоте и вертикальной скорости, а также нулевым сигналом вертикального акселерометра.

Аналогично решая уравнения ошибок ИНС по скорости, можно показать, что в рассматриваемых условиях изменение ошибки ИНС определения вертикальной скорости $\delta \dot{y}$ определяется начальной ошибкой и нулевым сигналом вертикального акселерометра:

$$\delta \dot{y} = \delta \dot{y}^0 + \Delta f_y t.$$

Данные уравнения составляют уравнения ошибок ИНС в вертикальном канале, и используются в фильтре Калмана в качестве уравнений динамической системы.

При этом ошибки ИНС являются компонентами вектора состояния \hat{x} и включают: оценки ошибок ИНС по высоте $\delta \hat{y}$ и вертикальной скорости $\delta \dot{\hat{y}}$, а также оценку ошибки, эквивалентной нулевому сигналу вертикального акселерометра $\Delta \hat{f}_y$: $\hat{x} = [\delta \hat{y} \quad \delta \dot{\hat{y}} \quad \Delta \hat{f}_y]^T$. Разность данных о высоте ИНС ($H_{\text{инс}}$) и радиовысотомера ($H_{\text{рв}}$) играет роль измерений для фильтра Калмана: $z = H_{\text{инс}} - H_{\text{рв}}$.

В алгоритме комплексирования может быть реализован фильтр Калмана в замкнутом или разомкнутом виде.

Применение фильтра по разомкнутой схеме целесообразно лишь при относительно коротких интервалах работы системы. В этом случае коррекция измерений ИНС производится на выходе из алгоритма комплексирования. Корректируемые параметры предназначены только для системы управления.

При замкнутой схеме реализации фильтра, в алгоритме производится расчет высоты и вертикальной скорости интегрированием ускорения ИНС. За начальные значения высоты и вертикальной скорости принимаются соответствующие данные ИНС. Полученные оценки возвращаются в фильтр, образуя обратную связь. Корректируемая информация о высоте и вертикальной скорости выдается в систему управления.

Для задачи защиты от ложной информации радиовысотомера в фильтр Калмана комплексного измерителя высоты вводится запаздывание. Таким образом, фильтр на такте $(k+1)$ использует задержанные измерения ИНС и радиовысотомера, т.е. измерения, рассчитанные на такте $(k+1-N)$,

$$z_{k+1-N} = H_{k+1-N}^{\text{инс}} - H_{k+1-N}^{\text{рв}},$$

при этом осуществляется корректирование априорной оценки вектора состояния $\hat{x}_{k+1-N/k-N}$ с учетом измерений z_{k+1-N} :

$$\hat{x}_{k+1-N} = \hat{x}_{k+1-N/k-N} + K_{k+1-N} \cdot (z_{k+1-N} - H_{k+1-N} \cdot \hat{x}_{k+1-N/k-N}).$$

Вектор состояния на выходе фильтра экстраполируется на текущий момент времени с использованием матрицы F , операция $\hat{x}_{k+2-N} = F_{k+2-N} \cdot \hat{x}_{k+1-N}$ осуществляется N раз.

Алгоритм идентификации ложной информации радиовысотомера

Алгоритм идентификации ложной информации радиовысотомера в составе комплексного измерителя высоты должен обеспечивать:

- своевременную идентификацию ложной информации радиовысотомера;
- исключение из обработки всего сбойного участка;

- качественную экстраполяцию оценок ошибок ИНС в случае идентификации ложных измерений или отсутствия достоверности данных радиовысотомера.

Анализ литературы показывает, что наиболее эффективным методом выявления отказа датчика является допусковый контроль, причем испытание на порог должна проходить невязка фильтра Калмана, формируемая с использованием показаний анализируемого датчика. Использование невязки позволяет идентифицировать ложную информацию измерителя любого характера (одиночный, ступенчатый сбой или сбой в виде экстраполятора первого и выше порядков и др.).

В алгоритме идентификации комплексного измерителя высоты используется невязка фильтра Калмана из алгоритма комплексирования. Причем испытание на порог проходит не текущее измерение радиовысотомера (в составе невязки фильтра), а измерения на интервале времени. Для этого в алгоритме образуется непрерывно обновляющаяся последовательность задержанных измерений радиовысотомера и ИНС, обладающая свойством FIFO списка. Каждое измерение проходит последовательность от начала до конца и «вытаскивается» текущим измерением из конца очереди в алгоритм комплексирования.

Каждое текущее измерение проходит двойной допусковый контроль. Задачей первого допускового контроля является идентификация явной ложной информации радиовысотомера. Второй контроль фиксирует возможные отказы. Первый параметр допуска имеет значение: $p_{\max} = 0,5H_{\text{зад}}$ – половину заданной высоты маловысотного полета. Второй параметр допуска меньше первого: $p_{\min} < p_{\max}$, и соответствует штатному режиму работы фильтра Калмана. Кроме того, в состав параметров допуска включаются оценка высоты волны в виде среднего квадратичного отклонения (СКО) измерений радиовысотомера, а также составляющая, равная 3% от текущей высоты полета БПЛА, что является средней погрешностью радиовысотомера, зависящей от высоты движения. Таким образом, параметры допуска рассчитываются следующим образом:

$$p_{\max} = 0,5H_{\text{зад}} + \sigma_{\text{вол}} + 0,03H_{\text{тек}};$$

$$p_{\min} = p_{\phi} + \sigma_{\text{вол}} + 0,03H_{\text{тек}};$$

где $H_{\text{зад}}$ - заданная высота маловысотного полета; $\sigma_{\text{вол}}$ - СКО высоты волны от среднего уровня; $H_{\text{тек}}$ - текущая высота полета; p_{ϕ} - параметр допуска, соответствующий штатному режиму работы фильтра Калмана.

При превышении невязки первого параметра допуска текущее измерение радиовысотомера объявляется ложным, комплексный измеритель высоты переходит в режим экстраполяции. Если количество сбоев превышает половину интервала запаздывания (анализ на достоверность проходит последовательность измерений на интервале времени), то все измерения на интервале объявляются ложными и исключаются из комплексной обработки.

Если невязка проходит первый контроль, но превышает второй параметр допуска, то включается счетчик сбоев. В данном случае текущее измерение не объявляется ложным, а начинают рассчитываться резервные параметры: в случае разомкнутой схемы фильтрации – вектор состояния фильтра, в случае замкнутой – вектор состояния, высота и вертикальная скорость. Резервные параметры используются, если алгоритм переходит в режим экстраполяции с ненулевым значением счетчика сбоев второго допускового контроля.

Невязка, прошедшая двойной контроль в алгоритме идентификации и задержанная на интервал запаздывания, возвращается в алгоритм комплексирования, где производится формирование оценок ошибок ИНС и их экстраполяция на текущий такт. Измерения радиовысотомера, соответствующие прошедшей контроль невязке, используются для оценки параметров волнения.

Анализ на достоверность измерений радиовысотомера обеспечивает повышенную надежность оценок ошибок ИНС в вертикальном канале, что обеспечивает расчет безопасной высоты в случае отказа радиовысотомера.

Результаты моделирования

Моделирование разработанного комплексного измерителя высоты производится на математическом цифровом комплексе в составе ИИС системы управления беспилотного летательного аппарата. При моделировании задается типовая траектория движения БПЛА в вертикальной плоскости, включающая участки пикирования, выхода на заданную высоту, горизонтальный полет на малой высоте над водной поверхностью.

На рис. 1 отказ радиовысотомера моделируется на участке пикирования в виде выдачи ложной информации о высоте с запаздыванием снятия и опережением выставки признака достоверности данных. На рис. 2 приведены результаты моделирования в случае выдачи радиовысотомером ложной информации на участке выхода из пикирования на заданную высоту 10 м. Отказ на участке выхода наиболее опасен из-за возможности просадки изделия.

На рисунках приведены истинная высота полета над эллипсоидом $H_{ист}$, высота комплексного измерителя высоты $H_{кив}$, высота, измеренная радиовысотомером $H_{рв}$, признак достоверности данных в соответствующем масштабе $ДД_{рв}$.

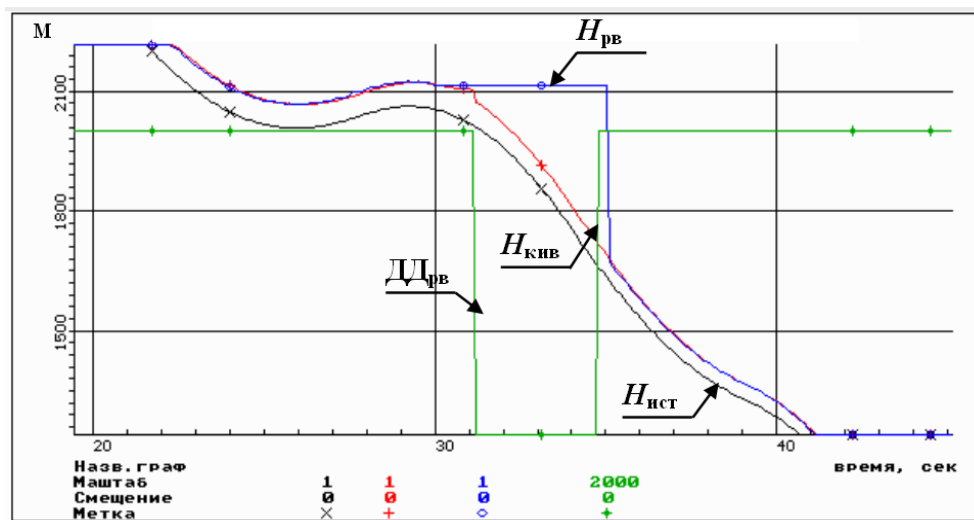


Рис. 1. Ложная информация на участке пикирования – экстраполятор нулевого порядка, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 2000

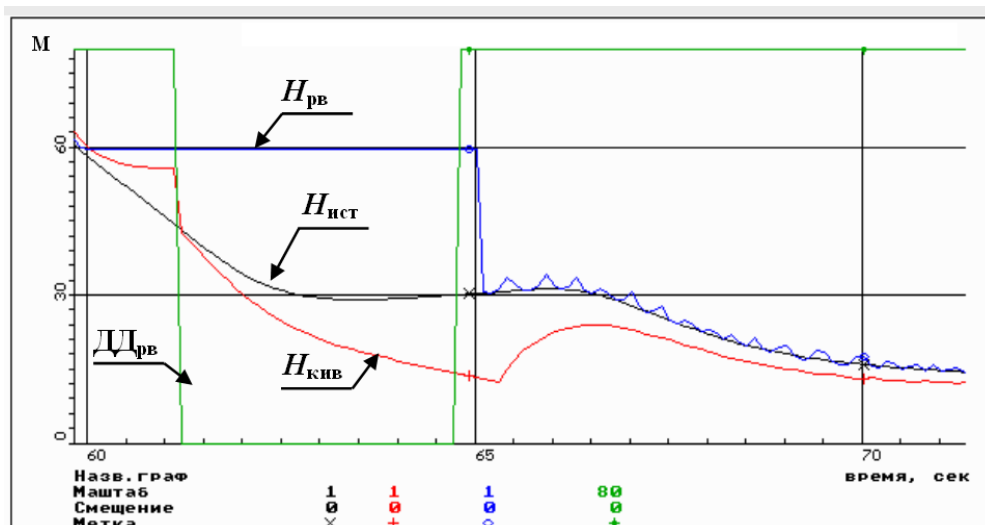


Рис. 2. Ложная информация на участке выхода из пикирования – экстраполятор нулевого порядка, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 80

Моделирование показывает, сбойная работа радиовысотомера не влияет на процесс выхода БПЛА из пикирования, комплексный измеритель высоты обеспечивает безопасность полета.

Моделирование ложной информации радиовысотомера на участке горизонтального полета проводится в виде одиночного и ступенчатого сбоя и экстраполятора первого порядка с сохранением признака достоверности данных.

На рис. 3-4 приведены результаты моделирования работы комплексного измерителя высоты с использованием в алгоритме комплексирования измерений радиовысотомера, не прошедших контроль на достоверность. На рисунках показаны графики высоты истинной, высоты, измеренной радиовысотомером, высоты, рассчитанной КИВ, и признака достоверности данных. На рис. 3 представлены результаты моделирования одиночного и ступенчатого сбоя, на рис. 4 – экстраполятор первого порядка.

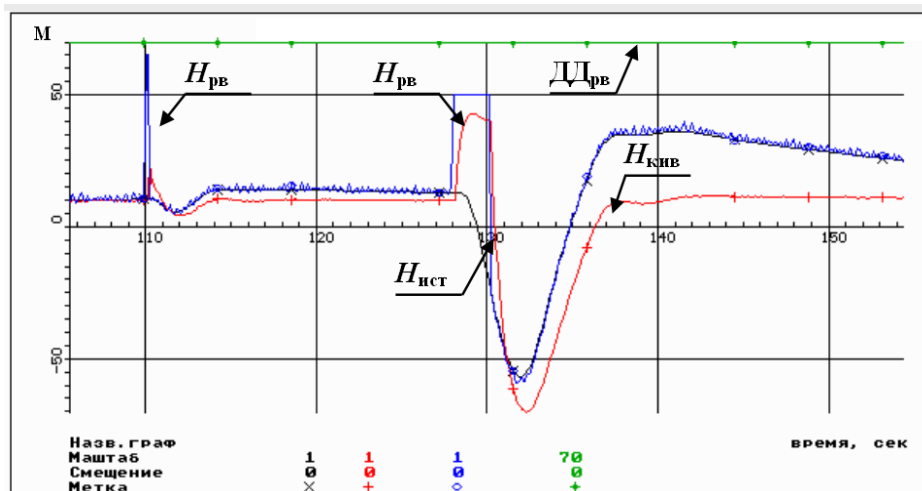


Рис. 3. Одиночный и ступенчатый сбой в горизонтальном полете, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 70

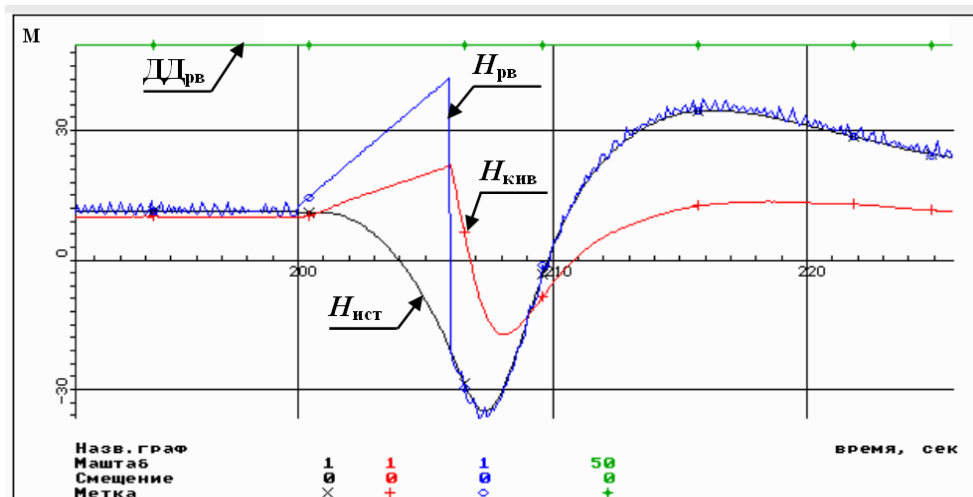


Рис. 4. Экстраполятор первого порядка в горизонтальном полете, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 50

Результаты показывают, что использование ложной информации радиовысотомера в совместной обработке комплексного измерителя высоты приводит в горизонтальном полете к просадке БПЛА относительно заданной траектории полета. Ступенчатый сбой и экстрапо-

лятор первого порядка вызывают просадку до отрицательной высоты, что в реальных условиях применения эквивалентно приводнению БПЛА.

На рис. 5-6 приведены результаты моделирования отказных ситуаций с использованием в совместной обработке измерений, прошедших алгоритм идентификации ложной информации.

Моделирование показывает надежную идентификацию ложной информации радиовысотомера по предложенной схеме и исключение из обработки недостоверных данных.

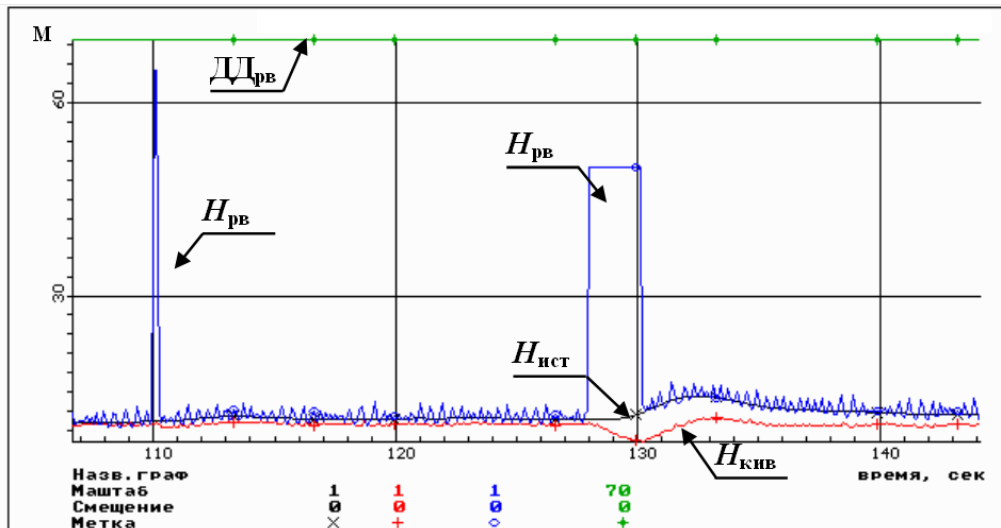


Рис. 5. Одиночный и ступенчатый сбои в горизонтальном полете, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 70

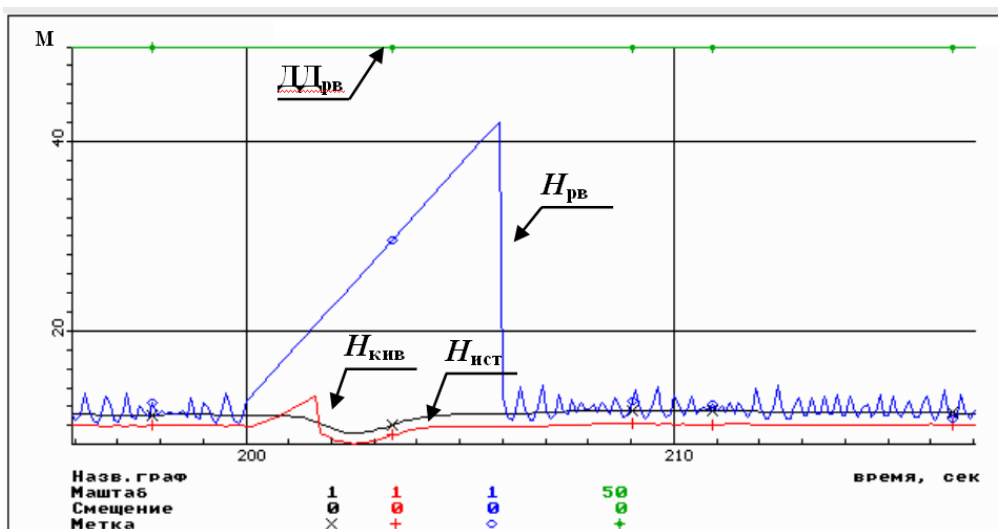


Рис. 6. Экстраполятор первого порядка в горизонтальном полете, признак достоверности данных радиовысотомера в масштабе 50

На рис. 7 приведены графики параметров допуска алгоритма идентификации ложной информации, невязки фильтра Калмана и признака экстраполяции комплексного измерителя высоты. Наглядно демонстрируют работу комплексного измерителя высоты при наличии отказа рис. 6-7. На 200 с автономного полета радиовысотомер выдает ложную информацию. В этот момент времени начинает увеличиваться невязка фильтра Калмана (рис. 7). При превышении величины невязки второго параметра допуска p_{\min} , в алгоритме идентификации ложной информации рассчитываются резервные параметры, хотя признак экстраполяции ($I_{\text{экстр}}$) еще не выставлен и решение о наличии сбоя не принято. До 201.5 с высота ком-

плексного измерителя высоты приводится к ложной высоте радиовысотомера (рис. 6). Однако после превышения невязки первого параметра допуска P_{\max} , выставляется признак экстраполяции комплексного измерителя высоты и производится замена данных алгоритма на резервные параметры вертикального движения (201.5 с автономного полета рис. 6). В режиме экстраполяции комплексный измеритель высоты обеспечивает систему управления достоверной информацией о высоте и вертикальной скорости. После выхода радиовысотомера в режим измерения высоты признак экстраполяции снимается, и комплексный измеритель высоты возобновляет работу в штатном режиме комплексования.

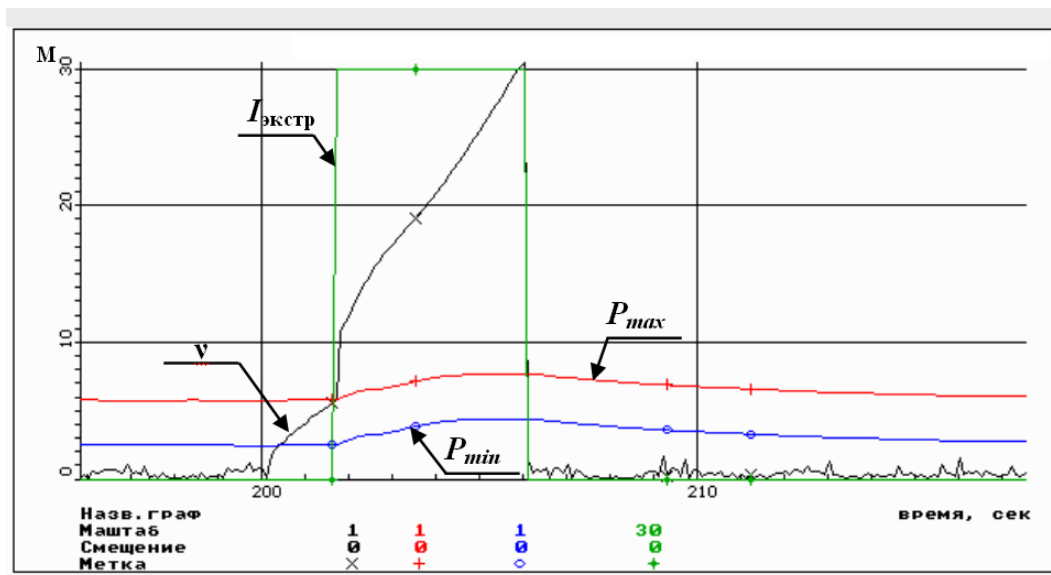


Рис. 7. Экстраполятор первого порядка, признак экстраполяции в масштабе 30

Выводы

В настоящей работе предложен новый подход к построению помехозащищенной радиоинерциальной комплексной измерительной системы для системы управления полетом БПЛА на малой высоте над взволнованной водной поверхностью. Подход заключается в реализации в составе комплексного измерителя высоты ряда алгоритмов, обеспечивающих систему управления точной и надежной информацией о параметрах вертикального движения:

- алгоритм комплексования, функционирующий по задержанной информации измерителей, что позволяет проводить анализ на достоверность некоторой совокупности измерений радиовысотомера;
- алгоритм идентификации ложной информации, реализующий двухуровневый контроль измерений радиовысотомера на интервале времени и обеспечивающий повышенную надежность защиты.

Наличие достоверной информации радиовысотомера, в свою очередь, позволяет реализовать в составе комплексного измерителя алгоритмы оценки высоты волны и ошибок ИНС для формирования безопасной высоты полета при отказах радиовысотомера.

Предложенный в работе подход к идентификации ложной информации дает возможность применения сложных схем защиты. Так, в частности, могут быть реализованы варианты контроля с использованием методов теории временных рядов.

Таким образом, решена задача обеспечения маловысотного полета БПЛА над взволнованной водной поверхностью в условиях отказов радиовысотомера. Предложенный подход содержит принципиальные решения, методические основы и алгоритмы для применения в составе технически реализуемых систем управления.

Библиографический список

1. Алгоритмы корректируемых инерциальных навигационных систем, решающих задачу топопривязки / Голован А.А. [и др.]; под ред. Парусникова Н.А. – М.: Изд-во Механико-математического факультета МГУ, 1994. – 44 с.
2. Справочник по теории автоматического управления / под ред. Красовского А.А. – М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит, 1987. – 712 с.
3. **Фролов, В.С.** Радио-инерциальные системы наведения / В.С. Фролов. – М.: Советское радио, 1976. – 184 с.
4. **Небылов, А.В.** Измерение параметров полета вблизи морской поверхности / А.В. Небылов. – СПб.: СПбГААП, 1994. – 307 с.
5. **Дмитриев, С.П.** Информационная надежность, контроль и диагностика навигационных систем / С.П. Дмитриев, Н.В. Колесов, А.В. Осипов. – СПб.: СПбГААП, 2004. – 208 с.
6. **Кузовков, Н.Т.** Инерциальная навигация и оптимальная фильтрация / Н.Т. Кузовков, О.С. Салычев. – М.: Машиностроение, 1982. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.04.2010*

О.А. Frolova, A.Yu. Mishin

THE INTEGRATED RADIO INERTIAL MEASUREMENT SYSTEM FOR LOW-ALTITUDE FLIGHT DATA ESTIMATION OVER WATER SURFACE

The paper treats the complex altitude measuring system synthesis for an UAV low-altitude flight support, the measuring system being protected against radio altimeter faults and invalid data. Simulation results that prove the suggested method efficiency are given.

Key words: uninhabited air vehicle (UAV), control system, inertial navigation system, radio altimeter, data protection, Kalman filter.

УДК 621.378

П.И. Грушин¹, В.И. Логинов², Н.П. Ямпурин¹

СРАВНИТЕЛЬНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА АЛГОРИТМОВ РАСЧЕТА КОМБИНАЦИОННЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ НА ОСНОВЕ РЯДОВ ФАРЕЯ

Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева¹,
Волжская государственная Академия водного транспорта²

Приводится сравнительная характеристика быстродействия алгоритмов расчета комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты на основе рядов Фарея. Анализируются вычислительные затраты алгоритмов без синтеза полного ряда Фарея, что позволяет решать задачи пораженности комбинационными частотами преобразователей частоты только на основе синтеза ближайших компонент к рабочим частотам исследуемых систем нелинейного преобразования частот.

Ключевые слова: преобразование частоты, комбинационные составляющие, цепные дроби, ряд Фарея.

Одной из важных задач при проектировании и анализе поведения систем нелинейного преобразования частот является уменьшение влияния комбинационных гармоник на полезный сигнал.

Для решения подобных задач широко используются графические [1–3], аналитические [4, 5] и алгоритмические методы [1, 9, 10]. Одним из эффективных методов расчета комбинационных составляющих при нелинейном преобразовании частоты являются методы на основе рядов Фарея [9, 10].

Предлагаются эффективные методы и алгоритмы решения задач анализа ближайших комбинационных частот. Основу предполагаемых методов составляет отыскание заданного соотношения смешиваемых частот преобразователя в базисе дробей Фарея с помощью аппарата цепных дробей и процедуры, в основе которой лежит базовая теорема Фарея-Коши, связывающая соседние дроби в ряде Фарея.

Цель работы - разработать эффективные методы анализа комбинационных составляющих и оценить их общую и алгоритмическую эффективность.

Рассмотрим задачу отыскания ближайшей дроби Фарея R/Q к заданному соотношению смешиваемых частот $q = f_1/f_2$ ($f_1 \leq f_2$), минуя операцию синтеза всей последовательности Фарея [6].

Использование цепных дробей. Согласно теореме Дирихле в теории диофантовых приближений [7], для заданного q всегда существует такая дробь R/Q , что разность между ними может удовлетворять любой наперед заданной точности. Последовательность дробей Фарея Φ_k является последовательностью всех несократимых рациональных дробей, у которых знаменатель $Q \leq k$, где k – порядок ряда Фарея. Поэтому при отыскании приближения для заданного дробью Фарея соотношения q , можно использовать аппарат цепных дробей [8].

Представим заданное соотношение смешиваемых частот $q \in (0, 1)$ конечной цепной дробью

$$q = [b_0; b_1, b_2, \dots, b_n]. \quad (1)$$

Цепные дроби обладают тремя замечательными свойствами:

1. Любая подходящая дробь R_j/Q_j цепной дроби (1) является несократимой дробью ($j \in \{1, n\}$).

2. Знаменатель подходящей дроби, согласно [8], растет как показательная функция от индекса j подходящей дроби:

$$Q_j \geq 2^{\frac{j-1}{2}}. \quad (2)$$

3. Рекуррентность в определении подходящих дробей:

$$R_j = b_j R_{j-1} + R_{j-2}, \tag{3}$$

$$Q_j = b_j Q_{j-1} + Q_{j-2}, \tag{4}$$

где $j \geq 1, R_{-1}=1, Q_{-1}=0, R_0=b_0, Q_0=1$.

Из свойства 1 можно сделать вывод, что любая подходящая дробь R_j/Q_j цепной дроби (1), являющейся приближением действительного числа $q \in (0,1)$, принадлежит последовательности Фарея. Таким образом, задача отыскания приближения в базисе дробей Фарея состоит в разложении q в цепную дробь (1) [6, 8] с одновременным вычислением подходящих дробей R_j/Q_j согласно (3). Разложение числа q заканчивается, когда не будет выполняться условие

$$Q_j \leq k, \tag{5}$$

при этом подходящая дробь R_j/Q_j и есть найденная ближайшая дробь Фарея $R_i/Q_i, i \in 1, N_k$ [6] к q .

На рис. 1 приведена структурная схема алгоритма приближения q дробью Фарея. Максимальное количество итераций алгоритма на рис. 1 можно определить из (2) с учетом (5) по формуле

$$N_1 = 2 \log_2 k + 1. \tag{6}$$

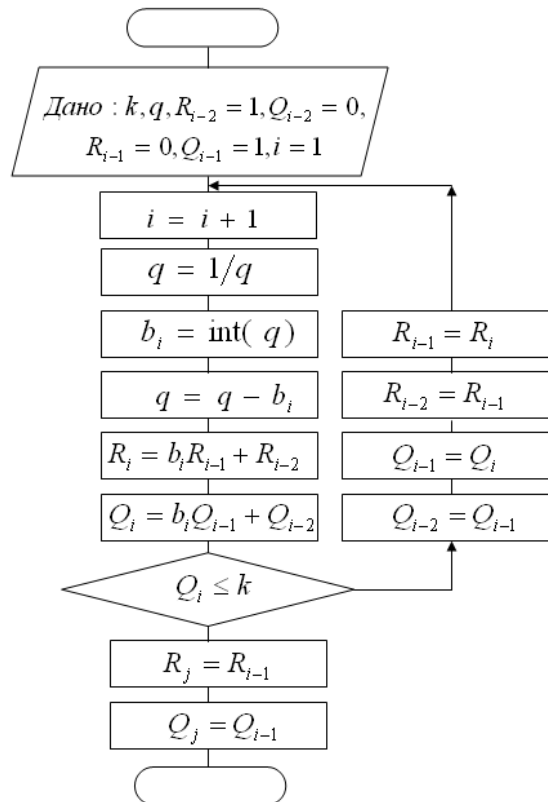


Рис. 1. Алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея

Алгоритм Фарея-Коши. Второй задачей в определении ближайших дробей Фарея к заданному соотношению смешиваемых частот q является определение второго диофантова приближения. Найденная по приведенному на рис. 1 алгоритму дробь Фарея может удовлетворять условию

$$\frac{R_i}{Q_i} < q \tag{7}$$

либо условию

$$\frac{R_i}{Q_i} > q \tag{8}$$

где $i \in 1, N_k$ - номер дроби Фарея в ее последовательности [6].

Рассмотрим случай (7). Согласно основной теореме Фарея-Коши, определяющей связь соседних дробей Фарея [6], которая утверждает, что если $R_i/Q_i \in \Phi_k$, а Q_{i+1} - целое число, такое, что

$$k - Q_i < Q_{i+1} \leq k \tag{9}$$

и

$$R_i Q_{i+1} \equiv -1 \pmod{Q_i}, \tag{10}$$

причем

$$R_{i+1} = \frac{R_i Q_{i+1} + 1}{Q_i} \tag{11}$$

Тогда R_{i+1}/Q_{i+1} является в Φ_k дробью, непосредственно следующей за R_i/Q_i в ряде Фарея. Выражения (9) и (10) представим в следующем виде:

$$\begin{cases} Q_{i+1} \leq k \\ Q_{i+1} > k - Q_i \end{cases}, \tag{12}$$

$$R_i Q_{i+1} + 1 \equiv 0 \pmod{Q_i} \tag{13}$$

Таким образом, задача нахождения дроби R_{i+1}/Q_{i+1} , непосредственно следующей за дробью R_i/Q_i , состоит в определении знаменателя Q_{i+1} путем решения сравнения (13) в ограничениях (12). Для этого преобразуем сравнение (13) в эквивалентное уравнение относительно двух переменных Q_{i+1} и m_x :

$$R_i Q_{i+1} + 1 = Q_i m_x, \tag{14}$$

где m_x - неизвестный целочисленный множитель. Подставляя из (12) границы изменения Q_{i+1} в (14) и разрешая уравнения относительно m_x , получим формулу для определения границ изменения $m_x \in (m_n, m_g)$:

$$\begin{cases} m_g = \frac{k R_i + 1}{Q_i} \\ m_n = m_g - R_i \end{cases} \tag{15}$$

Решение уравнения (14) в целых числах относительно Q_{i+1} в пределах изменения (15) возможно, если выполняется следующее условие:

$$\frac{Q_i m_x - 1}{R_i} - \text{ent} \left(\frac{Q_i m_x - 1}{R_i} \right) = 0 \tag{16}$$

Таким образом, поиск знаменателя Q_{i+1} представляет собой итерационный процесс с числом итераций m_x , границы которого находятся в пределах, заданных в (15), равным R_i . Следовательно, исходя из свойств дробей Фарея [6], максимальное число итераций поиска дроби R_{i+1}/Q_{i+1} равно

$$N_2 = k - 1. \tag{17}$$

Структурная схема алгоритма, реализующего этот процесс, приведена на рис. 2. Для дроби $R_1/Q_1=0/1$ выражение (16) не имеет смысла, поэтому для этого случая, исходя из свойств дробей Фарея [6], $R_2/Q_2=1/k$.

Для случая (7), используя обратную теорему Фарея-Коши, определяющую связь последующей дроби Фарея с предыдущей, получим после преобразований выражения, аналогичные (13)–(16):

$$R_i Q_{i-1} - 1 \equiv 0 \pmod{Q_i}, \tag{18}$$

$$R_i Q_{i-1} - 1 = Q_i m_x, \tag{19}$$

$$\begin{cases} m_g = \frac{kR_i - 1}{Q_i} \\ m_n = m_g - R_i, \end{cases} \tag{20}$$

$$\frac{Q_i m_x + 1}{R_i} - \text{ent} \left(\frac{Q_i m_x + 1}{R_i} \right) = 0 \tag{21}$$

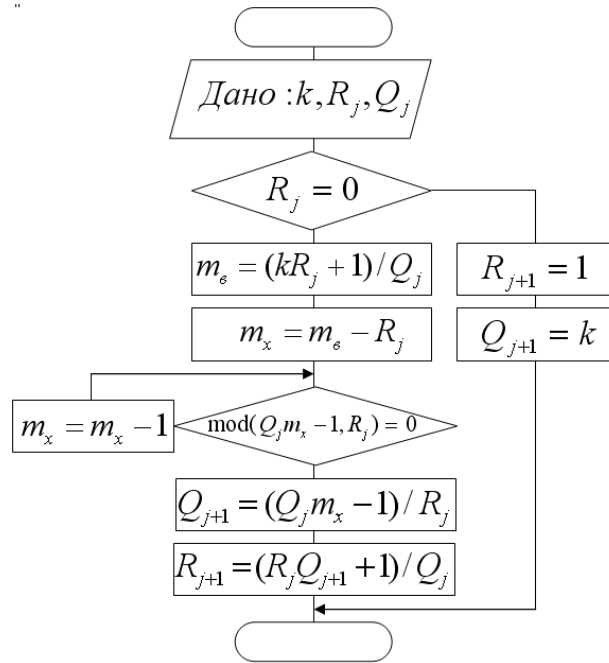


Рис. 2. Алгоритм поиска следующей дроби Фарея

Структурная схема алгоритма, реализующего поиск предыдущей дроби R_{i-1}/Q_{i-1} по известной R_i/Q_i , приведена на рис. 3.

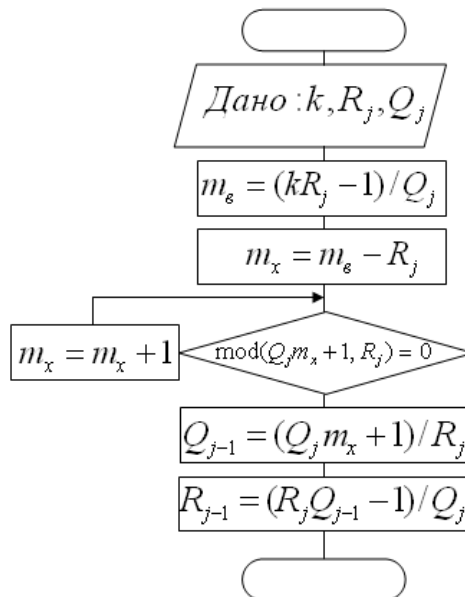


Рис. 3. Алгоритм поиска предыдущей дроби Фарея

Алгоритм цепных дробей для нахождения двойного Диофантова приближения в классе дробей Фарея

Для каждой дроби на $(n - 1)$ -м уровне в дереве Фарея можно непосредственно вычислить две соседние дроби, или, иными словами, «прямых потомков» на n -м уровне. Непосредственного (прямого) предшественника любой дроби (предыдущего уровня) можно найти, вычитая единицу из последнего члена ее разложения в непрерывную дробь. Другой (отдаленный) предшественник данной рациональной дроби может быть найден простым *выбрасыванием* последнего члена [11].

Согласно [8],

$$P_n Q_{n-1} - P_{n-1} Q_n = (-1)^{n-1}. \quad (22)$$

Если количество членов в последовательности $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$ для прямого предшественника нечетно, то потомок расположится между отдаленным и прямым предшественником, а если четно – между прямым и отдаленным предшественником.

У любой дроби из ряда Фарея всегда есть два потомка. Назовем потомок, образованный прибавлением единицы к короткой записи исходной дроби, *коротким* потомком, а потомок, образованный прибавлением единицы к длинной записи исходной дроби, *длинным* потомком и обозначим их соответственно как

$$\frac{P_s}{Q_s} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n + 1] \quad \text{и} \quad \frac{P_l}{Q_l} = [b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n - 1, 2]. \quad (23)$$

Для обоих потомков справедливо, что один из них всегда больше, а другой всегда меньше исходной дроби. Количество членов в одном потомке всегда четно, а в другом всегда нечетно. Согласно (22), потомок с четным числом членов всегда больше своего прямого предшественника и наоборот для нечетного.

Согласно алгоритму в зависимости от направления поиска, в сторону увеличения дробей ряда или в сторону их уменьшения, и четного или нечетного количества членов последовательности $[b_1, b_2, \dots, b_{n-1}, b_n]$ для исходной дроби, мы должны находить либо короткий потомок, либо длинный.

Потомки равны

$$\frac{P_s}{Q_s} = \frac{P_{\text{исх}} + P_{\text{отд}}}{Q_{\text{исх}} + Q_{\text{отд}}} \quad \text{и} \quad \frac{P_l}{Q_l} = \frac{2P_{\text{исх}} - P_{\text{отд}}}{2Q_{\text{исх}} - Q_{\text{отд}}}. \quad (24)$$

Согласно (24), для отыскания любого из потомков исходной дроби необходимо лишь знать её последнюю промежуточную дробь. Для этого достаточно использовать алгоритм приближения действительного числа дробью Фарея, приведенный на рис. 1

В зависимости от направления поиска и четности числа элементов в записи исходной дроби, необходимо находить значение длинного или короткого потомка. Рассмотрим случаи, когда знаменатель полученного потомка больше порядка ряда Фарея и когда меньше или равен порядку ряда. В обоих случаях потомок будет являться медиантой исходной дроби и дроби, являющейся отдаленным предшественником исходной. В первый случае ($Q_{\text{пот}} > k$) искомая дробь однозначно равна

$$\frac{P}{Q} = \frac{P_{\text{пот}} - P_{\text{исх}}}{Q_{\text{пот}} - Q_{\text{исх}}}. \quad (25)$$

Во втором случае ($Q_{\text{пот}} \leq k$) искомая дробь однозначно выражается формулой

$$\frac{P}{Q} = \frac{nP_{\text{исх}} + P_{\text{пот}}}{nQ_{\text{исх}} + Q_{\text{пот}}},$$

где $n = \text{ent}\left(\frac{k - Q_{\text{пот}}}{Q_{\text{исх}}}\right).$ (26)

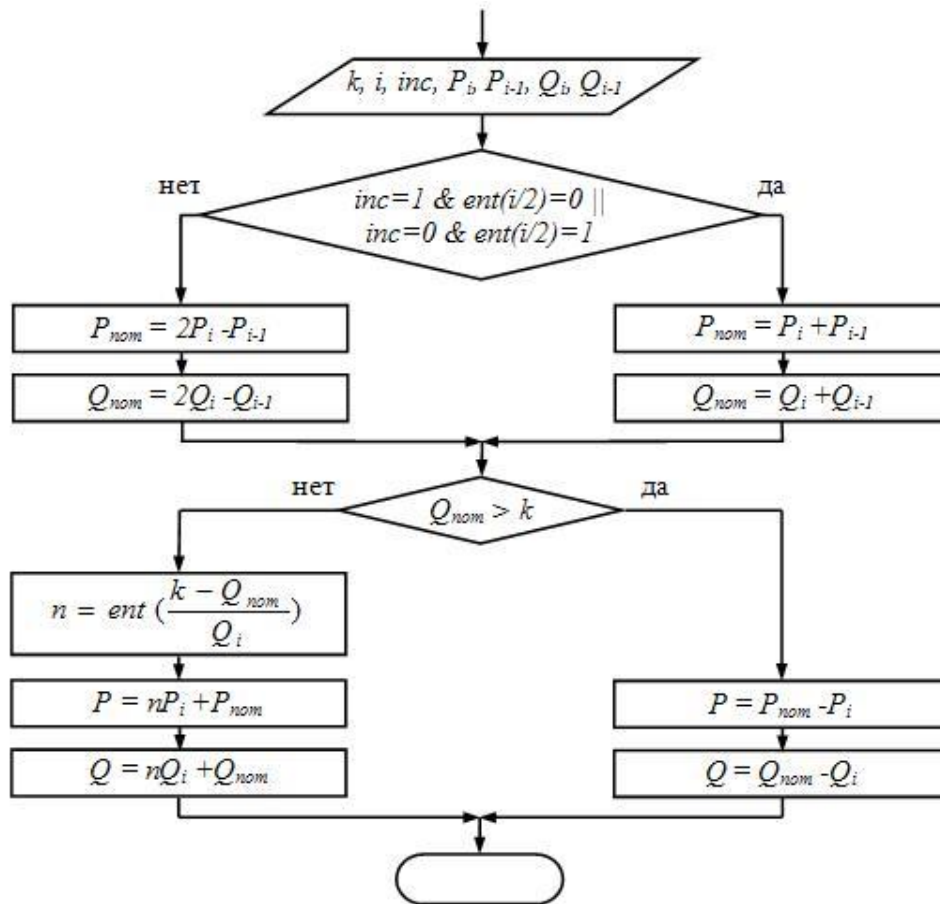


Рис. 4. Алгоритм поиска следующей дроби Фарея

Оценка алгоритмической и вычислительной сложности. Для оценки быстродействия предложенных алгоритмов будем использовать два критерия: алгоритмическую и вычислительную сложности алгоритмов.

Под алгоритмической сложностью будем понимать количество циклов в алгоритме без детализации сложности реализации алгоритма для каждой ветки цикла.

Под вычислительной сложностью понимаются условные затраты на получение результата, приведенного к такту условного процессора. Для получения такой оценки необходимо знать процессорные затраты на реализацию основных операций и функций, выраженных в тактах процессора.

Алгоритмическая сложность. Она определяется затратами на выполнение циклических операций. Для алгоритмов полного перебора комбинационных частот для оптимистической оценки [9] будет равна

$$N_n = 3(k+1)^2.$$

Число итераций алгоритма на основе синтеза полного ряда Фарея [9] составляет

$$N_\Phi = 3(k+1)^2/\pi^2.$$

Из предыдущих выражений следует, что решение задачи анализа комбинационных составляющих путем полного перебора и на основе рядов Фарея составляет около одного порядка и не зависит от индекса ряда Фарея и соответственно от порядка учитываемых комбинационных частот (это две взаимосвязанные величины согласно[9]).

Оценим алгоритмическую эффективность решения задачи анализа комбинационных составляющих с использованием подхода на основе синтеза последовательности Фарея [6] и

подхода, использующего алгоритм на основе цепных дробей и теоремы Фарея-Коши. Для этого достаточно сравнить количество итераций предложенного подхода (5), (17) с числом членов последовательности Фарея [6]:

$$\Theta = \frac{N_n}{N_1 + N_2} = \frac{3(k+1)^2}{\pi^2(k + 2\log_2 k)}.$$

Это выражение показывает, что эффективность использования подхода, изложенного в данном параграфе, повышается с увеличением индекса последовательности Фарея, а, следовательно, и порядка учитываемых комбинационных частот P . Кроме того, эта формула не учитывает затрат времени на синтез самой последовательности Фарея. Следовательно, общая эффективность решения задач с использованием предлагаемого метода будет значительно выше приведенной оценки. На рис. 5 представлены зависимости алгоритмической сложности решения задачи анализа комбинационных составляющих от индекса k ряда Фарея при использовании разных алгоритмов.

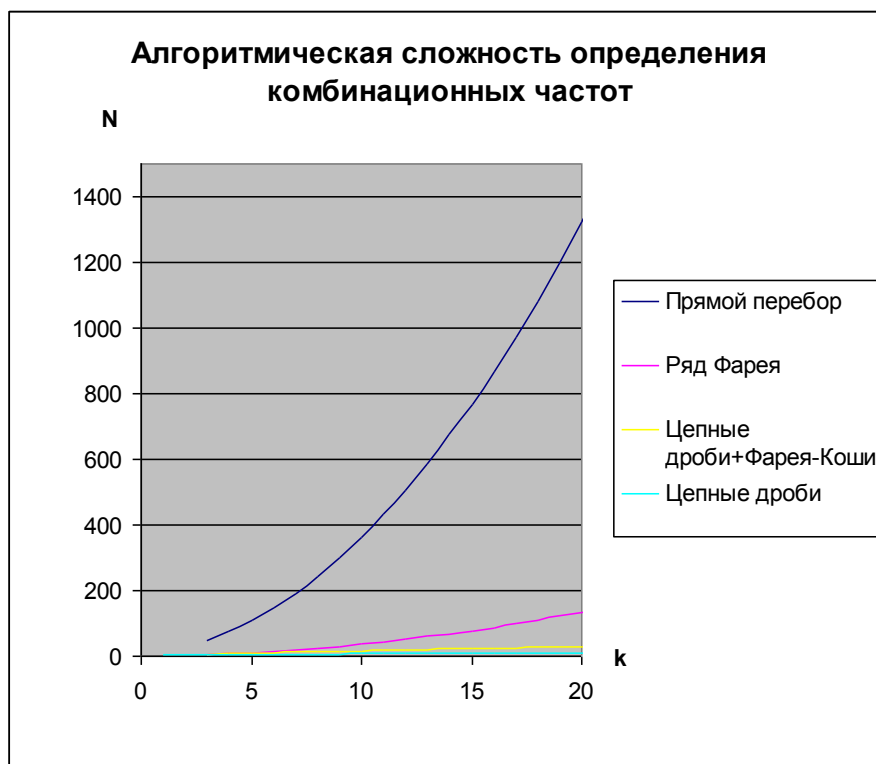


Рис. 5. Алгоритмическая сложность алгоритмов от порядка учитываемых комбинационных частот

Эффективность алгоритма на основе цепных дробей по сравнению с алгоритмом полного перебора для $k=30$ составляет около 300, а на основе цепных дробей и теоремы Фарея-Коши - около 70.

Вычислительная сложность. Для её оценки будем учитывать три основных категории операций и функций, которые выполняет условный процессор, и определим их вычислительные затраты:

1) на операции суммирования, вычитания и вычисления целых частей – $A = n_A * t$, где n_A – количество тактов процессора на выполнение одной операции типа суммирования; t – время одного такта процессора;

2) операции умножения, деления и расчет целочисленного остатка от деления двух чисел – $M = n_M * t$, где n_M – количество тактов процессора на выполнение одной операции типа умножения;

3) операции присваивания – $S = n_S * t$, где n_S – количество тактов процессора на выполнение одной операции типа присваивания.

Определим вычислительную сложность всех предлагаемых алгоритмов анализа комбинационных составляющих и найдем наиболее эффективный алгоритм. Однако критерий – вычислительная сложность – зависит от типа процессора и особенностей его архитектуры. Разбивка типов операций и их затраты по тактовому времени для каждого процессора выполняются индивидуально.

Максимальная вычислительная сложность алгоритма на основе цепных дробей (рис. 1) равна

$$V_1 = N_1(10S + 3M + 5A) + 2S.$$

Максимальная вычислительная сложность алгоритмов на основе теоремы Фарей-Коши (рис. 2 и 3) равна

$$V_2 = N_2(S + M + A) + 4S + 4A + 6M.$$

Максимальная вычислительная сложность алгоритма на основе только цепных дробей (рис. 5) равна

$$V_3 = N_1(10S + 3M + 5A) + 7S + 7A + 4M.$$

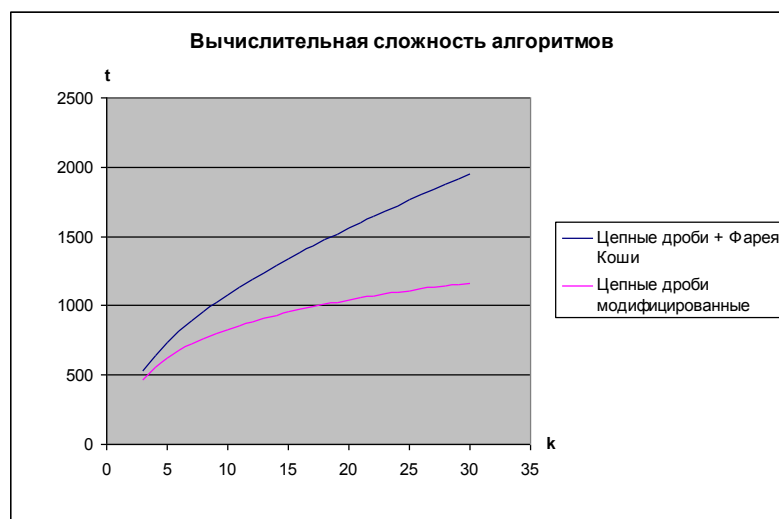


Рис. 6. Связь вычислительной сложности алгоритмов с порядком учитываемых комбинационных частот

Анализ вычислительной сложности алгоритмов на основе цепных дробей – теоремы Фарей-Коши и модифицированного алгоритма цепных дробей показывает, что модифицированный алгоритм цепных дробей обладает большей эффективностью и для $k=5$ составляет 20%, а для $k=30$ составляет 70%.

Вывод

В статье предложены и реализованы методики поиска двойного диафантового приближения комбинационных составляющих в ряде Фарей произвольного порядка и приведены сравнительные характеристики их эффективностей.

Библиографический список

1. Манассевич, В. Синтезаторы частоты (теория и проектирование): [пер. с англ.] / В. Манассевич; под ред. А.С. Галина. – М.: Связь, 1979. – 384 с.

2. **Лобенштейн.** Номограмма для расчета значений комбинационных частот // Электроника, 1973. Т. 46. № 16. С 26–29.
3. **Gandhi, D.** Mixer Spur Analysis with Concurrently Swept LO, RF and IF / D. Gandhi, C. Lyons // Tools and Techniques. Vol. 46. No. 5. May 2003. P. 212.
4. **Шарапов, Ю.И.** Преобразование сигнала без комбинационных частот / Ю.И. Шарапов, Г.М. Крылов, Ю.П. Пантелеев. – М.: ИПРЖР, 2001. – 288 с.
5. **Шарапов, Ю.И.** Преобразование сигнала без комбинационных частот в специальных приемниках / Ю.И. Шарапов. – М.: Изд-во «САЙНС-ПРЕСС», 2009. – 256 с.
6. **Бухштаб, А.А.** Теория чисел / А.А. Бухштаб. – М.: Учпедгиз, 1960. – 375 с.
7. **Шмидт, В.** Диофантовы приближения / В. Шмидт. – М.: Мир, 1983. – 232 с.
8. **Хинчин, А.Я.** Цепные дроби / А.Я. Хинчин. – М.: Наука, 1978. – 112 с.
9. **Логинов, В.И.** Номограмма комбинационных частот - алгоритмический подход / В.И. Логинов, С.А. Маркова // Радиотехника. 1989. № 1. С. 44–46.
10. Логинов В.И. Программа расчета номограммы комбинационных частот http://www.vgavt-nnov.ru:100/informatika/downloads.php?cat_id=1&download_id=10 (дата обращения: 25.12.2009).
11. **Шредер, М.** Фракталы, хаос, степенные ряды. Миниатюры из бесконечного рая / М. Шредер. – Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. – 528 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

P.I. Grushin, V.I. Loginov, N.P. Yampurin

COMPARATIVE CHARACTERISTICS OF ALGORITHMS FOR COMPUTATION OF COMBINATIONAL COMPONENTS BASED ON THE FAREY SERIES

We give a comparative performance characteristic of algorithms for calculating the combinational components appearing in a nonlinear frequency conversion based on Farey series. We analyze the computational cost of algorithms without synthesis of full Farey series, which allows to solve problems of analysis of affection with combinational frequencies by analyzing only the components closest to the operating frequencies of the systems of nonlinear frequency conversion being considered.

Key words: frequency conversion, combinational components, infinite fractions, Farey series.

УДК 621.372.8

Н.А. Новоселова¹, С.Б. Раевский¹, А.А. Титаренко²

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК РАСПРОСТРАНЕНИЯ СИММЕТРИЧНЫХ ВОЛН КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА С РАДИАЛЬНО-НЕОДНОРОДНЫМ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ЗАПОЛНЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ФНПЦ Научно-исследовательский институт измерительных систем им. Ю.Е. Седакова²

Предлагается метод расчета характеристик распространения волн круглого экранированного волновода с радиально-неоднородным диэлектрическим заполнением. Приводятся результаты расчета.

Ключевые слова: волновод, симметричные волны, диэлектрическое заполнение.

Введение

Круглые неоднородно заполненные волноводы, обладая рядом уникальных особенностей (аномальная дисперсия, комплексные волны, комплексный резонанс [1, 2]), находят [3-6] широкое применение при построении таких СВЧ – устройств, как аттенуаторы, линии задержки, полосовые фильтры, резонаторы для спектроскопов и т.д. Расчет и оптимизация параметров таких устройств требуют развития численно-аналитических методов исследования волноводов с произвольным диэлектрическим заполнением. Возможность расчета характеристик волноводов с заполнением, описываемым произвольными аналитическими функциями, позволяет ставить задачи параметрического синтеза, нацеленные на реализацию устройств с заданными характеристиками. Кроме того, алгоритмы расчета неоднородно заполненных круглых волноводов могут быть использованы при исследовании градиентных волоконных световодов [7].

Постановка задачи

В настоящей работе для расчета неоднородно заполненного круглого экранированного волновода предлагается использовать модификацию метода Галеркина [8,9].

Рассмотрим задачу о распространении симметричных Е и Н-волн в круглом экранированном волноводе с частичным диэлектрическим заполнением, значение диэлектрической проницаемости которого произвольным образом зависит от радиальных координат ($\varepsilon(r, \varphi, z) = \varepsilon(r)$) (рис. 1). Значение магнитной проницаемости полагается величиной постоянной.

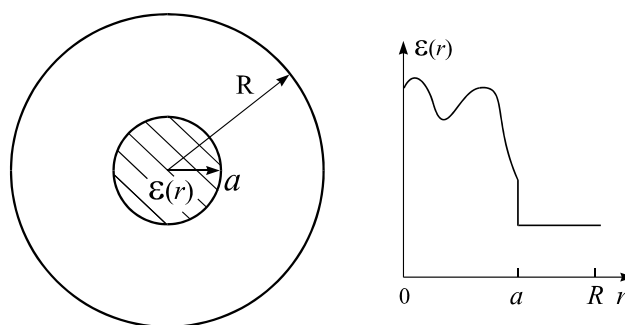


Рис.1. Функция распределения диэлектрической проницаемости в поперечном сечении волновода

Из уравнений Максвелла получаем:

$$\text{rot rot } \vec{E} = k_0^2 \varepsilon(r, \varphi) \vec{E}. \quad (1)$$

Используя соотношения:

$$\text{grad}(\psi) = \vec{r} \frac{\partial \psi}{\partial r} + \vec{\varphi} \frac{1}{r} \frac{\partial \psi}{\partial \varphi} + \vec{z} \frac{\partial \psi}{\partial z};$$

$$\text{div}(\vec{E}) = \frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial E_z}{\partial z};$$

$$\text{rot}(\vec{E}) = \vec{r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{\partial E_\varphi}{\partial z} \right) + \vec{\varphi} \left(\frac{\partial E_r}{\partial z} + \frac{\partial E_z}{\partial r} \right) + \vec{z} \left(\frac{\partial E_\varphi}{\partial r} + \frac{1}{r} E_\varphi - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} \right),$$

уравнение (1) в компонентах цилиндрической системы координат записываем:

$$\text{rot rot}(\vec{E}) \Big|_{\vec{r}} = \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r \partial \varphi} + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r \partial z} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_r}{\partial \varphi^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial E_\varphi}{\partial \varphi} - \frac{\partial^2 E_r}{\partial z^2} = k_0^2 \varepsilon(r, \varphi) E_r; \quad (1a)$$

$$\text{rot rot}(\vec{E}) \Big|_{\vec{\varphi}} = \frac{1}{r^2} E_\varphi + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_r}{\partial r \partial \varphi} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi \partial z} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2} = k_0^2 \varepsilon(r, \varphi) E_\varphi; \quad (1b)$$

$$\text{rot rot}(\vec{E}) \Big|_{\vec{z}} = \frac{\partial^2 E_r}{\partial r \partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial \varphi \partial z} - \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \varphi^2} = k_0^2 \varepsilon(r, \varphi) E_z. \quad (1c)$$

Поля волн направляющей структуры представим в виде разложений по собственным функциям краевых задач Дирихле и Неймана для однородно заполненного круглого волновода. Связь между компонентами электрического поля устанавливается через коэффициенты рядов разложений, подставляемых в (1).

Симметричные Н-волны

В отсутствие угловой зависимости поля, полагаем $\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0$, $H_\varphi = 0$, $E_r = 0$, $E_z = 0$. В

этом случае уравнения (1) сведутся к единственному уравнению относительно $\vec{\varphi}$ -компоненты электрического поля:

$$\frac{1}{r^2} E_\varphi - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial z^2} = k_0^2 \varepsilon(r) E_\varphi.$$

Записывая $E_\varphi(r, \varphi, z) = E_\varphi(r, \varphi) \cdot e^{-i\beta z}$, получаем уравнение относительно функции поперечных координат:

$$\frac{\partial^2 E_\varphi}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_\varphi}{\partial r} - \frac{1}{r^2} E_\varphi + (k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2) E_\varphi = 0. \quad (2)$$

Решение уравнения (2) будем [1, 2] искать в виде

$$E_\varphi(r) = \sum_{n=0}^N b_n J_1(\alpha_n r), \quad (3)$$

где коэффициенты α_n определяются из уравнения $J_1(\alpha_n R) = 0$ (так как $E_\varphi(R) = 0$).

Подставив (3) в (2), получаем

$$-\sum_{n=0}^N b_n \cdot \left[\frac{\partial^2 J_1(\alpha_n r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_1(\alpha_n r)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} J_1(\alpha_n r) \right] = \sum_{n=0}^N b_n k_0^2 \varepsilon(r) J_1(\alpha_n r) - \sum_{n=0}^N b_n \beta^2 J_1(\alpha_n r).$$

Учитывая, что

$$\frac{\partial^2 J_1(\alpha_n r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_1(\alpha_n r)}{\partial r} - \frac{1}{r^2} J_1(\alpha_n r) = -\alpha_n^2 J_1(\alpha_n r),$$

получаем

$$\sum_{n=0}^N b_n (\alpha_n^2 + \beta^2) J_1(\alpha_n r) = \sum_{n=0}^N b_n k_0^2 \varepsilon(r) J_1(\alpha_n r). \quad (4)$$

Умножив обе части уравнения (4) на $rJ_1(\alpha_q r)$ и проинтегрировав в пределах $r \in [0; R]$, получаем уравнение:

$$(\alpha_q^2 + \beta^2) \Gamma_q \cdot b_q = \sum_{n=0}^N b_n k_0^2 \int_0^R \varepsilon(r) r J_1(\alpha_n r) J_1(\alpha_q r) dr. \quad (5)$$

Здесь использовалось условие ортогональности функций Бесселя:

$$\int_0^R r J_1(\alpha_n r) J_1(\alpha_q r) dr = \begin{cases} \Gamma_q, & q = n, \\ 0, & q \neq n, \end{cases}$$

где $\Gamma_q = 0.5R^2 J_0^2(\alpha_n R)$.

Уравнение (5) можно представить в матричном виде:

$$I \cdot b = T \cdot b, \quad (6)$$

$$\text{где } I_{q,n} = \begin{cases} (\alpha_q^2 + \beta^2) \Gamma_q, & q = n, \\ 0, & q \neq n, \end{cases} \quad T_{q,n} = k_0^2 \int_0^R \varepsilon(r) r J_1(\alpha_n r) J_1(\alpha_q r) dr.$$

Записав уравнение (6) в виде $(I - T) \cdot b = 0$ и приравняв определитель матрицы $(I - T)$ нулю, получаем дисперсионное уравнение для симметричных Н-волн, распространяющихся в круглом волноводе с произвольной зависимостью ε от r :

$$\text{Det}(\beta) = |I - T| = 0. \quad (7)$$

Отметим, что матрица T не зависит от β , поэтому при решении дисперсионного уравнения (7) она вычисляется лишь один раз, что существенно сокращает время поиска корней дисперсионного уравнения. Заметим, что при выводе уравнений (6), (7) никаких ограничений на вид зависимости $\varepsilon(r)$ не накладывалось, т.е. данный метод позволяет рассчитывать симметричные Н-волны при совершенно произвольном характере изменения диэлектрической проницаемости по поперечной координате, при этом ε может быть и комплексной величиной, что позволяет, например, рассчитывать волноводы со сложным распределением поглощения в поперечном сечении.

Симметричные Е-волны

Для симметричных Е-волн полагаем:

$$\frac{\partial}{\partial \varphi} = 0, \quad E_\varphi = 0, \quad H_r = H_z = 0.$$

При этом уравнения (1) перейдут в систему двух уравнений:

$$\begin{aligned} i\beta \frac{\partial E_z}{\partial r} + (k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2) E_r &= 0; \\ i\beta \frac{\partial E_r}{\partial r} + i\beta \frac{1}{r} E_r + \frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + k_0^2 \varepsilon(r) E_z &= 0. \end{aligned}$$

Для избавления от мнимых чисел введем переменную $\tilde{E}_z = i\beta E_z$,

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tilde{E}_z}{\partial r} + (k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2) E_r &= 0; \\ \frac{\partial^2 \tilde{E}_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial \tilde{E}_z}{\partial r} + k_0^2 \varepsilon(r) \tilde{E}_z - \beta^2 \left(\frac{\partial E_r}{\partial r} + \frac{1}{r} E_r \right) &= 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Граничные условия на идеально проводящей поверхности для тангенциальной и нормальной компонент электрического поля $E_r|_S = 0$, $\frac{\partial E_n}{\partial n}|_S = 0$ [10] в данном случае приводят к уравнению:

$$E_z|_{r=R} = 0. \quad (9)$$

Компоненты электрического поля будем искать в виде:

$$\tilde{E}_z = \sum_{n=0}^N A_n J_0(\alpha_n r), \quad E_r = \sum_{m=0}^N B_m J_1(\alpha_m r). \quad (10)$$

С учетом граничного условия (9) коэффициенты α_n определяются уравнением $J_0(\alpha_n R) = 0$.

Подставив (10) в (8), получаем систему двух функциональных уравнений:

$$\begin{aligned} -\sum_{n=0}^N A_n \alpha_n J_1(\alpha_n r) + \sum_{m=0}^N B_m (k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2) J_1(\alpha_m r) &= 0, \\ \sum_{n=0}^N A_n \left(\frac{\partial^2 J_0(\alpha_n r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_0(\alpha_n r)}{\partial r} + k_0^2 \varepsilon(r) J_0(\alpha_n r) \right) - \beta^2 \sum_{m=0}^N B_m \left(\frac{\partial J_1(\alpha_m r)}{\partial r} + \frac{1}{r} J_1(\alpha_m r) \right) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

С учетом равенств

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 J_0(\alpha_n r)}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial J_0(\alpha_n r)}{\partial r} &= -\alpha_n^2 J_0(\alpha_n r); \\ \frac{\partial J_1(\alpha_m r)}{\partial r} &= \alpha_m J_0(\alpha_m r) - \frac{1}{r} J_1(\alpha_m r) \end{aligned}$$

систему (11) можно переписать в виде:

$$-\sum_{n=0}^N A_n \alpha_n J_1(\alpha_n r) + \sum_{m=0}^N B_m (k_0^2 \varepsilon(r) - \beta^2) J_1(\alpha_m r) = 0, \quad (12a)$$

$$\sum_{n=0}^N A_n (k_0^2 \varepsilon(r) - \alpha_n^2) J_0(\alpha_n r) - \beta^2 \sum_{m=0}^N B_m \alpha_m J_0(\alpha_m r) = 0. \quad (12б)$$

Умножая уравнение (12a) на $rJ_1(\alpha_q r)$, а уравнение (12б) на $rJ_0(\alpha_q r)$ и интегрируя в пределах $r \in [0; R]$, получаем систему уравнений:

$$-A_q \alpha_q \Gamma_q + k_0^2 \sum_{m=0}^N B_m \int_0^R r \varepsilon(r) J_1(\alpha_m r) J_1(\alpha_q r) dr - B_q \beta^2 \Gamma_q = 0, \quad (13)$$

$$k_0^2 \sum_{n=0}^N A_n \int_0^R r \varepsilon(r) J_0(\alpha_n r) J_0(\alpha_q r) dr - A_q \alpha_q^2 \Gamma_q - B_q \beta^2 \alpha_q \Gamma_q = 0.$$

Здесь использовались условия ортогональности функций Бесселя

$$\int_0^R r J_0(\alpha_n r) J_0(\alpha_q r) dr = \int_0^R r J_1(\alpha_n r) J_1(\alpha_q r) dr = \begin{cases} \Gamma_q, & q = n, \\ 0, & q \neq n, \end{cases}$$

где $\Gamma_q = \frac{R^2}{2} J_1^2(\alpha_q R)$.

Систему уравнений (13) можно записать в матричном виде:

$$\begin{bmatrix} T^{(0,0)} & T^{(0,1)} \\ T^{(1,0)} & T^{(1,1)} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} A \\ B \end{bmatrix} = 0, \quad (14)$$

где $T_{q,m}^{(0,0)} = -\alpha_q \Gamma_q \delta_{q,m}$,

$$T_{q,m}^{(0,1)} = k_0^2 \int_0^R r \varepsilon(r) J_1(\alpha_m r) J_1(\alpha_q r) dr - \beta^2 \Gamma_q \delta_{q,m}, \tag{15}$$

$$T_{q,n}^{(0,0)} = k_0^2 \int_0^R r \varepsilon(r) J_0(\alpha_n r) J_0(\alpha_q r) dr - \alpha_q^2 \Gamma_q \delta_{q,m},$$

$$T_{q,m}^{(1,1)} = -\beta^2 \alpha_q \Gamma_q \delta_{q,m},$$

$\delta_{q,n}$ - символ Кронекера.

Приравнивая определитель матричного уравнения (14) нулю, получаем дисперсионное уравнение, описывающее Е-волны круглого волновода с произвольным радиальным диэлектрическим заполнением.

Реализация алгоритма

Двухслойный экранированный волновод

В качестве примера проведем с помощью уравнений (7), (14) расчет простейшей тестовой структуры – круглого волновода с однородным диэлектрическим стержнем (т.е. $\varepsilon(r) = \varepsilon = \text{const}$, рис. 2) и сравним результаты с полученными классическим методом частичных областей (МЧО).

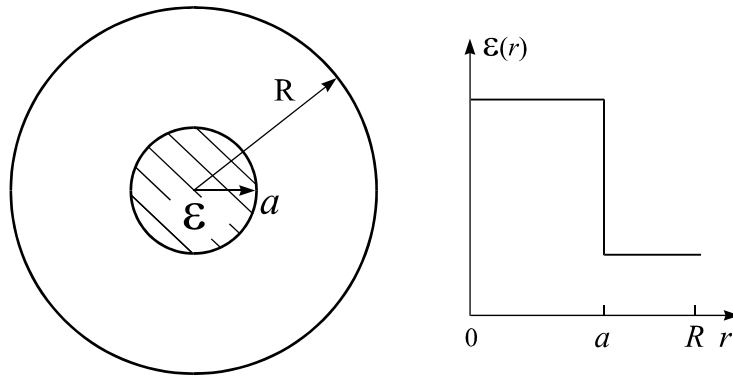


Рис. 2. Круглый волновод с диэлектрическим стержнем

Расчеты проводились для волновода с параметрами: $R = 20$ мм, $a = 10$ мм, $\varepsilon = 3$, на частоте $f = 10$ ГГц. Классический метод расчета дает следующие результаты: для Н-волн $\beta_H = 237.68916 \text{ м}^{-1}$, для Е-волн $\beta_E = 227.55000 \text{ м}^{-1}$.

Расчет тестовых структур с использованием предложенной методики выполнялся при подстановке функции $\varepsilon(r) = \begin{cases} 3, & r \leq a \\ 1, & a < r \leq R \end{cases}$ в уравнения (6) и (14).

Сходимость решений, получаемых модифицированным методом Галеркина для Е и Н-волн, представлена в табл. 1 и на рис. 3.

Таблица 1

№ п/п	Е-волны ($\beta_E = 227.5500 \text{ м}^{-1}$)	Н-волны ($\beta_H = 237.6892 \text{ м}^{-1}$)
1	2	3
1	233.1366	234.7509
2	234.3096	236.5369
3	232.3624	237.2738
4	231.8978	237.4027

Окончание табл. 1

1	2	3
5	230.9273	237.5506
6	230.7095	237.5777
7	230.1335	237.6259
8	230.0207	237.6347
9	229.6397	237.655
10	229.5748	237.6586
11	229.304	237.6686
12	229.2637	237.6704
13	229.0613	237.6758
14	229.0347	237.6768
15	228.8776	237.6800

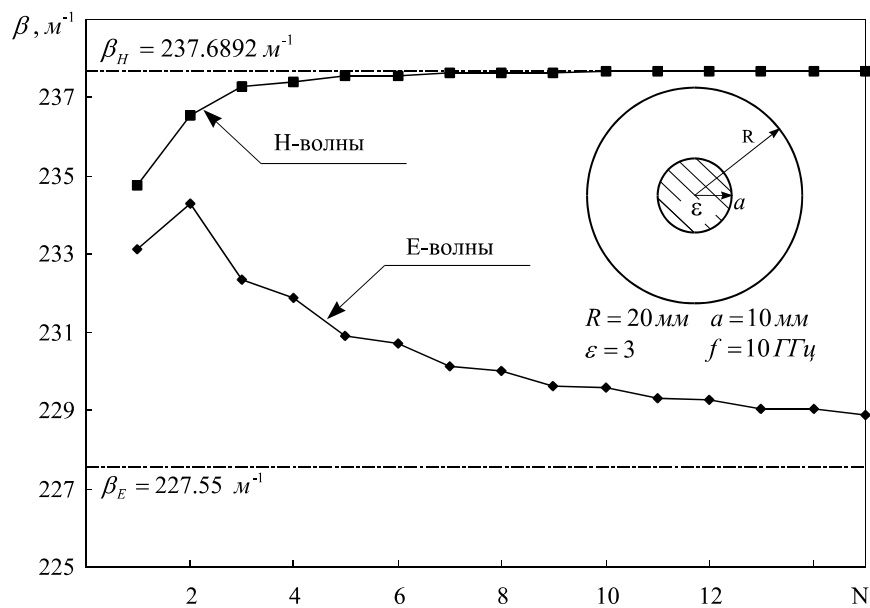


Рис. 3. Сходимость по интегральной характеристике

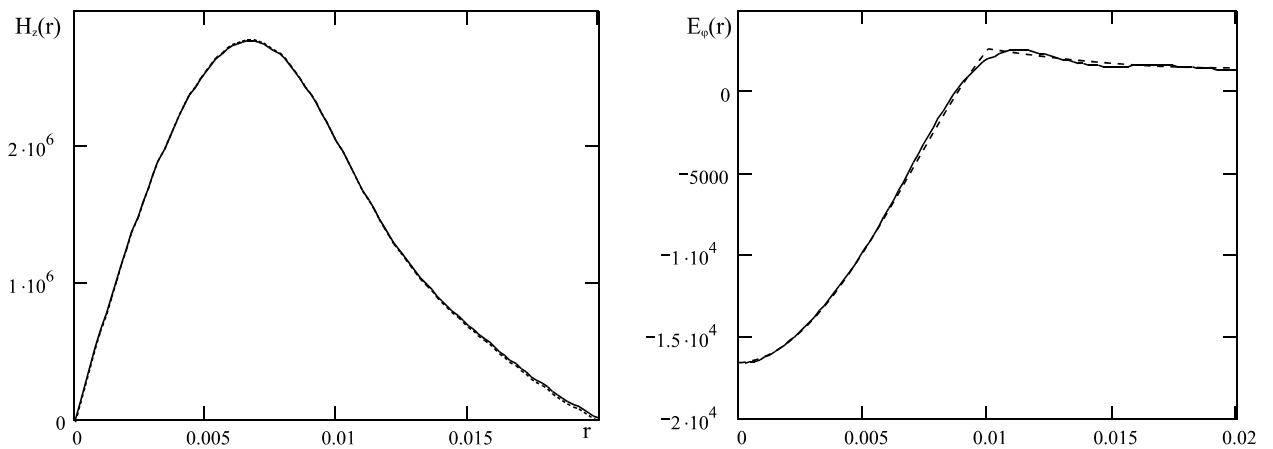


Рис. 4. Распределение поля Н-волны:

----- - МЧО; _____ - ММГ

Из табл. 1 и рис. 3 видно, что сходимость ММГ является монотонной и наступает достаточно быстро (уже при $N=5$ разница между продольными волновыми числами не превышает

ет 1.5 %). Из рис. 3 также видно, что в случае Н-волн сходимость наступает быстрее, что, по-видимому, связано с разницей в числе решаемых уравнений (одно уравнение (2) для Н-волн и два уравнения (8) – для Е-волн).

На рис. 4 пунктирной линией приведены зависимости компонент поля H_z и E_φ от координаты r , рассчитанные для Н-волны при $N=5$.

Из графиков видно, что распределения полей, рассчитанные различными методами, практически совпадают, что подтверждает корректность предлагаемого метода.

Волновод с градиентным диэлектрическим заполнением

На основе уравнений (15) выполнен расчет дисперсионных характеристик Е-волн, распространяющихся в круглом волноводе с частичным диэлектрическим заполнением, проницаемость которого изменяется по параболическому закону, описываемому уравнением

$$\varepsilon(r) = \begin{cases} \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a^2} r^2, & r \leq a \\ 1, & a < r \leq R \end{cases} .$$

Подставив данное выражение в (15) и рассчитав интегралы

(численно или аналитически), получаем решение дисперсионной задачи. Отметим, что для любого $\varepsilon(r)$ расчет интегралов из (15) проводится лишь один раз, поскольку они не зависят ни от частоты, ни от продольной постоянной распространения, а определяются только параметрами заполнения. Это является безусловным достоинством данного метода, позволяющим существенно сократить время расчета структуры.

Результаты расчета дисперсионных характеристик Е-волн круглого волновода с параболическим профилем диэлектрического заполнения представлены на рис. 5.

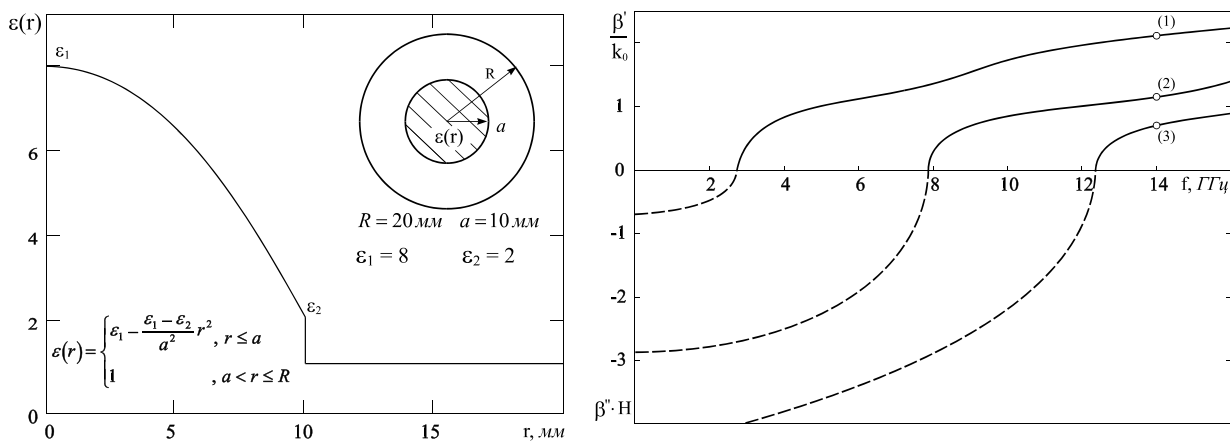


Рис. 5. Дисперсионные характеристики Е-волн круглого волновода с параболическим профилем диэлектрического заполнения

На основе уравнений (6), (7) выполнен расчет структуры в виде круглого волновода с частичным диэлектрическим заполнением, проницаемость которого линейно изменяется (рис. 6) по радиальной координате в пределах $r \in [0 \div a]$.

Расчеты проводились для волновода с параметрами: $R = 20$ мм, $a = 10$ мм, $\varepsilon(R) = \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{a} r$, $\varepsilon_1=6$, $\varepsilon_2=2$ частота $f=10$ ГГц.

Для сравнения проведем расчет той же самой структуры, представив линейный профиль диэлектрической проницаемости в виде ступенчатой аппроксимации (рис. 6), число ступенек при этом примем равным 20. Результаты расчета распределения поля, полученного на основе решения дисперсионного уравнения, представлены на рис. 7. Результаты расчетов,

выполненных по предлагаемой методике и с помощью МЧО, совпадают с графической точностью.

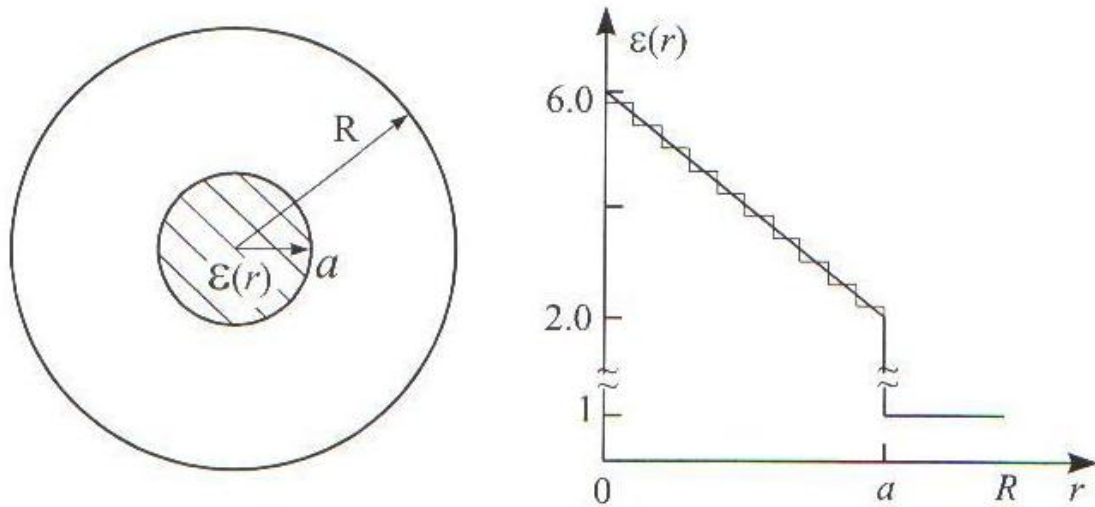


Рис. 6. Функция диэлектрической проницаемости

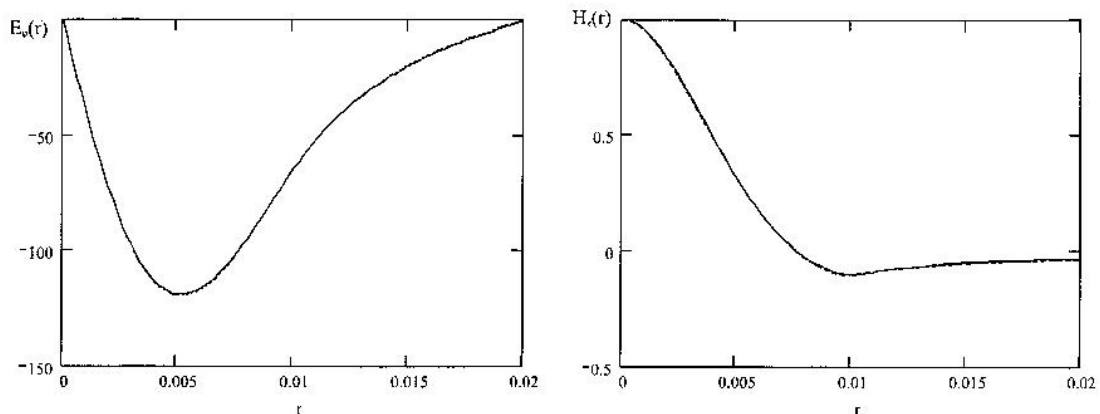


Рис. 7. Результаты расчета распределения поля

Выводы

1. Предложен метод расчета характеристик симметричных волн цилиндрического волновода с осесимметричным диэлектрическим заполнением, имеющим произвольную зависимость $\varepsilon(r)$. Метод является модификацией метода Галеркина, в которой вариационная процедура применяется к функциональным соотношениям, следующим непосредственно из уравнений Максвелла.

2. На примере трех краевых задач подтверждены корректность и эффективность предложенного метода.

3. Метод является альтернативным по отношению к МЧО в тех случаях, когда последний требует многоступенчатой аппроксимации функции диэлектрического заполнения, и может быть распространен на все волноводы с координатными экранирующими поверхностями.

Библиографический список

1. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988. – 248 с.

2. **Раевский, А. С.** Неоднородные направляющие структуры, описываемые несамосопряженными операторами / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2004. – 110 с.
3. **Раевская, О.И.** Предельный аттенуатор на основе круглого двухслойного волновода / О.И. Раевская, В.А. Калмык, Ю.А. Горячев // Изв. Вузов СССР. Радиоэлектроника. 1975. №2. С. 104–106.
4. **Горячев, Ю.А.** Предельные аттенуаторы с малым начальным ослаблением / Ю.А. Горячев, О.И. Раевская // Техника средств связи. Сер. РТ, 1977. Вып. 5(9). С. 40–43.
5. **Неганов, В.А.** Теория и применение устройств СВЧ / В.А. Неганов, Г.П. Яровой. – М.: Радио и связь, 2006. – 719 с.
6. **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. – М.: Радиотехника, 2007. – 200 с.
7. **Унгер, Х.Г.** Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.Г. Унгер. – М.: Мир, 1988. – 656 с.
8. **Раевский, С.Б.** Приближенный метод расчета дисперсии волн в волокне с периодическим изменяющимся вдоль оси показателем преломления / С.Б. Раевский, А.А. Смирнов // Антенны. 2004. №1(8). С. 31–35.
9. **Раевский, С.Б.** Распространение электромагнитных волн в периодически-неоднородных средах / С.Б. Раевский, А.А. Смирнов, Г.И. Шишков // Антенны. 2005. №5(96). С. 64–72.
10. **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. – М.: Радио и связь, 2005. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

N.A. Novoselova, S.B. Raevskiy, A.A. Titarenko

CALCULATION OF CHARACTERISTICS OF SYMMETRIC MODES PROPAGATING IN A CIRCULAR WAVEGUIDE WITH RADIALY-HETEROGENEOUS DIELECTRIC FILLING

The method of calculation of characteristics of modes propagating in a circular shielded waveguide with radially-heterogeneous dielectric filling is introduced. The results of the calculation are presented.

Key words: waveguide, symmetric wave, dielectric filling.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.951

А.А. Абрашкин¹, Е.М. Громов², В.В. Тютин²

СПЕКТР ИДЕАЛЬНОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

Институт прикладной физики Российской академии наук¹,
Государственный университет – Высшая школа экономики, Нижегородский филиал²

Система уравнений для средней скорости и напряжений Рейнольдса рассматривается в предположении малости процессов диффузии, релаксации и вязкости. Такое состояние турбулентности названо идеальным. Показано, что соответствующий ему спектр имеет форму спектра абсолютно черного тела.

Ключевые слова: турбулентность, квазичастицы.

Спектральная плотность энергии турбулентности как функция волнового числа возмущений (или их частоты) представляет несимметричную колоколообразную кривую, спадающую на бесконечности. Она находится из эксперимента. Традиционно на ней выделяют три основных участка [1]. Длинноволновый, соответствующий энергосодержащим вихрям, коротковолновый, где преобладает диссипация, и промежуточный – инерционный, в границах которого как раз и осуществляется процесс передачи энергии от крупных вихрей более мелким. Границы инерционного интервала определяются неравенством $\lambda_0^{-1} \gg k \gg L^{-1}$, где λ_0 – внутренний масштаб турбулентности; L – ее внешний масштаб турбулентности; k – волновое число. В области $k > \lambda_0^{-1}$ происходит диссипация кинетической энергии. Для инерционного интервала построена математическая теория, основанная на анализе размерностей. Она восходит к работам А.Н. Колмогорова и в настоящее время подтверждена во многих экспериментах. Участок спектральной кривой, соответствующий инерционному интервалу, описывается законом Обухова – Колмогорова.

Длинноволновая область спектра удовлетворяет условию $\lambda_0^{-1} \gg k > L^{-1}$. Она существенно шире инерционного интервала. В качестве характерных пространственных масштабов, присущих ей, можно указать размер энергосодержащих вихрей k_*^{-1} , соответствующий максимуму спектральной кривой. Если инерционная подобласть спектра характеризуется интенсивным взаимодействием вихрей, то длинноволновым вихрям это присуще в значительно меньшей степени. Вязкость на них влияет слабо. Самые крупные из них те, которые и ассоциируются со средним движением, являются анизотропными. Но по мере уменьшения пространственного масштаба вследствие эффекта растяжения вихревых трубок они становятся все более и более изотропными. Теоретические расчеты, объясняющие длинноволновую часть спектра, в принципе отсутствуют.

В настоящей работе найден спектр однородной изотропной развитой турбулентности для одного частного случая (идеальной турбулентности), когда в рамках полумпирического описания можно пренебречь вязкостью жидкости, а также диффузией и релаксацией возмущений поля скорости, то есть процессами, вносящими в систему диссипацию.

Турбулентно-электродинамическая аналогия

Систему уравнений для средней скорости течения \bar{u}_i и напряжений Рейнольдса τ_{ij} можно записать в следующем виде [2]:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_\alpha \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_\alpha} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_\alpha \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_\alpha} + \tau_{i\alpha} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_\alpha} + \tau_{j\alpha} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_\alpha} = 0. \quad (2)$$

Здесь \bar{p} - среднее давление (черта – знак осреднения). Величины индексов i, j, α “пробегают” значения 1,2,3; по повторяющимся индексам подразумевается суммирование. Все величины безразмерные. При записи системы (1), (2) предполагается, что жидкость невязкая и число Рейнольдса $Re \rightarrow \infty$. “Незамкнутые” слагаемые, входящие в уравнения (2) и описывающие эффекты диффузии и релаксации, положены равными нулю.

При отличном от нуля тензоре напряжений Рейнольдса эта система определяет состояние “идеальной” турбулентной среды. Ее решение

$$\bar{u}_i = \bar{u}_i^0 = 0; \quad \bar{p} = \bar{p}^0 = \text{const}; \quad \tau_{ij} = \tau_{ij}^0 = c^2 \delta_{ij} \quad (3)$$

соответствует неподвижной (в среднем) турбулизованной жидкости с постоянным средним давлением и однородным и изотропным распределением пульсаций скорости. Выражение для скорости c определяется равенством

$$c = \sqrt{\tau_{ii}^0/3} = \left[\left(\bar{u}_1^2 + \bar{u}_2^2 + \bar{u}_3^2 \right) / 3 \right]^{1/2}, \quad (4)$$

где u_i - пульсационные компоненты скорости.

Рассмотрим течение, соответствующее малым отклонениям от движения (3). Введем возмущения для компонент средней скорости ξ_i и тензора Рейнольдса η_{ij} , а также возмущение среднего давления $\zeta = \bar{p} - \bar{p}^0$ и подставим их в уравнения (1), (2). После пренебрежения квадратичными слагаемыми получим следующую систему уравнений

$$\frac{\partial \xi_i}{\partial x_i} = 0; \quad \frac{\partial \xi_i}{\partial t} + \frac{\partial \eta_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial \zeta}{\partial x_i} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial \eta_{ij}}{\partial t} + c^2 \left(\frac{\partial \xi_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \xi_j}{\partial x_i} \right) = 0; \quad .$$

Из второго уравнения (5) следует, что

$$\frac{\partial \eta_{\alpha\alpha}}{\partial t} + 2c^2 \frac{\partial \zeta_\alpha}{\partial x_\alpha} = \frac{\partial \eta_{\alpha\alpha}}{\partial t} = \frac{\partial \gamma}{\partial t},$$

так что $\gamma = \gamma_0(x_i)$ является функцией только пространственных координат. Будем предполагать ее заданной.

Введем векторные поля $\vec{E} = (E_i), \vec{H}$ и скаляр ρ тождествами:

$$E_i = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta_{ij} - \frac{\gamma_0}{3} \delta_{ij} \right), \quad \vec{H} = c \text{ rot } \vec{\xi}, \quad \rho = \frac{1}{4\pi} \frac{\partial}{\partial x_i} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\eta_{ij} - \frac{\gamma_0}{3} \delta_{ij} \right).$$

В результате получаем, что система уравнений (5) эквивалентна системе уравнений Максвелла:

$$\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} + \text{rot} \vec{E} = 0, \quad \text{div} \vec{H} = 0; \quad \text{div} \vec{E} = 4\pi\rho; \quad \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \text{rot} \vec{H} = 0. \quad (6)$$

Впервые на существование такой турбулентно-электродинамической аналогии для идеальной жидкости указал У. Томсон (лорд Кельвин) [3]. Этот же результат был позднее получен О.В. Трошкиным [4, 5]. Основной вывод этих работ состоит в том, что однородная изотропная турбулентная среда способна переносить связанные колебания полей ξ_i и η_{ij} .

Электромагнитное поле принято рассматривать как совокупность фотонов. Но тогда и поле возмущений однородной турбулентности можно интерпретировать как совокупность квазичастиц, каждой из которых поставлены в соответствие энергия ε_t и квазиимпульс \vec{p}_t , определяемые следующими соотношениями $\varepsilon_t = \hbar\omega$, $\vec{p}_t = \hbar\vec{k}$, \hbar - постоянная Планка [6]. Такие квазичастицы было предложено называть турбулонами. Величины энергии и квазиимпульса для них связаны равенством $\varepsilon_t = c \cdot p_t$.

Турбулоны – элементарные возмущения турбулентного поля. Они обусловлены поперечными колебаниями усредненных гидродинамических полей. Идея турбулонов является естественным следствием турбулентно-электродинамической аналогии, ее логическим развитием. Турбулоны вводятся в рассмотрение по аналогии с фотонами. Как и фотоны, они служат примером проявления корпускулярно-волнового дуализма. Их введение не противоречит классическому описанию турбулентности в рамках уравнения Навье-Стокса, а дополняет его.

Равновесный спектр ансамбля турбулонов

Примем гипотезу, что турбулентное состояние жидкости порождается ансамблем турбулонов. Поскольку все диссипативные процессы внутри жидкости отсутствуют, то полное число турбулонов в системе не меняется, и спектр является стационарным. Такая ситуация в чистом виде реализуется для сверхтекучей жидкости (кстати, для неё не вызывает никаких возражений существование квантованных возбуждений в течении). Для реальной турбулентности результаты такого подхода интересны, прежде всего, в области энергосодержащих вихрей (большие масштабы).

При принятых предположениях для описания статистики турбулонов можно воспользоваться подходом, развитым для описания равновесного теплового излучения [7]. Как и фотоны, турбулоны подчиняются статистике Бозе – Эйнштейна. Их число dQ_t , содержащееся в спектральном интервале $dv = d\omega/2\pi$, равно

$$dQ_t(v) = \frac{8\pi V}{c^3} \frac{v^2 dv}{\exp((hv - \mu)/W) - 1}, \quad (7)$$

здесь V - объем; $h = 2\pi\hbar$; μ, W - постоянные. В статистической физике $W = KT$ (K - постоянная Больцмана, T - температура), а $\mu < 0$ - химический потенциал. В нашем случае используется формальная аналогия, поэтому будем считать W и μ просто параметрами микротeorии. В теории излучения абсолютно чёрного тела число частиц фотонного газа является переменной величиной, поэтому химический потенциал полагается равным нулю [7]. Для рассматриваемого турбулонного газа число частиц Q_t постоянно, а значит, и нет необходимости накладывать дополнительное ограничение на величину μ .

Для спектра энергии $S(v)$ справедлива следующая формула:

$$S(v) = hv \frac{dQ_t}{dv} = \frac{8\pi hV}{c^3} \frac{v^3}{\exp((hv - \mu)/W) - 1}. \quad (8)$$

Следует отметить, что это соотношение определяет колоколообразную кривую, качественно соответствующую спектру реальной турбулентности. Для сопоставления закона (8) с экспериментально измеренным спектром $S^e(\nu)$ следует выбрать значения свободных параметров W, μ . Сделать это можно, например, связав значения двух спектральных функций в точках их максимума.

Пусть экспериментально найденная функция принимает максимальное значение S_{\max}^e в точке ν_{\max} . Спектр (8) также имеет максимум в ней, если выполняется условие

$$e^{\chi}(3-\chi) = e^{\mu/W}; \quad \chi = h\nu_{\max}/W. \quad (9)$$

С другой стороны, справедливо соотношение

$$\chi = \frac{\mu}{W} + \ln \left(1 + \frac{8\pi h V \nu_{\max}^3}{c^3 S_{\max}^e} \right). \quad (10)$$

Выражения (9), (10) представляют систему двух уравнений для определения двух безразмерных величин χ и μ/W . По ним уже легко находятся значения μ, W и восстанавливается вид спектра (8). Привязка к точке максимума – только один из возможных способов сравнения теоретического и экспериментального спектров. Можно, к примеру, сшивать спектр (8) с колмогоровским законом. Процедура выбора свободных констант при этом, очевидно, остается неоднозначной. Поэтому в каждом из проведенных расчетов можно будет говорить только о качественном объяснении экспериментального и теоретического спектров. Причина тому – пренебрежение эффектами диссипации. Однако совпадение с экспериментальными данными будет всегда тем точнее, чем в меньшей степени проявляются они. Это свойственно большим пространственным масштабам возмущений (малым частотам). В пределе малых частот $h\nu \ll \mu$ (длинноволновый предел) имеем:

$$S(\nu) = \frac{8\pi h V}{c^3} \frac{\nu^3}{\exp(-\mu/W) - 1}$$

или с учетом дисперсионного соотношения для турбулонов $S(k) \sim k^3$.

Необычность полученного выражения для спектра турбулентности заключается в том, что в него входит постоянная Планка. В связи с этим обратим внимание на то, что идеи квантовой механики имеют свои глубокие корни еще и в статистической физике и наряду с двумя направлениями открытия квантомеханических идей (оптико-механическая аналогия де Бройля – Шредингера и матричная модель Гейзенберга – Борна, основанная на принципе соответствия) существовала возможность третьего. Постоянная h , численное значение которой Планк нашел при изучении законов излучения, а Эйнштейн, - сравнивая с опытом свою формулу для фотоэффекта, могла бы быть найдена, например, при изучении теплоемкости газа бозонов или фермионов [8]. Вполне вероятно, что в число этих примеров со временем войдет и спектр турбулентности.

Идеальная турбулентность лишена, может быть, самого важного свойства реальных турбулентных течений - переноса энергии по спектру от больших вихрей к малым. Но ее анализ позволяет говорить о наличии у развитой турбулентности волновых свойств и открывает возможности для применения к ее исследованию волновых методов.

Библиографический список

1. **Фрост, У.** Спектральная теория турбулентности // Турбулентность: принципы и применения /под ред. У. Фроста и Т. Моулдена. – М.: Мир, 1980. С. 99–141.
2. **Монин, А.С.** Статистическая гидромеханика. Т. 1 / А.С. Монин, А.М. Яглом. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1992.
3. **Tomson, W.** On the propagation of laminar motion through a turbulently moving inviscid liquid // Philos. Mag. 1887. V. 4(47). P. 342. (Подробное изложение статьи: Уиттекер Э. История теории эфира и электричества. – Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001).

4. **Трошкин, О.В.** О распространении малых возмущений в идеальной турбулентной среде // ДАН СССР. 1989. Т. 307. № 5. С. 1072–1076.
5. **Трошкин, О.В.** О малых возмущениях турбулентных сред // Этюды о турбулентности. – М.: Наука, 1994. С. 59–74.
6. **Абрашкин, А.А.** Концепция квазичастиц в турбулентности // Нелинейный мир, 2009. Т. 7. №1. С. 3–13.
7. **Ландау, Л.Д.** Статистическая физика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1964.
8. **Румер, Ю.Б.** Термодинамика, статистическая физика и кинетика / Ю.Б. Румер, М.Ш. Рывкин. – М.: Наука, 1977.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

A.A. Abrashkin, E.M. Gromov, V.V. Tyutin

SPECTRUM OF IDEAL TURBULENCE

The system of equations for average velocity and Reynolds stresses are examined supposing the smallness of diffusive, relaxation and viscous processes. Such turbulent state is named ideal. It is shown that the spectrum of turbulence has the form of spectrum of absolutely black body.

Key words: turbulence, quasi-particles

УДК 519.6

Л.Ю. Катаева, И.Е. Белоцерковская

ЧИСЛЕННОЕ И АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ НИЗОВОГО ПОЖАРА С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ УГЛА НАКЛОНА ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Целью данной работы является получение аналитического и численного решения математической модели низового пожара с учетом влияния угла наклона подстилающей поверхности. Результаты, полученные для ровной поверхности, согласуются с результатами, полученными А.М. Гришиным, при этом результаты с равномерно наклоненной поверхностью согласуются как с известными теоретическими [2], так и с известными экспериментальными [3] данными.

Ключевые слова: математическое моделирование, лесные пожары.

Физически задача ставится следующим образом: известны скорость ветра и температура окружающей среды, геометрические, структурные и реакционные свойства полога леса, температура и размеры очага воспламенения, требуется определить зависимость скорости распространения лесного пожара от угла наклона. Для простоты анализа делаются следующие допущения:

1. Среда является серой и пятифазной, включающей в себя сухое органическое вещество, воду в жидко-капельном состоянии, коксик, золу и газовую фазу.
2. Газовая фаза состоит из кислорода, горючих компонентов продуктов пиролиза, инертных компонентов воздуха, а также водяного пара и инертных продуктов горения.
3. Градиент температуры поперек полога леса мал по сравнению с градиентом температуры в продольном направлении.

Математически эта задача с учетом представленных ранее допущений сводится к решению следующей системы дифференциальных уравнений, подробно изложенных в работе [1]. Используя систему обыкновенных дифференциальных уравнений [1], повернем ось Ox

на угол β : $\cos \beta = \frac{x}{x^1} \Rightarrow x = x^1 \cos \beta$, $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial(x^1 \cos \beta)} = \frac{1}{\cos \beta} \frac{\partial}{\partial x^1}$ и введем следующие обозначения:

$$u_{\infty}^1 = \frac{u}{\cos \beta}; \quad D_T^1 = \frac{D_T}{\cos^2 \beta}; \quad \lambda_T^1 = \frac{\lambda_T}{\cos^2 \beta}. \quad (1)$$

Переходя к декартовой координате в подвижной системе отсчета, связанной с положением максимального профиля температуры $\xi = x^1 - \omega t$, предположим, что весь фронт движется с одной и той же скоростью ω , получим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \rho_1 \omega \frac{d\varphi_1}{d\xi} &= R_1; \quad R_1 = k_{01} \rho_1 \varphi_1 e^{-\frac{E_1}{RT}}; \quad \rho_2 \omega \frac{d\varphi_2}{d\xi} = R_2; \quad R_2 = k_{02} \rho_2 \varphi_2 e^{-\frac{E_2}{RT}}; \\ \rho_3 \omega \frac{d\varphi_3}{d\xi} &= -\alpha_c R_1 + \frac{M_c}{M_1} R_3; \quad R_3 = k_{03} s_{\sigma} \rho_5 c_1 \varphi_3 e^{-\frac{E_3}{RT}}; \quad \frac{d\varphi_4}{d\xi} = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{d}{d\xi} \left(\rho_5 D_T^1 \frac{\partial c_{\alpha}}{\partial \xi} \right) - \rho_5 (u_{\infty}^1 - \omega) \frac{dc_{\alpha}}{d\xi} + R_{5\alpha} - c_{\alpha} Q = \frac{\alpha}{c_{p\alpha}} (c_{\alpha} - c_{\alpha\infty}), \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{d}{d\xi} \left(\lambda'_T \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) - [\rho_5 (u'_\infty - \omega) c_{p5} - \omega \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi}] \frac{dT}{d\xi} - \frac{\alpha}{h} (T - T_\infty) + \\ & + q_3 R_3 - q_2 R_2 + q_5 R_5 = 0; \\ & R_{51} = -R_3 - \frac{M_1}{2M_2} R_5; \quad R_{52} = (1 - \alpha_c) v_T R_1 - R_5; \quad R_{53} = 0; \\ & R_5 = M_2 k_{05} \left(\frac{c_1 M}{M_1} \right)^{0,25} \left(\frac{c_2 M}{M_2} \right) T^{-2,25} e^{-\frac{E_5}{RT}}; \\ & \rho_5 = \frac{P_\infty}{RT_\infty \sum_{i=1}^4 \frac{c_\alpha}{M_\alpha}}; \quad \sum_{i=1}^4 c_\alpha = 1; \quad Q = (1 - \alpha_c) R_1 + R_2 + \frac{M_c}{M_1} R_3. \end{aligned} \quad (4)$$

К системе (2)-(4) граничные условия:

$$\xi = \pm\infty: \quad T = T_\infty, \quad c_\alpha = c_{\alpha\infty}, \quad \varphi_i = \varphi_{i\infty}, \quad \left. \frac{dc_\alpha}{d\xi} \right|_{\xi \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad \left. \frac{dT}{d\xi} \right|_{\xi \rightarrow \pm\infty} = 0, \quad \left. \frac{d\varphi_i}{d\xi} \right|_{\xi = \pm\infty} = 0. \quad (5)$$

Здесь t – время; β – угол наклона; x' – декартова координата в системе координат, связанной поворотом оси Ox на угол β (ось x направлена в сторону невозмущенной скорости ветра, параллельной горизонтальной подстилающей поверхности); $u = 0.2$ – равновесная скорость ветра, u'_∞ – компонента скорости в выбранной системе координат (вычисляется по формуле (1)); $\varphi_1 = \frac{\rho}{\rho_1}$ – объемная доля газовой фазы ($\rho = 0.3$ – плотность слоя, $\rho_1 = 360$ – плотность древесины); $\varphi_2 = \frac{\rho(1-\zeta)W}{\rho_2}$ – объемная доля горючим компонентам продуктов пиролиза ($\rho_2 = 1000$ – плотность древесины; $\zeta = 0.3$ – процентное содержание золы в лесных горючих материалах (ЛГМ), $W = 0.35$ – влагосодержание ЛГМ); $\varphi_3 = 0.01$ – объемная доля инертных компонентов воздуха; $\varphi_4 = 0$ – объемная доля водяного пара и инертных продуктов реакции окисления, пиролиза и горения кокса; $c_1 = 0.23$ – массовая концентрация газовой компоненты кислорода в окружающей среде; $c_2 = 0$ – массовая концентрация газовой компоненты горючих продуктов пиролиза в окружающей среде; $c_3 = 0.769$ – массовая концентрация инертных компонентов воздуха в окружающей среде; $\rho_3 = 200$ – плотность конденсированных продуктов пиролиза; $\rho_4 = 200$ – плотность минеральной части; ρ_5 – плотность газовой фазы (вычисляется по формуле (5), $p_\infty = 1.01 * 10^5$ – давление, $T_\infty = 300$ – температура окружающей среды вдали от фронта пожара); Q – массовая скорость образования газовой фазы; $R_{5\alpha}$ – массовые скорости образования компонентов газовой фазы; R_1, R_2, R_3, R_5 – массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества ЛГМ, испарения воды из ЛГМ, горения коксового остатка и газообразных горючих продуктов пиролиза соответственно; $M_1 = 32$ – молекулярная масса газовой компоненты кислорода, $M_2 = 28$ – молекулярная масса газовой компоненты горючих компонентов пиролиза, $M_3 = 28$ – молекулярная масса газовой компоненты инертных компонентов воздуха; $M_c = 12$, M – молекулярные массы углерода и всей смеси газов соответственно; λ'_T – коэффициент турбулентной теплопроводности (вычисляется по формуле (1), $\lambda_T = \mu_T c_{p5}$ ($\mu_T = 1$ – коэффициент динамической вязкости,

$c_{\rho 5} = 1229.45$ – теплоемкость газовой фазы), D_T – коэффициент диффузии (вычисляется по формуле (1)); $c_{\rho 1} = 700$ – теплоемкость фазы сухого органического вещества; $c_{\rho 2} = 4180$ – теплоемкость фазы связанной воды; $c_{\rho 3} = 900$ – теплоемкость фазы конденсированных продуктов пиролиза угля; $c_{\rho 4} = 1000$ – теплоемкость фазы минеральной части золы; T – температура газовой фазы; $\alpha_T = 1250$ – коэффициент внутреннего теплообмена; $R = 8.314$ – универсальная газовая постоянная; $q_2 = 3 \cdot 10^6$, $q_3 = 12 \cdot 10^6$ и $q_5 = 1 \cdot 10^7$ – тепловые эффекты процессов испарения, горения конденсированного горючего и газообразного горючего продукта пиролиза соответственно; k_{01} , k_{02} , k_{03} , E_1 , E_2 , E_3 – предэкспоненты реакций пиролиза, процессов испарения и горения конденсированного продукта пиролиза (кокшика); s_σ – удельная поверхность конденсированного продукта пиролиза; $\alpha_c = 0.3$, $v_T = 0.8$ – коксовое число ЛГМ и доля горючего газа в газообразных продуктах пиролиза соответственно; $h = 0.2$ – высота слоя горючих материалов; индексы ∞ , $-$ и $+$ относятся к параметрам невозмущенного потока, параметрам на верхней и нижней границах полога леса.

Для выполнения условий (5) при

$$T_\infty < T < T_* : R_i = 0; R_{5\alpha} = 0; R_5 = 0; \alpha = 1, 2; i = 1, 2, 3. \quad (6)$$

Проанализируем поведения решений уравнений для температуры T и концентрации компонентов c_α при $\xi \rightarrow \pm\infty$. Будем искать решение в виде:

$$T = T_\infty + T', \quad c_\alpha = c_{\alpha\infty} + c'_\alpha, \quad \varphi_i = \varphi_{i\infty} + \varphi'_i, \quad (7)$$

где знаком “штрих” обозначена малая величина возмущения, характеризуемая отклонением параметров от равновесных значений. Подставляя (7) в (3), (4) и отбрасывая малые более высокого порядка, получаем:

$$\rho_{5\infty} D_T^1 \frac{d^2 c_\alpha^1}{d\xi^2} - \rho_{5\infty} (u^1 - \omega) \frac{dc_\alpha^1}{d\xi} - \frac{\alpha}{c_{p\alpha}} c_\alpha^1 = 0, \quad \alpha = 1, 2, 3, \quad (8)$$

$$\lambda_T^1 \frac{d^2 T^1}{d\xi^2} - [\rho_{5\infty} (u_\infty^1 - \omega) c_{p5} - \omega \sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{\rho i}] \frac{dT^1}{d\xi} - \frac{\alpha}{h} T^1 = 0. \quad (9)$$

Решением уравнения (9), (8) при $\xi \rightarrow \pm\infty$ будет:

$$T^1 = a_{1,2} e^{\lambda_{1,2}\xi}, \quad c_\alpha^1 = b_{1,2\alpha} e^{\mu_{1,2\alpha}\xi}, \quad (10)$$

где $\lambda_{1,2}$, $\mu_{1,2\alpha}$ – корни соответствующих характеристических уравнений; $a_{1,2}$, $b_{1,2\alpha}$ – произвольные постоянные.

Для диффузного режима горения с хорошей степенью точности можно полагать

$$T(0) = T_0, c_1|_{\xi=0} = c_2|_{\xi=0} = 0, \left. \frac{dc_1}{d\xi} \right|_{\xi=0} = \left. \frac{dc_2}{d\xi} \right|_{\xi=0} = 0, \varphi_1(0) = 0, \varphi_2(0) = 0, \quad (11)$$

где T_0 – максимальная температура во фронте лесного пожара; T_∞ – температура удаленная от фронта пожара.

Пусть $\rho_5(u_\infty^1 - \omega) = \rho_{5\infty}(u_\infty^1 - \omega) = \text{const}$ – приближенно выражает закон сохранения массы при лесном пожаре. При $0 < \xi < \infty$ профиль температуры определяется формулами (7), (10), где $a_1 = T_0 - T_\infty$ – постоянная, она определяется из условий (11).

Интегрируя уравнение (4) по $0 < \xi < \infty$ и используя уравнения (2) и (3) для вычисления интегралов, введя обозначения

$$\bar{q} = \left\{ - \left[\frac{q_3 M_1 \alpha_c}{M_c} + q_5 (1 - \alpha_c) v_T \right] c_1 \varphi_{1H} + q_2 \rho_2 \varphi_{2H} \right\} (\rho_5 c_{p5} T_\infty)^{-1}; \quad \Theta_0 = \frac{T_\infty}{T_0},$$

$$\bar{\omega} = \frac{\omega}{u_\infty}, \quad \pi = \frac{\sum_{i=1}^4 \rho_i \Phi_i c_{\rho i}}{\rho_{5\infty} c_{\rho 5}},$$

получим

$$\bar{q}\bar{\omega} + [1 - \bar{\omega}(1 + \pi)](\Theta_0 - 1) = \frac{2e(\Theta_0 - 1)}{\sqrt{[1 - \bar{\omega}(1 + \pi)]^2 + 4e - 1 + \bar{\omega}(1 + \pi)}}. \quad (12)$$

Решая (12) относительно $\bar{\omega}$, получаем

$$\omega(\beta) = \frac{u_\infty \left(\bar{q} + \sqrt{\bar{q}^2 - 4e(\Theta_0 - 1) \left(\bar{q}(1 + \pi) - \frac{\bar{q}^2}{(\Theta_0 - 1)} \right)} \right)}{2 \cos(\beta) \left(\bar{q}(1 + \pi) - \frac{\bar{q}^2}{(\Theta_0 - 1)} \right)} \quad (13)$$

На рис. 1 представлена зависимость скорости распространения пожара ($\omega(\beta)$ измеряется в м/с) от угла наклона (β измеряется в радианах), видно, что с ростом угла наклона скорость распространения пожара также возрастает.

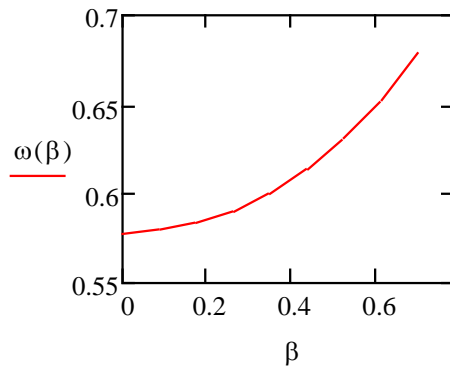


Рис. 1. Зависимость скорости распространения пожара от угла наклона

Как следует из анализа рис. 2 и рис. 3, численное (v -скорость распространения пожара) и аналитическое ($\omega(\beta)$ -скорость распространения пожара) решения хорошо согласуется при различных значениях Θ_0 , равное 0,6 и 0,9 соответственно. Здесь под численным решением подразумевается решение задачи (1)–(5).

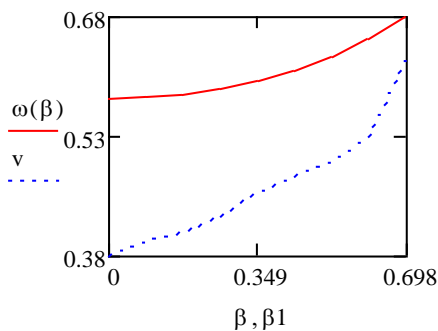


Рис. 2. Численное и аналитическое решения зависимости скорости распространения пожара от угла наклона

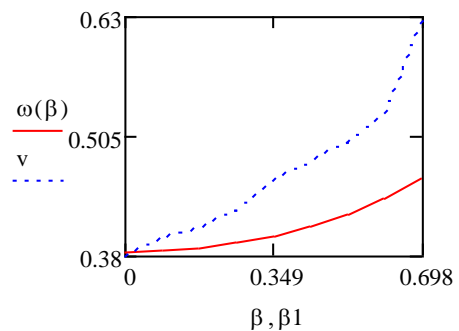


Рис. 3. Численное и аналитическое решения зависимости скорости распространения пожара от угла наклона

В ходе выполнения поставленной задачи была разработана схема для учета влияния угла наклона подстилающей поверхности (рельеф местности). Численное и аналитическое решения хорошо согласуются. Результаты, полученные для ровной поверхности, согласуются с результатами, полученными А.М. Гришиным. А результаты с равномерно наклоненной поверхностью согласуются как с известными теоретическими [2] так и с известными экспериментальными [3]. На основе результатов, полученных для равномерно наклоненной поверхности, производились исследования по учету влияния рельефа местности на скорость распространения лесного низового пожара и определены возможные сценарии изменения скорости распространения пожара в зависимости от угла наклона. Из рисунков видно, что при различных значениях параметров аналитическое решение может давать как оценку сверху, так и оценку снизу.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых – докторов наук (МД-99.2010.5) и гранта РФФИ 10-05-00199-а

Библиографический список

1. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, 1992.
2. **Бурасов, Д.М.** Математическое моделирование низовых лесных и степных пожаров / Д.М. Бурасов, А.М. Гришин. – Кемерово: Практика, 2006.
3. **Butler, V.W.** Influence of Slope on Fire Spread Rate/ V.W. Butler, W. R. Anderson, E. A. Catchpole. The Fire Environment—Innovations, Management and Policy. P.75-85.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

L. Kataeva, I. Belotserkovskaya

THE NUMERICAL AND ANALYTICAL DECISION MATHEMATICAL MODEL FOR GROUND FIRE INCLUDING SLOPE ANGLE INFLUENCE.

This article deals with analytical and numeric solution of mathematical model for ground forest fire including slope angle influence. The results for flat surface conforming with Grishin's model, and for monotonic surface conforming with known theoretical [2] and experimental [3] data.

Key words: mathematical modelling, forest fires

УДК 551.46

О.Е. Хвостова², Е.Л. Авербух¹, А.А. Куркин²**ИССЛЕДОВАНИЕ СЦЕНАРИЕВ ЦУНАМИ НЕСЕЙСМИЧЕСКОГО ПРОИСХОЖДЕНИЯ НА ФРАНЦУЗСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ СРЕДИЗЕМНОГО МОРЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Государственный университет – Высшая школа экономики (Нижегородский филиал)²

В работе представлены результаты моделирования различных сценариев вероятного обрушения части мыса Канальи (южное побережье Франции), и вызванного им локального цунами. Рассмотрены три возможных сценария обрушения скалы: обрушение одной глыбы, нескольких глыб, а также сход лавинообразного потока. Проведен анализ рассмотренных сценариев данного гипотетического события.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, уравнение Буссинеска, обвал, лавина.

Введение

Характерной особенностью цунами последних десятилетий является появление разрушительных волн, генерируемых оползнями с достаточно большим объемом сползшего грунта. Оползни и сопровождающие их цунами – обычные вторичные эффекты землетрясений, но во многих случаях разрушительные оползни произведены локальными процессами в отсутствие сейсмических событий. Такие цунами отмечались у берегов Канады и в Средиземном море. Подобные катастрофические волны наблюдаются не только на океанском шельфе, но и на берегах морей и различных водных резервуаров. Так, в 1963 году в Греции, в Коринфском заливе, береговая полоса в устье реки сползла и привела к цунами с высотой шесть метров, которая накатилась на противоположный берег. Также в 1997 году в США в бухте Скагвэй, Южная Аляска, секция железной дороги при реконструкции сползла в воду, что вызвало образование цунами, приведшее к экономическому ущербу около 21 миллиона долларов и человеческим жертвам. В 1997 году на Малых Антильских островах, оползень объемом 60 миллионов кубических метров сполз в Белую реку, на юге островов. Большие волны появились на расстоянии 10 километров от места схода оползня.

По результатам исследований, проводившихся во французском научно-исследовательском институте CEREGE, было выявлено, что вследствие глобального потепления уровень воды в Средиземном море будет подниматься, что в итоге приведет к сходу рыхлых осадочных пород мыса Канальи, расположенного близ поселка Кассис. Мыс Канальи является самой высокой точкой в округе (высота его 397 метров над уровнем моря), причем часть скалы нависает над водой. Подножие же состоит из мягких, рыхлых осадочных пород (см. рис. 1). Обрушение части скалы в воду может повлечь за собой обвал, оцениваемый объём которого - от трех до одиннадцати миллионов кубических метров, наиболее ожидаемым является объём, равный $3\,900\,000 \pm 785\,000 \text{ м}^3$ [1]. По оценкам, такой обвал может стать причиной возникновения цунами.

При этом статистические данные о цунами в Средиземном море, и особенно вблизи Французского побережья, часто недостаточно полные, а то и совсем отсутствуют. Например, для Лигурийского моря записи колебания уровня моря известны только для двух случаев: цунами 23 февраля 1887 года – в Женеве и Ницце, а также цунами 16 октября 1979 года – в Ницце и Виллефранше. Такие скудные данные не могут использоваться для точной и полной оценки цунамиопасности Французского побережья.

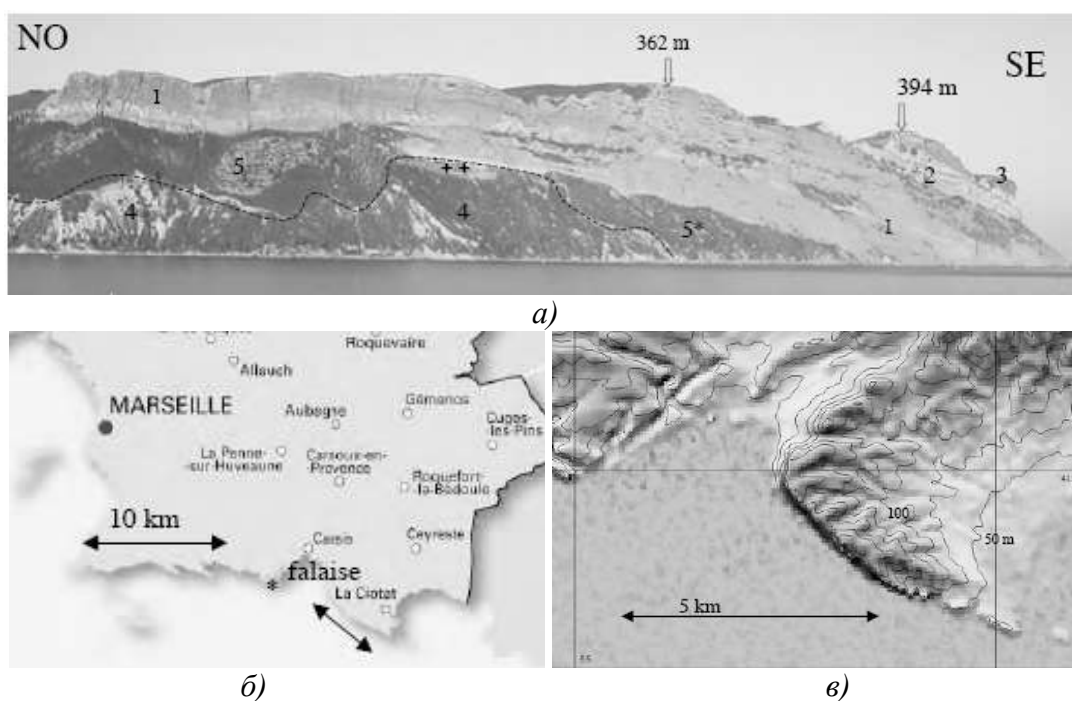


Рис. 1. Мыс Канальи:

a – общий вид на прибрежные скалы. Составляющие породы:

1 – известковый песчаник; 2 – тяжелый известняк; 3 – конгломерат; 4 – известковая глина; рухляк (находится под воздействием эрозии); 5 – древняя стабильная формация обрушившихся скал. Пунктирная линия – граница современной эрозии рухляка, достигающая скалы в точке ++.

Расстояние NO->SE – около четырех километров

б – карта местности. * - место захвата вида *a*);

в – топография прибрежных скал (кривые нарисованы через каждые 50 м)

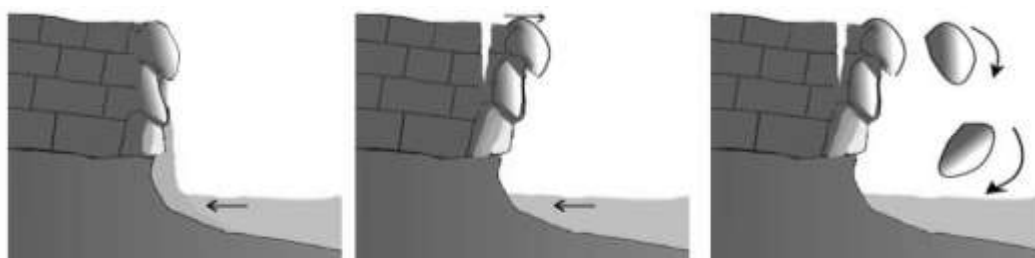


Рис. 2. Модель гипотетического разлома скалы, вызванного подъемом уровня моря

По данным исследований, в настоящее время происходит медленная эрозия откоса 4 (см. рис. 1, *a*). В результате поднятия уровня моря эрозия будет происходить все быстрее, и со временем рухляк постепенно сойдет в воду, тем самым оголив выступ скалы 1 (рис. 1, *a*). И тогда может наступить момент, когда часть скалы обрушится в море (рис. 2). Это может быть один большой кусок известняка, либо несколько поменьше. Третьим вероятным сценарием развития событий может стать лавинообразный сход горных пород в море.

Поэтому для изучения последствий данного гипотетического события, которое может повлечь за собой возникновение локального цунами, будем использовать различные вероятные сценарии. Это позволит увеличить осведомленность о возможных последствиях обвала скалы, а также позволит получить исходные данные для разработки мер по смягчению урона.

Область расчета

Батиметрия региона близ мыса Канальи была получена из данных GPS-навигатора, присланных Филиппом Дюссуйе, CEREGE (рис. 3). Данные XY (горизонтальных координат) приведены в координатах Lambert3 (конформная коническая проекция, [2]), в метрах.

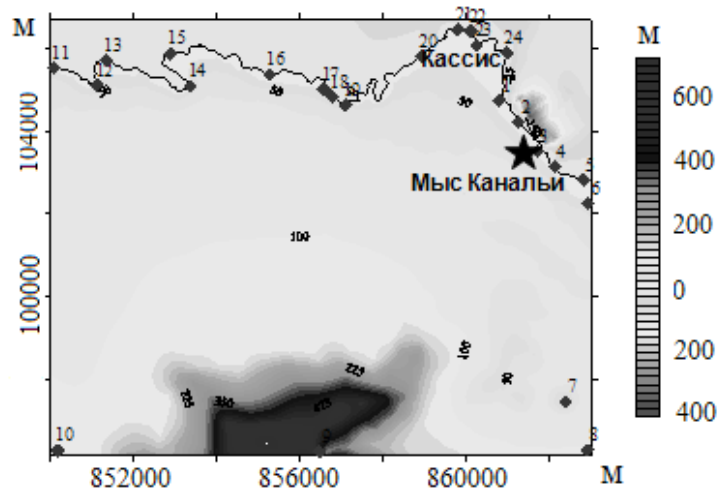


Рис. 3. Батиметрия региона

Размер сетки составляет 907*849 точек, расстояние между узлами 14 и 12 м двух горизонтальных направлений. Цифрами на рисунке обозначены компьютерные мареографы, расставленные вдоль линии берега. Мареографы номер 1-4 расположены вдоль мыса Канальи, 21 и 22 – в районе поселка Кассис, 11-19 – в Каланках (узких заливах), а остальные по периметру расчетной области.

Было отмечено, что практически вся линия берега в расчетной области представляет собой вертикальную стенку. В том числе и порт городка Кассис, который защищен двумя высокими волнорезами. Есть только два уязвимых места – это два городских пляжа. Один расположен на западе от города (мареограф 20), второй – около порта (мареограф 22). Максимальная высота второго пляжа приблизительно два метра над уровнем моря – он очень пологий. Соответственно, через него волна может пройти и затопить портовую часть города и нанести урон зданиям, сооружениям и людям, которые там находятся. Для второго пляжа нет такой большой опасности, но за ним находится небольшая площадь и асфальтовая дорога с достаточно оживленным движением. Поэтому угроза нанесения урона все же существует.

Математическая модель

В основу расчета распространения цунами и наката на берег положены расширенные уравнения Буссинеска, с добавлением членов, отвечающих за нелинейность и частотную дисперсию. В исходные уравнения Уеем [3] были добавлены члены, отвечающие за физические эффекты вязкого трения и разрушения волн. Также были включены дополнения, необходимые для выполнения точных численных расчетов, включающих генерацию волн, поглощение волн на границе и движение по береговой линии. Уравнения модели имеют вид:

$$\eta_t = E(\eta, u, v) + \gamma E_2(\eta, u, v) + f(x, y, t), \quad (1)$$

$$[U(u)]_t = F(\eta, u, v) + [F_1(v)]_t + \gamma [F_2(\eta, u, v) + F^t(\eta, u_t, v_t)] + F_b + F_{br} + F_{bs} + F_{sp}, \quad (2)$$

$$[V(v)]_t = G(\eta, u, v) + [G_1(u)]_t + \gamma [G_2(\eta, u, v) + G^t(\eta, u_t, v_t)] + G_b + G_{br} + G_{bs} + G_{sp}. \quad (3)$$

Здесь u и v - горизонтальные скорости, параллельные осям Ox и Oy на глубине $z=z_a=-0.531h$, т.е. $(u, v) = \bar{u}_a$, и γ - управляющий параметр, позволяющий выбрать между полной ($\gamma=1$) или частичной ($\gamma=0$) нелинейностью [3]. Остальные члены добавлены в уравнения для выполнения специальных функций: член $f(x, y, t)$ в (1) в исходной функции для генерации волн; вектор (F_b, G_b) в (2) и (3) – вектор донного трения; (F_{bs}, G_{bs}) – вектор, отвечающий за расчет турбулентности в потоке; вектор (F_{br}, G_{br}) – модель разрушения волн при

приближении к берегу; (F_{sp}, G_{sp}) необходим для расчета поглощения волн за счет затухания на границах области.

В используемой модели funwave для численного моделирования используется составная схема Адамса-Башфорта-Молтона четвертого порядка точности (использующая шаг-предиктор третьего порядка и шаг-корректор Адамса-Молтона четвертого порядка). Члены, включенные в первые частные производные, имеют порядок точности $O(\Delta x^4)$. Для их получения используется пятиточечный шаблон. Все ошибки, включенные в эту схему решения нелинейных волновых уравнений, имеют четвертый порядок по сетке и временному шагу. Пространственное и временное дифференцирование членов высокого порядка в дисперсионных слагаемых имеет второй порядок точности, что делает ошибки еще меньшими.

Начальные условия

Первоначально, чтобы посмотреть общие закономерности распространения возникающих при обвале волн, в качестве *первого сценария* было решено взять за основу модель шара, падающего в воду. В этом случае образуется возмущение поверхности воды следующей формы:

$$\begin{cases} \eta(\vec{r}, 0) = D_c \left(1 - \frac{r^2}{R_c^2} \right), & r \leq R_D, \\ \eta(\vec{r}, 0) = 0, & r > R_D, \end{cases} \quad (4)$$

где D_c – эффективная глубина впадины; R_c – радиус впадины.

Эта формула много лет применяется для описания волн, возникающих в результате взрывов в воде и извержений подводных вулканов. Эта же идея применяется для вычисления воздействия астероидов при падении в океан [4-6]. Принято, что только часть кинетической энергии источника (ε) идет на генерацию цунами. Таким образом, для вычисления глубины впадины имеем следующую формулу:

$$D_c = \sqrt{\frac{2\varepsilon \rho_i R_i^3 V_i^3}{\rho_w g R_c^2}}, \quad (5)$$

где ρ_i – плотность источника; R_i – радиус источника; V_i – скорость источника; ρ_w – плотность воды. В наших расчетах в качестве начальных параметров были выбраны следующие: $\rho_i = 2\rho_w$, V_i рассчитывалась как скорость свободно падающего тела с высоты 260 м (средняя высота участка, который предположительно обвалится).

Другой вариант сценария предполагает падение в воду нескольких глыб общим объемом 4 000 000 м³ (*второй сценарий*). Размеры глыб были выбраны эмпирически. Всего было взято семь глыб, объемом по 571 428 м³. Радиус шара с таким объемом равен 51,5 м. Согласно рис. 1, а, при размывании рухляка у подножия мыса оголится достаточно длинная часть скалы. Поэтому предполагалось, что все семь падающих глыб распределены равномерно вдоль линии берега под нависающей скалой.

Также был рассмотрен *третий сценарий* обрушения скалы, когда в воду сходит лавинообразный поток обломков скалы, перемешанный с материалом, из которого состоит ее подножие. Дифференциальное уравнение, описывающее движение центра масс лавины в направлении движения источника, может быть записано в следующей форме [7]:

$$WTL(\rho_b + C_m \rho_w) \frac{d^2 x}{dt^2} = -WTL(\rho_b - \rho_w) g C_n - WT \frac{1}{2} \rho_w \left(\frac{dx}{dt} \right)^2 C_d, \quad (6)$$

где ρ_b – плотность пород; W, T, L – ширина, толщина и длина потока, движущегося в воду плотности ρ_w постоянной глубины. Скорость потока на береговой линии определяется начальной скоростью u ; C_m – дополнительный массовый коэффициент; C_n – коэффициент

трения Куломба; C_d – коэффициент силы тяги. Данное уравнение перепишем в более краткой форме:

$$\frac{du}{dt} = -\frac{(\gamma-1)gC_n}{(\gamma+C_n)} - \frac{C_d u^2}{2L(\gamma+C_m)} = -A - Bu^2, \quad (7)$$

где $\gamma \equiv \frac{\rho_b}{\rho_w}$ – специальная плотность потока.

Результаты расчетов

В институте SEREGE, где занимаются исследованием вероятного обвала, предполагают, что объем гипотетического оползня может колебаться от 3 до 11 млн м³[1]. Для оценки влияния объема оползневой массы на параметры генерируемой волны цунами первый сценарий был промоделирован для различных объемов обвала (3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 и 11 млн м³). Результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры локального цунами для различных объемов обвала (первый сценарий)

Объём обвала (м ³)	Радиус шара (м)	Высота первой волны (м)	Высота максимальной волны (м)	Время прихода 1-й волны (с)
3000000	89,47	1,1	1,1	190
4000000	98,47	1,5	1,5	195
5000000	106,08	1,5	1,5	195
6000000	112,73	1,5	1,5	195
7000000	118,67	1,6	1,6	195
8000000	124,07	1,4	1,4	190
9000000	129,04	1,5	1,5	195
10000000	133,65	1,8	1,8	200
11000000	137,96	1,55	1,55	195

Практически все параметры (амплитуда, период и время прихода волн) очень похожи и варьируются в пределах 5% от среднего результата. Это свидетельствует о том, что объем обвала не будет значительно влиять на ситуацию в бухте Кассис, и в любом случае будет представлять для поселка определенную опасность. Поэтому далее в расчетах был рассмотрен средний случай – наиболее вероятный объем в 4 млн м³. Приведенные далее данные для первого сценария соответствуют этому же объему обвала.

Начальное возмущение водной поверхности при различных сценариях генерации волны цунами представлено на рис. 4. Для первого сценария глубина впадины равна 5,35 м, а максимальный всплеск по краю впадины равен 10,65 м.

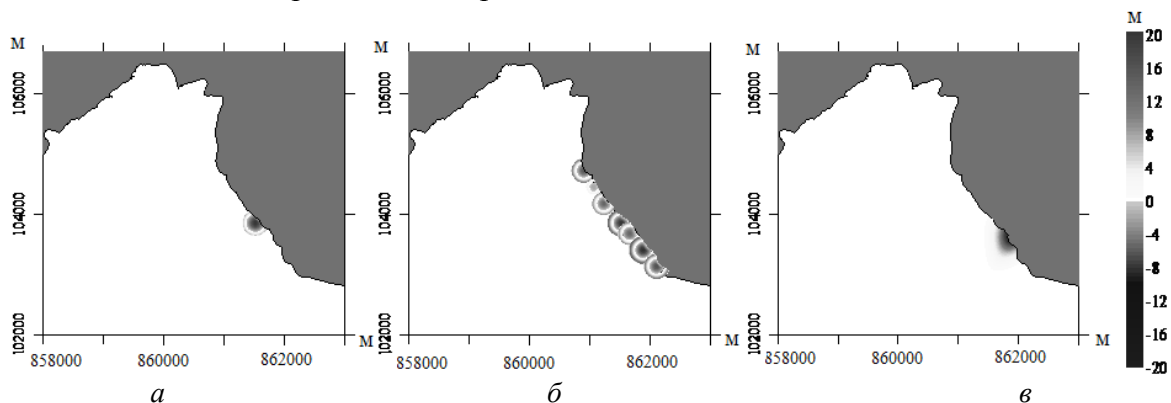


Рис. 4. Начальное возмущение:

a – для первого сценария; *b* – для второго сценария; *v* – для третьего сценария

В результате численного моделирования данного сценария была получена следующая картина событий. Волна распространяется достаточно быстро в направлении от линии берега. Приблизительно через 3–3,5 минуты волна достигает поселка Кассис, через пять минут доходит до южной границы расчета (это расстояние приблизительно равно 10 км) и выходит за область расчета по всему периметру области в течение восьми минут.

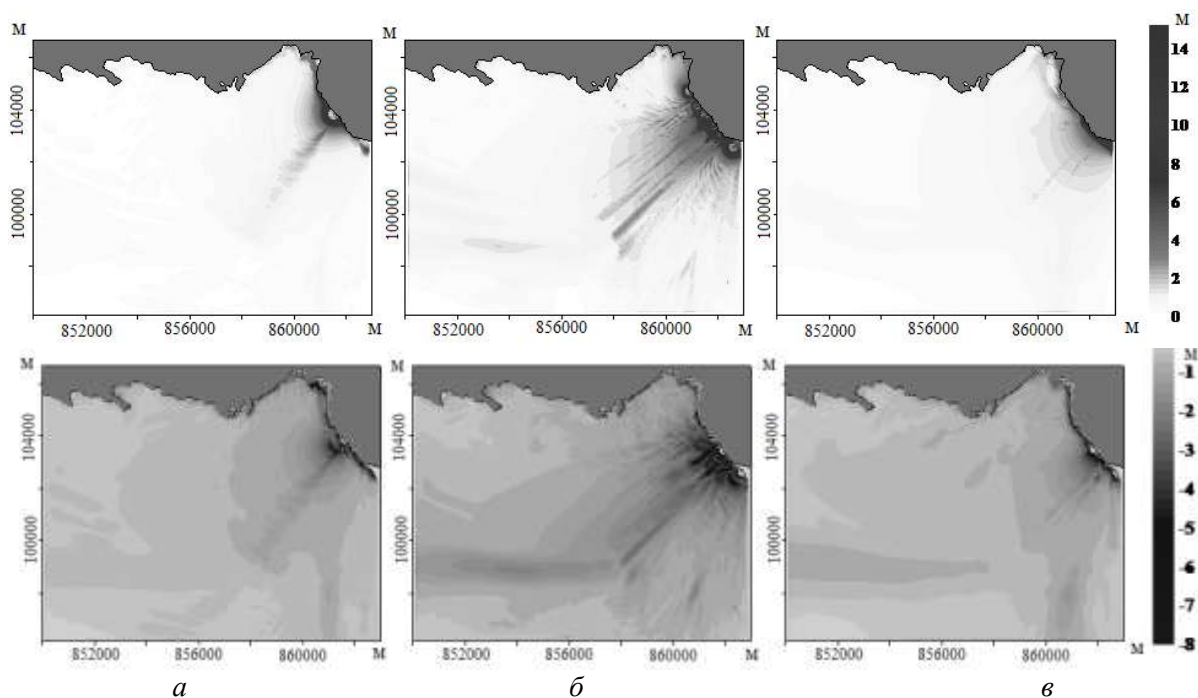


Рис. 5. Распределение максимальных (вверху) и минимальных (внизу) высот волн за все время расчета:

a – для первого сценария; *б* – для второго сценария; *в* – для третьего сценария

В районе схода части скалы (мареограф номер 3) сразу же после обрушения наблюдаются волны высотой до 10 м. Приблизительно через две минуты приходит вторая волна высотой около 2 м. После этого колебания моря в данном регионе незначительны.

На восточной границе области расчета (мареограф номер 7) через пять минут после обвала наблюдаются колебания уровня моря с амплитудой до 0,8 м. До западной границы расчета (мареограф номер 12) волна доходит за 8 минут и максимальная амплитуда ее составляет 80 см. Такая картина характерна для всех рассматриваемых сценариев.

Распределение максимальных и минимальных высот для разных сценариев представлено на рис. 5. Необходимо отметить направленность максимальной волны от берега. Максимальные волны наблюдаются в районе обрушения скалы, где берег представляет собой вертикальный срез – до 20 м, а также вдоль линии берега бухты Кассис – до 3 м высотой. В области обвала минимальные и максимальные высоты приходятся на первые минуты расчёта.

Рассмотрим более подробно ситуацию в бухте Кассис. На рис. 6 представлены записи некоторых компьютерных мареографов (расположение мареографов показано на рис. 3). Компьютерные записи показывают, что в случае наступления рассматриваемого события к поселку Кассис подойдет первая волна высотой более одного метра (в районе городского пляжа, мареограф номер 22). Период волны составляет в среднем две минуты. Максимальная волна для разных сценариев может достигать высоты 2,5 м. После прихода максимальной волны уровень моря будет колебаться с амплитудой чуть более одного метра и периодом чуть более 30 секунд.

По результатам моделирования различных сценариев обрушения скалы было проведено сравнение различных характеристик высот волн. Данные приведены в табл. 2. Напомним, что во всех рассматриваемых случаях объем обрушающегося материала составлял 4 млн м³.

По данным таблицы, максимальная высота волны в порту поселка Кассис будет

наблюдаться, если в воду упадет несколько средних глыб и самая маленькая – при сходе лавинообразного потока. Время добегания первой волны минимально для обвала нескольких глыб и равно трем минутам. Для двух других сценариев оно близко к четырем минутам.

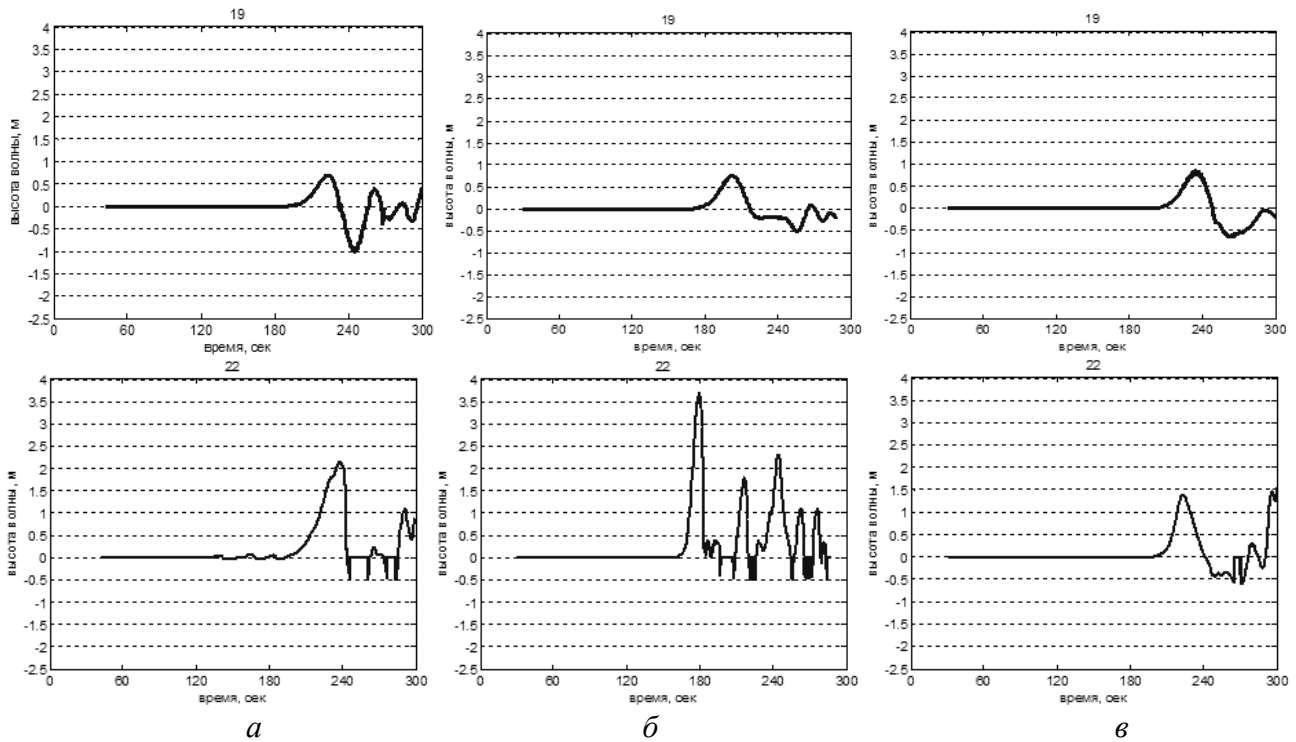


Рис. 6. Записи компьютерных мареографов №19 и №22:

а – для первого сценария; б – для второго сценария; в – для третьего сценария

Отметим, что для разных сценариев максимальная волна может быть как первой пришедшей волной (для случая обвала нескольких глыб), так и второй или третьей. Самый большой период волны по результатам расчетов соответствует лавинообразному сходу породы.

Таблица 2

Сравнительные характеристики волн цунами при различных сценариях обрушения мыса

Сценарий	Максимальная высота волны, м	Время прихода первой волны, с	Время прихода максимальной волны, с	Количество волн, не считая множества средних осцилляций	Максимальная волна по счету	Период волны, с
1. Обвал одной глыбы	2,7	200	300	2	3	30
2. Обвал нескольких небольших глыб	3	180	185	3	1	40
3. Лавинообразный сход породы	2,5	220	300	4	2	90

В целом, картина, наблюдаемая в бухте Кассис, очень близка для различных моделируемых сценариев. Очень важно то, что время добегания волны до поселка с момента обрушения скалы очень мало и составляет от 2,5 до трех минут, а высота волны при этом значительная – до трех метров в случае обрушения нескольких глыб сразу. Такая волна с ее огромной энергией вполне способна перебраться через пляж и затопить портовую площадь, порт, нанести ущерб зданиям, сооружениям и яхтам. Также маленькое время добегания

означает, что при возникновении в будущем обрушения скалы, если люди, находящиеся на пляже и в порту не будут знать, что необходимо очень быстро и организованно отойти вверх по улицам города, может возникнуть паника, при этом возможны давка и людские жертвы.

Выводы

В настоящей работе представлены результаты моделирования различных сценариев возникновения локального цунами вследствие обрушения мыса Канальи на французском побережье Средиземного моря. Выбраны и адаптированы для описания данного события два различных подхода к моделированию обвала: откол части скалы либо сход в воду потока, состоящего из обломков породы. Показано, что время прихода волны цунами в порт города Кассис составляет 3–3,5 минуты после обвала, а максимальная высота волны более 2,5 м.

Проведенное численное исследование показывает, что данное гипотетическое событие может являться причиной нанесения ущерба жителям поселка Кассис, находящегося в непосредственной близости от источника обвала. По имеющейся информации недостаточно, чтобы точно определить характеристики обвала, поэтому приведенные расчеты носят во многом модельный характер. Однако моделирование сценариев развития событий, как важного инструмента подготовки к реальному событию, смягчение урона, приносимого волной, является важной задачей. В заключение хотелось бы отметить важность дальнейшего изучения явления волн цунами, а также доработки существующего сценария развития событий.

Работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых - докторов наук (МД-99.2010.5) и гранта РФФИ 10-05-00199-а.

Библиографический список

1. **Rochette, P.** Programme Catastrophes Telluriques 2005 / P. Rochette, D. Hants; Appel a projets detaille du recherche. ATEF. 2005.
2. Projection de Lambert. Un article de Wikipedia, l'encyclopédie libre. www.wiki.fr.
3. **Kirby, J.T.** Funwave. Fully Nonlinear Boussinesq Wave Model. Documentation and User's Manual / J.T. Kirby. Center for Applied Coastal Research. Research Report NO CACR-98-06. 1998.
4. **Kharif, C.** Asteroid Impact Tsunami / C. Kharif, E. Pelinovsky // C.R. Physique. 2005. P. 361-366.
5. **Ward, S.N.** Asteroid impact tsunami of 2880 March 16 / S.N. Ward, E. Asphaug // Geophysical Journal International. 2003. Vol. 153. P. 6-10.
6. **Ward, S.N.** Impact tsunami – Eltanin / S.N. Ward, E. Asphaug // Deep-sea Research II. 2002. №49. P. 1073-1079.
7. **Watts, P.** Theoretical analysis of tsunami generation by pyroclastic flows // P. Watts, C.F. Waythomas. USA journal of geophysical research. Vol. 108, no. B12, 2003. P. 25–63.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

О.Е. Khvostova, Е.Л. Averbukh, А.А. Kurkin

ANALYSIS OF NONSEISMIC TSUNAMI SCENARIOS ON THE FRENCH COAST OF MEDITERRANEAN

In the present work the results of different scenario of the cliff of Cape Canaille hypothetic collapse (South of France) are presented. Three scenarios were considered: falling of one block, falling of several blocks in one time and debris flow avalanche. The analysis of the entire scenario was done.

Key words: tsunami, numerical simulation, Boussinesq equation, landslide, avalanche.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 681.053

Ю.К. Исаев, Д.А. Кляпнев

АЛГОРИТМ СБОЕЗАЩИТЫ ПРИ ЦИФРОВОЙ ОБРАБОТКЕ ИНФОРМАЦИИ ИНЕРЦИАЛЬНЫХ ДАТЧИКОВ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА»

Представлены решения задач по снижению ошибок, вызванных искажением кода измеряемого параметра при передаче по каналам связи и оптимизации загрузки каналов связи датчиков первичной информации с внешним вычислителем бесплатформенной инерциальной навигационной системы.

Ключевые слова: инерциальная навигация, датчик угловой скорости, акселерометр, цифровой канал связи, снижение ошибок.

Известен алгоритм обработки информации измерительных устройств [1], заключающийся в аналого-цифровом преобразовании (АЦП) выходного параметра измерительного устройства, чтении результата преобразования и размещении цифрового кода измеренного параметра для последующего чтения внешним обрабатывающим устройством.

Недостатком данного алгоритма является слабая защита цифрового кода измеренного параметра. В соответствии с известным способом по каналу связи с обрабатывающим устройством передается измеряемая величина. Искажение кода при передаче или приеме кода может приводить к ошибкам в работе обрабатывающего устройства. Если измерительным устройством является акселерометр или датчик угловой скорости, а обрабатывающим устройством является вычислитель бесплатформенной инерциальной навигационной системы (БИНС), то прием цифрового кода или прием ложной информации приведет к возрастающей ошибке навигационной информации БИНС.

Для исключения ошибок передачи цифрового кода параметра по линии связи в данном алгоритме может быть использована защита данных посредством корректирующего кода [2]. Однако этот алгоритм требует передачи более длинного кода и выполнения соответствующего количества проверок. Кроме того, проблема остается нерешенной при приеме кода, поэтому на практике защита с использованием корректирующего кода в системах реального времени не используется.

Задачей, на решение которой направлена представляемая работа, является снижение ошибок, вызванных искажением кода измеряемого параметра при передаче по каналу связи, и оптимизация загрузки канала связи с внешним вычислителем БИНС. Поставленная задача решается за счет того, что в способе обработки информации инерциального датчика БИНС дополнительно, до размещения цифрового кода в область чтения вычислителем БИНС, производят суммирование цифровых кодов. Текущий цифровой код суммируют до необходимой разрядности и полученный код размещают в область чтения внешним вычислителем БИНС.

Суммирование кодов измеряемого параметра до его размещения в область чтения обрабатывающим устройством позволяет минимизировать ошибки, вызванные искажением информации при передаче по каналу связи. Ограничение кода суммы до необходимой разрядности позволяет оптимизировать загрузку канала связи, а, следовательно, минимизировать запаздывание от момента готовности кода до его размещения в вычислителе БИНС. Минимизация ошибки происходит за счет того, что ошибки БИНС, обусловленные искажением информации при передаче по каналу связи, устраняются без запаздывания.

Инерциальный датчик своим выходом соединен с входом АЦП, выход которого подключен к входу промежуточного вычислительного устройства, в состав которого входит область чтения внешним вычислителем БИНС, которая связана с внешним вычислителем БИНС. В качестве аналого-цифрового преобразователя использован сигма-дельта АЦП [3], а в качестве промежуточного вычислительного устройства – микроконтроллер. Обобщенная схема устройства приведена на рис. 1.

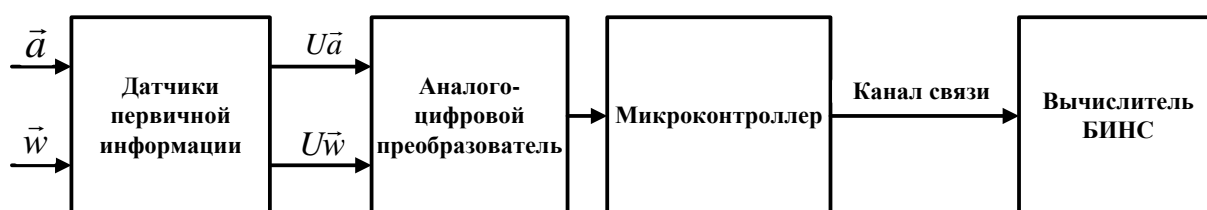


Рис. 1. Обобщенная схема устройства

Алгоритм обработки информации реализуют следующим образом. Инерциальный датчик формирует на выходе напряжение, пропорциональное величине измеряемого параметра (линейного ускорения или угловой скорости). Выход инерциального датчика соединен с входом АЦП, который преобразует входное напряжение в цифровой код. Выход АЦП соединен с входом промежуточного вычислительного устройства, которое читает текущий цифровой код на выходе АЦП. Промежуточное вычислительное устройство суммирует принятый от АЦП цифровой код с текущей накопленной суммой кодов данного АЦП, затем копирует текущий код суммы в промежуточную ячейку памяти, преобразует его в код заданной разрядности и размещает полученный результат в область чтения внешним вычислителем БИНС. Внешний вычислитель БИНС читает код результата из области чтения промежуточного вычислительного устройства.

Предлагаемое техническое решение, а именно, защита кода измеренного параметра суммированием и оптимизация длины кода, может быть реализовано в составе АЦП или инерциальном датчике с цифровым выходом.

Современные АЦП (например, сигма-дельта АЦП [3]) обладают хорошими точностными характеристиками. Погрешности, вносимые АЦП, по уровню соизмеримы с погрешностями, обусловленными передачей измерений АЦП по каналу связи с вычислителем БИНС. Канал связи может исказить код передаваемого параметра или не обеспечить его передачу. В первом случае обрабатывающее устройство получит неверный параметр, во втором случае параметр не будет передан в обрабатывающее устройство. Вычислитель БИНС в случае непереданного параметра или при идентификации передачи ложного параметра использует в своих вычислениях предыдущее достоверное значение параметра. Основная идея предлагаемого метода состоит в том, чтобы по каналу связи передавать коды параметров минимальной длины, содержащие в себе средства защиты от ошибок канала связи.

В правильно построенном канале связи вероятность двойной или более кратной ошибки пренебрежимо мала. Для исправления одинарной ошибки может быть использован приведенный далее алгоритм коррекции, размещаемый в вычислителе БИНС.

Пусть

$$\Delta_i = s_i - s_{i-1},$$

где s_i – переданная по каналу связи сумма измеренного параметра на i -м шаге; s_{i-1} – переданная по каналу связи сумма измеренного параметра на $i-1$ -м шаге; Δ_i – значение измеренного параметра на i -м шаге

Если s_i не получено или установлено, что передано ложное значение s_i , то в вычислителе БИНС принимают $\Delta_i = \Delta_{i-1}$. Таким образом, в качестве текущего измерения принимают его значение на предыдущем шаге.

При однократном сбое в канале связи можно минимизировать ошибку вычислителя БИНС, выполнив следующие операции.

Найдем величину

$$\Delta_{i=s_{i+1}-s_{i-1}} \text{ и } \Delta_{i+1} = \Delta_i^2 - \Delta_{i-1},$$

где Δ_i^2 – разность между достоверными значениями, принятой вычислителем БИНС суммы.

Величину Δ_{i+1} используем при расчетах в качестве измеренного параметра на шаге $i+1$.

Аналогичным образом строится защита от кратных ошибок передачи параметра по каналу связи с внешним вычислителем БИНС.

Точность расчета навигационной информации БИНС зависит от точности измерения ускорений и угловых скоростей и точности представления (разрядности) измеренных параметров.

Оценка разрядности представления может быть получена по формуле

$$N = \log_2 \left(\frac{D}{\delta} \right) + 1,$$

где D – диапазон измерения; δ – цена младшего разряда (величина квантования по уровню).

Пусть:

- для акселерометра диапазон измерения $D = 100 \text{ м/с}^2$, точность представления $\delta = 10^{-3} \text{ м/с}^2$;
- для датчика угловой скорости (ДУС) диапазон измерения $D = 200^\circ/\text{с}$, точность представления $\delta = 0.1^\circ/\text{ч}$.

Тогда разрядность кода акселерометра должна быть не менее разрядов

$$N = \log_2 \left(\frac{100}{10^{-3}} \right) + 1 = 18 \text{ [разрядов]},$$

разрядность кода ДУС должна быть не менее разрядов

$$N = \log_2 \left(\frac{200 * 3600}{0.1} \right) + 1 = 24 \text{ [разряда]}.$$

При интегральном съеме разрядность представления параметра кроме диапазона измерения и точности представления определяется также частотой съема информации. Расчетная формула оценки разрядности для интегрального съема

$$N = \log_2 \left(\frac{D}{f * \delta} \right) + 1,$$

где f – частота съема измерений.

При 100 Гц частоте съема разрядность акселерометров с $\delta = 10^{-2} \text{ м/с}$ составит 8 разрядов, разрядность ДУС с $\delta = 10''$ составит 11 разрядов.

При организации защиты от сбоев в канале связи предлагаемым способом необходимо иметь в коде суммы один дополнительный разряд для защиты от одиночных сбоев и два дополнительных разряда для защиты от трех последовательных сбоев.

Предлагаемый алгоритм обеспечивает защиту от ошибок передачи измеренного параметра по каналу связи. При этом устранение такой ошибки происходит с минимальным запаз-

дыванием. Определен алгоритм выбора разрядности кода, размещаемого в область чтения, в соответствии с которым может быть рассчитана оптимальная длина кода для передачи по каналу связи с внешним вычислителем БИНС. Таким образом, поставленная техническая задача решена, что подтверждено патентом автора [4].

Библиографический список

1. **Агеев, В.М.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование / В.М. Агеев, Н.В. Павлова. – М.: Машиностроение, 1990. – 196.
2. **Агеев, В.М.** Приборные комплексы летательных аппаратов и их проектирование / В.М. Агеев, Н.В. Павлова. – М.: Машиностроение, 1990. – 183 с.
3. **Бондаренко, А.А.** Высокоточный цифровой преобразователь аналоговых сигналов // Аэрокосмическая техника и высокие технологии – 2002: сб. ст. / Пермский государственный университет. Пермь. 2002. С. 47.
4. Патент РФ № 2341820. Способ ввода информации инерциального датчика бесплатформенной инерциальной навигационной системы / Исаев Ю.К., Ульянов В.П., Халеев К.И. опубл. 20.12.2008, Бюл. № 1/

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

Yu.K. Isaev, D.A. Klyapnev

FAULT-TOLERANT ALGORITHM FOR DIGITAL PROCESSING OF INERTIAL SENSORS DATA

The problem to which solution this study is intended is to reduce errors caused by the measured parameter code garbling while passing through the communication channel and to optimize loading of the channel for communication with the strapdown inertial navigation system external computer.

Key words: inertial navigation, rate sensor, accelerometer, digital communication channel, errors reduce.

УДК 519.7

В.А. Утробин

ЭЛЕМЕНТЫ ТЕОРИИ АКТИВНОГО ВОСПРИЯТИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Излагаются основные положения теории активного восприятия как информационной модели врожденных механизмов системы зрительного восприятия этапа предварительной обработки изображений в условиях априорной неопределенности.

Ключевые слова: зрительное восприятие, распознавание образов, априорная неопределенность, анализ изображений, информационные модели, этапы обработки изображений.

Введение

Более девяноста процентов информации об окружающем мире человек получает через систему зрительного восприятия. Эта информация необходима для жизнеобеспечения человека и ориентации в пространстве. Поэтому проблема зрительного восприятия является одной из фундаментальных проблем современности. Возникнув на заре прогресса человеческой мысли, она остается актуальной и в настоящее время. Тем не менее, несмотря на глубокие исторические корни, изображение стало предметом точных наук лишь в середине пятидесятых годов прошлого столетия и причиной тому явилось бурное внедрение методов кибернетики в задачи моделирования биосистем. Была высказана гипотеза – механизм восприятия есть классифицирующая система, и сформулирована задача построения машины, способной обучаться. Результатом такой общей постановки проблемы являются два крупных взаимосвязанных направления исследований – разработка математических моделей зрительного восприятия и разработка математических методов информационных преобразований изображения как «простого» многомерного сигнала, породившая современную теорию распознавания образов, заключающуюся в построении математических моделей классификации объектов в режиме обучения и не учитывающую специфику изображения как объекта исследования.

Основная задача распознавания (расознавания в «узком» смысле) заключается в построении правила, позволяющего отнести наблюдаемый объект, заданный на системе признаков (параметров), к одному из классов, удовлетворяющих требованиям сходства – максимум однородности внутриклассовых объектов при максимуме различия на межклассовых объектах. Пусть $\mathbf{x} = \{x_i; i = 1, \dots, d\}$ – вектор наблюдаемого объекта в евклидовом пространстве E^d , называемом пространством признаков (объектов); $T = \{T_i; i = 1, \dots, d\}$ – множество признаков, позволяющих получить решение о наличии объекта; $R = \{R_i; i = 1, \dots, R\}$ – множество классов, удовлетворяющих требованиям сходства, каждому элементу которого принадлежит множество точек из E^d ; $G = \{g_i(\mathbf{x}); i = 1, \dots, R\}$ – множество правил (функций), отображающих наблюдаемый объект \mathbf{x} на R . Тогда система распознавания образов есть тройка $S = (T, R, G)$, а процесс распознавания, есть отображение на классе функций вида $G: \mathbf{x} \rightarrow R$. В этом случае на многообразии известных систем распознавания можно выделить следующие классы [1]:

- в зависимости от способа выбора правила – распознавание с обучением (просто распознавание), либо самообучение (автоматическая классификация);
- в зависимости от делимости классов – детерминистский, либо вероятностный подход;

- в зависимости от качественного состава множества T – дискриминантный, либо структурный подход;
- в зависимости от априорного знания о множествах T , R – распознавание в узком смысле, либо распознавание в широком смысле, как распознавание в условиях априорной неопределенности.

Именно для последнего класса систем до настоящего времени отсутствовала необходимая теория распознавания.

Введем ряд определений. 1. Система, реализующая задачу распознавания в условиях априорной неопределенности, есть **универсальная система распознавания**. 2. Пусть каким-либо образом априори определены: все возможное (конечное) множество объектов, конечное множество признаков; критерий однородности внутри класса (кластера, таксона, образа). Тогда универсальная система распознавания – **самообучающаяся система распознавания**.

Решая задачу декомпозиции проблемы распознавания с позиций системного анализа, можно выделить три основных этапа преобразований [1]: – этап формирования исходного описания (с позиций системного анализа – этап подготовки данных), этап формирования признаков (этап анализа) и этап классификации (этап принятия решения). Если последний этап информационных преобразований теоретически «хорошо проработан», то первые два этапа в системах, базирующихся на теории распознавания образов, «игнорируются». Тем не менее, в системе зрительного восприятия эти два этапа информационных преобразований занимают важное место и врожденны, т.е. «не отягощены» действием сознания, а этап принятия решения входит в состав этапа понимания. При этом зрительная система «функционирует» как самообучающаяся система в условиях априорной неопределенности, обеспечивая восприятие увиденного в любой момент времени при любых неизвестных условиях, включая организованные помехи и загромождения.

Под *восприятием* вообще и зрительным восприятием в частности понимают процесс чувственно-исследовательской деятельности, направленный на ознакомление с предметом или явлением, воздействующим на органы чувств, конечным результатом которого является отражение исследуемого объекта в некоторую совокупность его свойств, описывающих его объективную целостность. Восприятие как информационный процесс наделяется следующими объективными свойствами:

1. Целостность – изображение (как объект исследования) есть целостное образование. Тогда задача этапа анализа состоит в декомпозиции целого на части с образованием уровней представлений изображения.

2. Структурированность – стратификация процесса восприятия на страты: обнаружения, локализации, опознания, интерпретации.

3. Стратегия (переключение внимания) восприятия – распространение процесса восприятия от более важных элементов изображения к менее важным.

4. Обобщенность оснований – реализация процесса восприятия, обеспечивающая выделение максимально устойчивых признаков объектов и их отношений на изображении в условиях априорной неопределенности последнего.

5. Стереотипность – обеспечение процесса восприятия однотипностью (однородностью по процедуре формирования) и однородностью (по составу) элементов и связей.

Выделенным свойствам системы зрительного восприятия как самообучающейся системы соответствуют информационные процессы преобразования зрительной информации на основе теории активного восприятия.

Модели объекта исследования

Любая система восприятия, по определению, решает задачу отражения предмета – объекта окружающего мира, в совокупность его свойств с учетом его объективной целостности. Результатом отражения является (перцептивный) образ, а сам процесс отражения – результат взаимодействия замкнутой системы: окружающий мир и наблюдатель, погруженный в этот

мир и неискажающий его. Под *окружающим миром* будем понимать пространство входных (для наблюдателя) величин (воздействий), принадлежащих трехмерному евклидову пространству на множестве моментов времени. Под *наблюдателем* будем понимать систему, состоящую из двух подсистем – воспринимающей (регистрирующей) и интерпретирующей (обрабатывающей). *Первая* решает задачу отображения любой доступной наблюдателю функции воздействия в функцию выхода $\mu(x, y, z, t)$: если входное воздействие в момент времени t есть функция интенсивности светового потока в видимой части спектра, то $\mu(x, y, z)$ в тот же момент времени – психофизиологическая *функция яркости*; именно эта функция, принадлежащая некоторому множеству M , есть изображение. *Вторая* подсистема реализует отображение любого изображения в *функцию выхода*, которую назовем *описанием произвольного изображения*, принадлежащего M . Такое представление позволяет выделить ряд (аксиоматических) свойств взаимодействующих подсистем в составе замкнутой системы. Свойства окружающего мира, представленного $E(x, y, z, t)$: *наблюдаемость*, *измеримость*, *открытость*, *упорядоченность* и *структурированность* (раскрытие перечисленных свойств можно найти в работах [1, 2]). Свойства подсистем наблюдателя: 1) *эквивалентность*, т.е. воспринимающая подсистема не должна искажать функцию воздействия; 2) *ограниченность*, т.е. для воспринимающей подсистемы: а) объем информации об окружающем мире ограничен наблюдаемым пространством (полем зрения) и допустимым динамическим диапазоном; б) воспринимающая подсистема есть система проектирования трехмерной функции воздействия на двумерную поверхность рецепторов; в) функция выхода $\mu(x, y)$ априори дискретна в пространстве, так как дискретен характер взаимодействия окружающей среды с конечным дискретным множеством рецепторов. Тем не менее, разрешающая способность, например, зрительного анализатора (сетчатки) так велика, что $\mu(x, y)$ допустимо рассматривать как непрерывную функцию координат. Для обрабатывающей подсистемы как любой физической системы свойство ограниченности замкнуто на свойство конечности пропускной способности.

Следовательно, под изображением будем понимать множество, каждый элемент которого в фиксированный момент времени t есть неотрицательная действительная функция действительных аргументов вида $M_t = \mu(x, y)$, определенная на конечном множестве точек замкнутой двумерной области определения (поле зрения), погруженной в евклидово пространство, суммируемая, квадратично интегрируемая на этом множестве и наделенная выше перечисленными свойствами. Так определенный объект исследования позволяет выделить два понятия: пространственный, вневременной объект (статическое, «замороженное» изображение, просто изображение) – это функция $M_t = \mu(x, y)$, определенная в момент t ; пространственно-временной объект (динамическое изображение) – это функция $M_d = \varphi(t, M_t)$. Поскольку изображение $M_t \in M$ допускает дискретизацию, то оно допускает представление на решетчатую (сеточную) функцию на прямоугольной области определения $L \times N$ (в условиях априорной неопределенности такая область допустимо квадратная область – $N \times N$). Отсюда следует, что мощность множества изображений конечна и равна $k_{\max} = P^{N \times N}$, где P – число градаций яркости.

Таким образом, все многообразие изображений существующих в природе хоть и велико, но конечно, а значит, система, раскрывающая неопределенность наблюдаемого изображения, есть автомат без памяти – «простая» *комбинационная схема*. Тем самым доказано первое условие на определение самообучающейся системы. Более того, представление изображения в виде пространственной модели $\mu(x, y)$ с его аксиоматическими свойствами по определению позволяет построить изоморфные модели объекта исследования с позиций алгебры моделей:

1) множество M образует группу $G = \langle M; + \rangle$ и является подпространством $E(M)$ скалярного поля E , где $E(M)$ – тело действительных чисел на бинарных операциях $m: M \times M \rightarrow M$, $m = \{+, \times\}$;

2) M есть подпространство $B(M)$ векторного пространства B над телом $E(M)$ с метрикой $d(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \|\mathbf{a} - \mathbf{b}\|$;

3) M есть подпространство $\Gamma(M)$ топологического пространства Γ с базой на семействе $d(a, b) < \delta$, изоморфное на классы упорядоченных векторных пространств и направленных векторных решеток;

4) M есть структура $L = \langle M; \cup, \cap, e_1, e_0 \rangle$, если на M определены бинарные операции \cup, \cap с соответствующей аксиоматикой, и отношение порядка $\rho (\leq)$.

Модель неопределенности

Пусть каждой точке из $M = \{\mu(i, j)\}$, где $(i, j) \in X \times Y$, соответствует вероятность элементарного события так, что выполняются все необходимые аксиомы. Поскольку конечное множество M есть полное пространство элементарных событий – генеральная совокупность в конечном объеме, то если каждому значению $\mu(i, j) \in M$ соответствует вероятность $P(\mu(i, j))$, то M есть *достоверное* событие на множестве равновероятных элементарных событий $P(\mu(i, j)) = p \forall \mu(i, j) \in M$; отсюда следует, что в условиях априорной неопределенности каждый элемент изображения равновероятен, а отношение между любой парой элементов в области определения есть отношение эквивалентности $(\mu(i, j), \mu(k, l)) \in \varepsilon$.

По У. Эшби сложность системы произвольной природы (без учета структурных связей) может быть оценена ее разнообразием – энтропией *неслучайного события* (по А. Н. Колмогорову), состоящего из k элементов. Пусть k есть максимально возможное число событий в пространстве изображений. Тогда количество информации, содержащееся в любом M , равно $J = \log k$, которое с позиций информационно-теоретического подхода интерпретируется как априорная неопределенность состояния M , т.е. максимальная энтропия равна H_m , либо как количество информации, необходимой для разрешения этой неопределенности, т.е. $(H_m - H) = O_H$ – организация системы по К. Шеннону, где H – текущая энтропия.

Обобщением изложенного является модель неопределенности как четырехфакторная модель, учитывающая (в отличие от известных) вероятностную, энтропийную, организационную (в смысле структурной сложности) и пространственно-структурную упорядоченность:

$$N_h = \langle \langle p_i = p \forall i; H = H_m = \log k; O_h = \emptyset; (a_i, a_j) \in \varepsilon \forall i, j \rangle \rangle. \quad (1)$$

Её обратной моделью является модель полной определенности. При этом, если N_h описывает полностью неопределенную систему – «черный ящик», то обратная модель N_o – описание полностью известной системы – «белого ящика». Процесс перехода от N_h к N_o за один шаг преобразования – *оптимальный процесс раскрытия априорной неопределенности*.

Модель процесса раскрытия неопределенности наблюдаемого изображения

Поскольку изображение как множество положительно определено и конечно, то оно само и каждая его подобласть допускает интегральное отображение типа ортогонального проектирования (теорема необходимости [1, 2]):

$$m(G_i) = \iint_{G_i} \mu(x, y) dx dy \quad (2)$$

по любой подобласти $G_i \subseteq G$.

С позиций физики (2) имеет смысл *массы*, т.е. изображению в области его определения и любой его подобласти допустимо поставить в соответствие массу как меру; эта масса есть «визуальная» масса изображения. Процесс раскрытия неопределенности, в силу (2), реализуется за один шаг преобразования, поэтому процесс оптимален по (1), а так как для его реализации требуется только операция суммирования (в дискретном варианте), то он – *максимально возможно вычислительно прост*. Поскольку весовая матрица преобразования имеет вид $1(x, y)$ по любой G_i , то такое преобразование обеспечивает: а) отсутствие необходимости ап-

риорного знания весовой маски фильтра; б) отсутствие необходимости реализации операции свертки, как самой вычислительно сложной операции во всех стандартных методах обработки изображений; в) результат преобразования принадлежит пространству действительных чисел, а не мнимых, как в преобразованиях Фурье.

Преобразование (2) определено **Q-преобразованием**, оно реализует информационные преобразования этапа *исходного описания*, а его интерпретации замыкается на интерпретации отображения пространства на точку массы $m(G_i)$:

1) с позиций системного анализа – структурная точка, достоверно (с вероятностью 1) представляющая область G_i с функцией $\mu(x, y)$ в этой области;

2) с позиций формальной теории композиции – композиционный (информационно значимый) центр; в) с позиций «точностного» анализа – ε -точная (по А.Н. Колмогорову) оценка многомерной функции в области ее определения, обеспечивающая минимум средней квадратической погрешности;

3) с позиций теории управления – ультрастабильная (по У. Эшби) точка и центр «потенциальной ямы»;

4) с позиций математической физики (теории сплошной среды, теории гармонических функций, теорема Гаусса) – средняя функция, допускающая два модельных (восстанавливающих) представления: а) с учетом гармоничности в замкнутой области определения – равномерное распределение потенциала любой точки A в области с центром A_0 : $\varphi(A) = m(A_0)$; б) с учетом гармоничности в открытой (двумерной) области определения – логарифмическое распределение потенциала относительно тяготеющей массы (или заряда) в центре: $\varphi(A) = m(A_0) \ln r$.

Поэтому Q-преобразование реализует отображение изображения, как объекта исследования, в абсолютно (бесконечно) гладкое многообразие.

Поскольку на множестве M существует отношение эквивалентности, то M факторизуемо, т.е. допускает естественный процесс разбиения на непересекающиеся открытые, либо замкнутые (гладко склеенные топологически) подобласти (карты). Оптимальным процессом разбиения в условиях априорной неопределенности является процесс дихотомии. Поэтому, разделив область G , где определено изображение, пополам и применив к каждой подобласти процедуру (2), получим две точки с массами $m(G_1)$, $m(G_2)$. Отношение между ними как мерами есть отношение $v(G) = m(G_1) - m(G_2)$, где преобразование $v(G) \equiv v(M)$ есть:

1) обратное преобразование относительно (2) (теорема достаточности, [1, 2]);

2) частная производная (а «не просто» конечная разность) по направлению x^i , ортогональному границе дихотомии области, и компонента градиента

$$v_i(G) = m(G_1) - m(G_2) = \partial\varphi(x, y)/\partial x^i = \mu_i; \quad (3)$$

3) выявление бинарного отношения строгого порядка (либо равенства, симметрии, инвариантности) на паре структурных точек, реализуемое только через арифметическую разность.

Отношение (3) определяет структурную (информационную) связь между структурными элементами системы *изображение*, получаемая за один шаг преобразования и обеспечивающая получение максимума информации в один бит (1). Само отношение применяется к гладкому (абсолютно) многообразию, где «нет помех и где вообще отсутствует понятие – помеха», выявляя дифференциальную структуру на этом многообразии (интегральную кривую).

Пара преобразование, первое из которых – интегральное, второе – дифференциальное, определены **U-преобразованием**, как композицией «истинно» (в смысле последовательности реализации) интегрально-дифференциального преобразования, в отличие от всех известных.

Пара преобразований (2), (3) полна в смысле теоремы Стокса и образует алгебраическую группу, которая, в силу конечности множества M , порождает пару конечных компози-

ционных рядов прямого и обратного преобразований. Эти ряды изоморфны в силу теоремы Жордана-Гёльдера и реализуемы (теорема реализуемости [1, 2]):

1) преобразование (2) реализуемо на линейном операторе $w_i = 1(x, y)$ по $G_i \subseteq G$;

2) преобразование (3) реализуемо на линейном операторе $v_i = \{1(x, y); -1(x, y)\}$, где первая половина принадлежит одной области дихотомии, вторая – другой.

Порядок рядов равен 16. Такой порядок композиционных рядов с позиций теории булевых алгебр на паре (x, y) независимых ортогональных направлений пространства E^2 , в соответствии с теоремой А.Н. Колмогорова (о числе булевых функций), свидетельствует о существовании 15 (если исключить из рассмотрения нуль-направление, единицу группы) независимых направлений x^i дихотомии области определения. Эти же направления, с позиции теории алгебр Ли и полей Киллинга, говорят о существовании 15 направлений сохранения физической величины (свойство сохраняемости обеспечивается инвариантностью скалярной функции относительно некоторого движения и необходимостью, чтобы это движение реализовалось вдоль векторного поля Киллинга того евклидова пространства, в котором реализуется движение; такие поля – поля постоянства фундаментального метрического тензора).

Таким образом, число дихотомий области определения, если не считать первую – нулевую дихотомию – саму область, равно 15; из них:

1) три варианта – дихотомия по x , дихотомия по y , дихотомия по x и y , определяют и задают матрицу 2×2 (пусть это будет матрица уровня K_2 ; тогда преобразованию (2) по всей области соответствует матрица 1×1 уровня K_1 ; пусть этой матрице соответствует фильтр F_0)

и три фильтра F_1, F_2, F_3 с преобразованиями (в E^2) $\partial\varphi(x, y)/\partial x$, $\partial\varphi(x, y)/\partial y$, $\partial^2\varphi(x, y)/\partial x\partial y$;

2) две пары фильтров по x и y соответственно реализуют преобразования по этим направлениям с наращиванием порядка производной – $\{\partial^2\varphi(x, y)/\partial x^2, \partial^3\varphi(x, y)/\partial x^3\}$, $\{\partial^2\varphi(x, y)/\partial y^2, \partial^3\varphi(x, y)/\partial y^3\}$ – $\{F_4, F_9; F_5, F_{10}\}$;

3) оставшиеся восемь фильтров – векторная комбинация (произведение) троек фильтров, упорядоченных по направлениям x, y декартовой системы координат – (F_1, F_4, F_9) , (F_2, F_5, F_{10}) .

Результатом имеем, *во-первых*, решетку 4×4 в прямоугольной декартовой системе координат с вершинами $F_i, i = 0, 1, \dots, 15$ (нумерация фильтров условна); *во-вторых*, матрицу 4×4 уровня K_4 и планигон (как геометрический образ матрицы). Все фильтры (исключение составляют F_0, F_1, F_2, F_3) определены на уровне K_4 , где разрешение выше в два раза по сравнению с уровнем K_2 . Следовательно, композиционные ряды преобразований (2), (3) образуют две пирамиды с уровнями K_1, K_2, K_4 : первая – интегральная, реализует преобразование (2); вторая – дифференциальная, реализует (3) на множестве направлений $\{x^i\}$. Вместе они образуют **Q-пирамиду**, а процесс их применения к объекту исследования для раскрытия его неопределенности – **Q-технология**. В силу теоремы Жордана-Гёльдера Q-пирамида и технология на ее основе универсальны и фундаментальны (теоремы оптимальности и единственности [1, 2]). Специфика такой пирамидальной технологии в том, что все преобразования (разложение, анализ, восстановление, синтез, принятие решения) реализуются «сверху-вниз», от целого к частному, отвечая тем самым главному признаку восприятия – целостности, а для зрительной системы – одномоментности восприятия. Особенность пирамидальной технологии – четность на уровнях (слоях, картах) и нечетность по числу уровней.

В приложении к системе зрительного восприятия на уровне сетчатки глаза такая пирамида есть «пирамида» трех слоев нейронов, надстроенных над «сетчаткой и растущих» против падающего луча света: внизу находятся рецепторы, вверху – ганглиозные клетки. Такое конструктивное образование – слой сетчатки как трехмерной системы. В приложении к системе зрительного восприятия на уровне зрительной коры головного мозга такая пирамида

есть пирамида нейронных клеток – простых, сложных и сверхсложных, образующих пирамидные клетки [3, 4].

Анализ изображения

Анализ изображения предполагает два этапа информационных преобразований. Результатом первого является множество визуальных масс, упорядоченных в координатах исходного пространства $\|m_{ij}\|$. Результатом второго является вектор $\mu = (\mu_0 \equiv m_0, \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{15})$, где $\mu_0 \equiv m_0$ – вершина Q -пирамиды; (μ_1, μ_2, μ_3) – компоненты уровня K_2 ; остальные – компоненты уровня K_4 . Поскольку каждый фильтр из множества $\{F_i\}$ «решает» уравнение в частных производных, то его решением должна быть интегральная кривая (допускающая представление касательными; теорема интерпретации [1, 2]), которая является изобразительным описанием объекта исследования (формализация проблемы остовов в компьютерных системах понимания изображений).

Все фильтры из $\{F_i\}$, реализуя преобразование (3), являются функциями чувствительности в ряде Тейлора и поэтому процедура их применения (но только после Q -преобразования и по всей области определения) – решение **задачи активной идентификации** (именно по этой причине рассматриваемая теория и получила свое название), выявляющей множество структурных элементов и их связей (учет, например, полутонов матрицы $\|m_{ij}\|$ позволяет решать задачу параметрической идентификации к первоначально полученному результату структурной идентификации).

С позиций векторного анализа преобразования (3), реализуемые фильтрами (k – покрытиями), являются градиентами по своим направлениям чувствительности. В декартовой системе координат (x, y) преобразованиям фильтров F_1, F_2 соответствуют компоненты градиента по направлениям x и y ; преобразованиям фильтров F_4, F_5 – компоненты дивергенции, а F_3 – компонента ротации в плоскости xOy с направлением в E^3 [4]. Поэтому множество $\{F_i\}$, с позиции теоремы разложения Гельмгольца, необходимо и достаточно для анализа изображения, как векторного поля (но только после реализации Q -преобразования).

С позиций тензорного анализа и римановых пространств применение планигона, как евклидовой касательной в точке A_0 плоскости к геометрически сложной поверхности, – анализ внутренней геометрии этой поверхности. Поэтому множество $\{F_i\}$ на реализуемых преобразованиях вида $\{\partial^k/\partial x^n \partial y^m\}$ обеспечивает анализ этой геометрии. Более того, по определению – кривая в пространстве аффинной связности называется геодезической, если всякий вектор, касательный к этой кривой в точке, остается к ней касательным при параллельном переносе вдоль этой кривой. Следовательно, множество $\{F_i\}$ как множество на независимых преобразованиях поля Киллинга позволяет выявлять геодезические. Тем самым решена вторая проблема построения самообучающейся системы – конечное число преобразований изображения на заданном уровне разрешения, формирующих конечное число признаков на этапе их формирования.

Алгебра описания изображения

Основные положения задачи синтеза изложены в работе [2]. Здесь выделим следующие моменты. Пусть каждому фильтру $F_i \in \{F_i\} \equiv F$ соответствует координатно-определенный бинарный оператор $V_i \in \{V_i\} \equiv V$; тогда компоненте $\mu_i \neq 0$ вектора μ допустимо поставить в соответствие оператор V_i либо \bar{V}_i в зависимости от знака компоненты. В результате вектору μ ставится в соответствие подмножество операторов из $\{V_i\}$, имеющих аналогичную фильтрам конструкцию, но разное значение элементов матрицы ($+1 \leftrightarrow 1$; $-1 \leftrightarrow 0$). Задавая на множестве $\{V_i\}$ операции умножения и сложения получаем алгебру описания изображения в двумерных булевых функциях. Такая алгебра есть алгебра синтеза изображений на планигоне, а синтезированный объект – **образ** (зрительный образ) наблюдаемого изображения.

Множество фильтров и им эквивалентных операторов, определенных на преобразованиях $\partial/\partial x^i$, допускает векторное представление, результатом которого являются:

1) семейство (алгебраических) полных групп $\{P_{ni}\}$ вида $P_{ni} = \{V_i, V_j, V_k\}$ мощности 35, где каждая группа изоморфна на сложный нейрон, а их подмножество мощности 32 – на кристаллографические группы;

2) семейство (алгебраических) замкнутых групп $\{P_{si}\}$ вида $P_{si} = \{V_i, V_j, V_k, V_r\}$ мощности 105, где каждая группа изоморфна на сверхсложный нейрон и образована из пары определенным образом связанных полных групп.

Семейства этих групп допускают свое использование на этапах принятия решений и понимания анализируемого изображения.

Принятие решений в пространстве эталонов

В соответствии с изложенным пространство классов фактически есть пространство эталонных изображений, представленных в пятнадцатимерном признаковом пространстве (подробнее см. [3]). Последнее построено на базисе пятнадцати независимых градиентных преобразований $\partial/\partial x^i$, где $i = 1, \dots, 15$, образующих евклидово пространство E^{15} . В этом пространстве подмножества эталонных изображений в силу гипотезы компактности образуют классы близких эталонных изображений – точек подмножества, для которых близость необходимо должна определяться некоторым евклидовым расстоянием r . Такой подход естественен, правомерен и является стандартным подходом в теории распознавания образов. Однако он требует знания значения r и априорного знания того, что есть эталон класса. В качестве последнего должно выступать некоторое обобщенное изображение на подмножестве эталонных изображений, позволяющее успешно (желательно достоверно, что с позиций теории распознавания не обязательно – допустима некоторая доверительная вероятность положительного решения; с позиций теории активного восприятия решение проблемы узнавания должно реализоваться достоверно, либо с положительной ошибкой) решить проблему классификации – «свой-чужой». Такое обобщенное изображение называется **выработанным, обобщенным эталоном** класса эталонных изображений. Проблемы существования врожденных эталонов в теории распознавания образов даже не обсуждаются.

В рамках Q -технологии с позиций алгебры описания изображений пространством врожденных эталонов являются [3]:

1) пространство операторов $V = \{V_i\}$ с базисом \mathbf{e}_i , где орт (репер) \mathbf{e}_i определен координатным базисом $\{\partial/\partial x^i\}$. Поскольку множество V имеет мощность, равную пятнадцати, то для полного представления необходимо евклидово пространство E^{15} ;

2) пространство полных групп $P_n = \{P_{ni}\}$ со своим базисом \mathbf{e}_i . Поскольку множество P_n имеет мощность 35 (или 36, если учитывать единственную полную группу (удовлетворяющую соответствующему определению) – оператор V_0), для полного представления необходимо евклидово пространство E^{35} (или E^{36});

3) пространство замкнутых групп $P_s = \{P_{si}\}$ со своим базисом \mathbf{e}_i . Поскольку множество P_s имеет мощность 105, то для полного представления необходимо евклидово пространство E^{105} .

Таким образом, имеем три типа пространств эталонов. Если каждое из них, а точнее каждое направление (в силу независимости) считать направлением поля Киллинга, то получаем три типа евклидовых пространств размерности: – пять для множества V ; – восемь для множества P_n ; – 14 для множества P_s . В этом случае:

1) каждое наблюдаемое изображение, предъявленное учителем и представленное на планигоне (как бинарной матрице) ученика, есть образ и эталонное изображение для ученика;

2) образ, сформированный на подмножестве эталонных изображений, объединенных (возможно учителем) в класс, есть выработанный, обобщенный эталон.

Три класса пространств определяют естественным образом три связанных друг с другом пространств врожденных эталонов в E^n , которые образуют «потенциальные энергетические или гравитационные ямы» и могут выступать в роли базисных на множестве 2^{16} :

- 1) пространство, определенное множеством $\{V_i\}$, $-E^{15}$;
- 2) пространство, определенное множеством $\{P_{ni}\}$, $-E^{35}$ (без учета полной группы V_0);
- 3) пространство, определенное множеством $\{P_{si}\}$, $-E^{105}$.

Каждое выделенное пространство имеет свой ортогональный базис: $V = \{V_i e^i\}$; $P_n = \{P_{ni} e^i\}$; $P_s = \{P_{si} e^i\}$. Поскольку каждый элемент множества по каждому пространству эталонов – тяготеющий элемент – центр класса, то любой вектор $\mu(M_i)$, удовлетворяющий необходимым условиям, принадлежит классу эталона. И это верно по всем трем пространствам эталонов. Поэтому классы эталонов в пространстве эталонов образуют сектора с центром в начале координат, разделенные дискриминантными функциями $g(V)$ в пространстве $\{V_i\}$ и $g(P_{ni})$ в пространстве $\{P_{ni}\}$.

Изложенные положения оформлены в виде теории активного восприятия изображения, как объекта исследования.

Предмет теории – свойства и закономерности системы зрительного восприятия, представленной информационными моделями.

Объект исследования теории – изображение, априори неопределенное в поле зрения.

Область применения – анализ, синтез изображений, автоматическая классификация в условиях отсутствия (либо частичного наличия) априорной информации о наблюдаемом изображении. Полученные результаты достоверны и ϵ -точны или «абсолютно» точны при заданной погрешности.

Библиографический список

1. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений: учеб. пособие / В.А. Утробин; НГТУ. – Нижний Новгород, 2001. – 234 с.
2. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез: учеб. пособие / В.А. Утробин; НГТУ. – Нижний Новгород, 2003. – 228 с.
3. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов: учеб. пособие / В.А. Утробин; НГТУ. – Нижний Новгород, 2004. – 221 с.
4. **Утробин, В.А.** Физические интерпретации элементов алгебры изображения // УФН. 2004. Т. 174. № 10. С. 1089–1104.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

V.A. Utrobin

ELEMENTS OF THE THEORY OF ACTIVE PERCEPTION OF IMAGES

Visual perception, Substantive provisions of the theory of active perception are stated as information model of congenital mechanisms of system of visual perception of a predesign stage of images in the conditions of aprioristic uncertainty.

Key words: recognition of images, aprioristic uncertainty, the analysis of images, information models, stages of processing of images.

УДК 681.518

В.Р. Милов, В.Г. Баранов, А.Ю. Эпштейн, И.В. Шалашов

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ДИСКРЕТНЫХ СТОХАСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НА ОСНОВЕ БАЙЕСОВСКОЙ МЕТОДОЛОГИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается вероятностно-статистический подход к прогнозированию состояния технических систем. Разработан прототип программного обеспечения для прогнозирования состояния систем, описываемых скрытыми марковскими моделями.

Ключевые слова: динамическая байесовская сеть, скрытая марковская модель, фильтрация, прогнозирование, структурно-параметрическое обучение.

Модели дискретных стохастических систем

Для описания функционирования стохастических систем с памятью находят применение модели в пространстве переменных состояния. Один из развивающихся способов моделирования заключается в использовании динамических байесовских сетей (ДБС). Динамическая байесовская сеть может быть представлена как пара $\{B_1, B_2\}$, где B_1 — байесовская сеть, задающая априорное распределение $P(\mathbf{z}(1))$; B_2 — байесовская сеть, состоящая из двух слоев и определяющая вероятности переходов

$$P(\mathbf{z}(n) | \mathbf{z}(n-1)) = \prod_{i=1}^R P(z_i(n) | Pa(z_i(n))). \quad (1)$$

Здесь $\mathbf{z} = [z_1, \dots, z_R]^T$ — вектор случайных величин, используемых для описания стохастической системы; $Pa(z_i(n))$ — множество родительских переменных для i -й переменной.

Зачастую множество переменных Z может быть представлено как объединение множества непосредственно не наблюдаемых переменных состояния системы X и множества регистрируемых величин Y , характеризующих состояние. При этом для описания системы обычно задается модель состояния, описывающая динамику изменения во времени вероятностей нахождения системы в различных состояниях, и модель наблюдения, описывающая связь наблюдений с состоянием системы. Эти модели определяются условными распределениями вероятностей $P(\mathbf{x}(n+1) | \mathbf{x}(n))$ и $P(\mathbf{y}(n) | \mathbf{x}(n))$ соответственно, а также распределением вероятностей $P(\mathbf{x}(1))$ состояния в начальный момент времени.

На рис. 1 представлены примеры графических моделей, соответствующих ДБС с единственной переменной состояния и единственной переменной наблюдения: скрытая марковская модель (СММ) и авторегрессионная СММ.

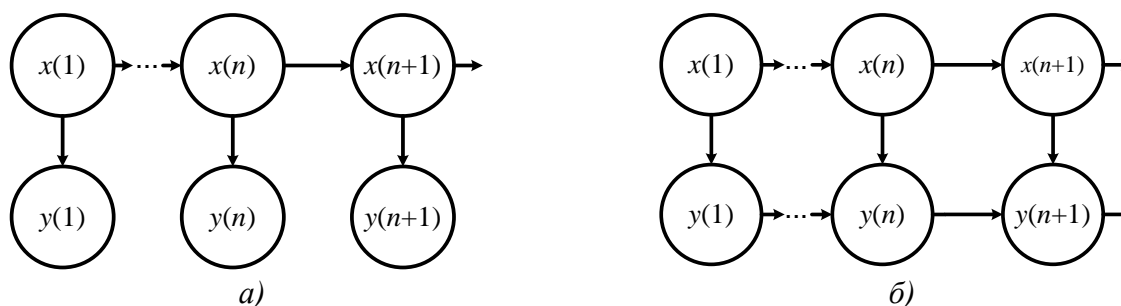


Рис. 1. Примеры графических моделей ДБС:

а — СММ; б — авторегрессионная СММ

Скрытая марковская модель соответствует ДБС с единственной дискретной переменной состояния, которая недоступна для наблюдения и определяются следующими распределениями и параметрами:

Распределение вероятностей начального состояния $\pi_i = P(x(1) = a_i)$.

Модель состояния, задаваемая с помощью $(r \times r)$ -матрицы переходов \mathbf{A} с элементами $A_{i,j} = P(x(n+1) = a_j | x(n) = a_i)$, $i, j = \overline{1, r}$, где r – количество состояний.

Модель наблюдения в случае дискретных наблюдений задается с помощью $(r \times h)$ -матрицы \mathbf{B} с элементами $B_{i,j} = P(y(n) = b_j | x(n) = a_i)$, $i = \overline{1, r}$, $j = \overline{1, h}$, где h – количество возможных наблюдаемых значений. В случае действительных наблюдений часто используется гауссовское распределение с условной плотностью вероятности $p(y(n) = \xi | x(n) = a_i) = N(\xi; \mu_i, \Sigma_i)$, где μ_i — математическое ожидание и Σ_i – ковариационная матрица для i -го состояния системы.

Процедуры прогнозирования и фильтрации

В многочисленных практически важных задачах интерес представляет прогнозирование состояния стохастической системы. Для этого находятся вероятности

$$P(x(n+\tau+1) | \mathbf{Y}_{1:n}) = \sum_{x(n+\tau)} P(x(n+\tau+1) | x(n+\tau)) P(x(n+\tau) | \mathbf{Y}_{1:n}), \quad \tau = \overline{0, \tau_{\Pi} - 1}. \quad (2)$$

Здесь $\mathbf{Y}_{1:n}$ — последовательность наблюдений $y(1), \dots, y(n)$, величина τ_{Π} определяет горизонт прогнозирования. Основу для прогнозирования представляет процедура фильтрации, в результате которой находятся вероятности

$$\begin{aligned} P(x(n) | \mathbf{Y}_{1:n}) &= \eta P(y(n) | x(n), \mathbf{Y}_{1:n-1}) P(x(n) | \mathbf{Y}_{1:n-1}) = \\ &= \eta P(y(n) | x(n)) \left[\sum_{x(n-1)} P(x(n) | x(n-1)) P(x(n-1) | \mathbf{Y}_{1:n-1}) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где $\eta = 1 / P(y(n) | \mathbf{Y}_{1:n-1})$ — константа нормализации.

Для случая СММ с дискретными переменными процедуры прогнозирования и фильтрации могут быть представлены в матричном виде

$$\mathbf{P}(x(n+\tau+1) | \mathbf{Y}_{1:n}) = \mathbf{A}^T \mathbf{P}(x(n+\tau) | \mathbf{Y}_{1:n}), \quad \tau = \overline{0, \tau_{\Pi} - 1}, \quad (4)$$

$$\mathbf{P}(x(n) | \mathbf{Y}_{1:n}) = \eta \mathbf{O}(n) \mathbf{A}^T \mathbf{P}(x(n-1) | \mathbf{Y}_{1:n-1}), \quad \mathbf{P}(x(1) | \mathbf{Y}_1) = \eta \mathbf{O}(1) \boldsymbol{\pi}. \quad (5)$$

Здесь $\mathbf{P}(x | \mathbf{Y}) = [P(x = a_1 | \mathbf{Y}), \dots, P(x = a_r | \mathbf{Y})]^T$, $\mathbf{O}(n) = \{O_{i,j}(n)\}$ — диагональная матрица с элементами $O_{i,i}(n) = B_{i,\tilde{j}}$, где $\tilde{j} = \arg\{y(n) = b_j\}$.

Структурно-параметрическое обучение

При наличии неопределенности модель системы определена не полностью. В общем случае возникает необходимость определения как параметров $\boldsymbol{\theta}$, так и структуры s модели [1]. На основе доступной обучающей выборки \mathbf{D} может быть выполнена процедура обучения.

В условиях, когда обучающая выборка содержит значения не только переменных наблюдения $y(n)$, но и состояния $x(n)$, т.е. $\mathbf{D} = \{\mathbf{X}, \mathbf{Y}\}$, оценка параметров при фиксированной структуре s может быть найдена по критерию минимума среднего риска, например, как апостериорное среднее, либо по критерию максимального правдоподобия

$$\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ML} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} L(\mathbf{D} | \boldsymbol{\theta}, s). \quad (6)$$

Здесь $L(\mathbf{D} | \boldsymbol{\theta}, s)$ — логарифм функции правдоподобия, определяемый выражением

$$L(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, s) \equiv \ln P(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, s) \equiv \ln P(\mathbf{X}, \mathbf{Y}|\boldsymbol{\theta}, s) = \\ = \ln P(x(1)|\boldsymbol{\theta}, s) + \sum_{n=2}^N \ln P(x(n)|x(n-1), \boldsymbol{\theta}, s) + \sum_{n=1}^N \ln P(y(n)|x(n), \boldsymbol{\theta}, s). \quad (7)$$

Задача определения структуры модели может быть решена по критерию максимума апостериорной вероятности. В распространенном случае различные структуры модели полагаются априори равновероятными. При этом оптимальная структура модели доставляет максимум логарифму маргинальной функции правдоподобия

$$L(\mathbf{D}|s) \equiv \ln P(\mathbf{D}|s) = \ln \int_{\Theta} P(\mathbf{D}|\boldsymbol{\theta}, s) p(\boldsymbol{\theta}|s) d\boldsymbol{\theta}. \quad (8)$$

В общем случае интегрирование в (8) выполняется приближенно. Достаточно часто для выбора структуры модели находит применение информационный критерий Акаике

$$L_{AIC}(\mathbf{D}/s) = L(\mathbf{D}/\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ML}, s) - \gamma. \quad (9)$$

При использовании байесовского информационного критерия целевая функция структурной оптимизации определяется выражением

$$L_{BIC}(\mathbf{D}/s) = L(\mathbf{D}/\hat{\boldsymbol{\theta}}_{ML}, s) - \frac{\gamma}{2} \ln N, \quad (10)$$

где N – объем обучающей выборки; γ – эффективное количество параметров. Например, при определении порядка q цепи Маркова эффективное количество параметров γ , согласно [2], составляет

$$\gamma = r^q (r - 1). \quad (11)$$

В случае, когда значения переменных состояния отсутствуют в обучающей выборке, т.е. $\mathbf{D} = \mathbf{Y}$, оценку параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ для заданной структуры s модели позволяют найти процедуры, основанные на EM-алгоритме. Этот алгоритм сходится к локальному максимуму функции правдоподобия $P(\mathbf{Y}|\boldsymbol{\theta}, s)$ и состоит из последовательности итераций, включающих E и M-шаги. Итерационная процедура оценки параметров, согласно [3], имеет вид

$$\hat{\boldsymbol{\theta}} = \arg \max_{\boldsymbol{\theta}} \sum_{\mathbf{X}} P(\mathbf{X}|\mathbf{Y}, \tilde{\boldsymbol{\theta}}, s) L(\mathbf{X}, \mathbf{Y}|\boldsymbol{\theta}, s), \quad (12)$$

где $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ и $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ — оценки параметров на предыдущей и данной итерациях соответственно.

Соответствующую процедуру для обучения СММ представляет известный алгоритм Баума-Уэлша. На E-шаге с использованием найденных на предшествующей итерации оценок параметров $\tilde{\boldsymbol{\theta}}$ с помощью процедуры интерполяции на фиксированном интервале, включающей рекуррентные вычисления в прямом и обратном времени, определяются так называемые прямые и обратные переменные [4]

$$\alpha(n) = P(x(n)|\mathbf{Y}_{1:n}), \quad \beta(n) = P(\mathbf{Y}_{n+1:N} | x(n)), \quad n = \overline{1, N}. \quad (13)$$

С помощью этих переменных вычисляются ожидаемые статистики

$$\xi_{i,j}(n) = P(x(n) = a_i, x(n+1) = a_j | \mathbf{Y}, \boldsymbol{\theta}), \quad (14)$$

$$\chi_i(n) = P(x(n) = a_i | \mathbf{Y}, \boldsymbol{\theta}). \quad (15)$$

Затем на M-шаге с использованием вычисленных величин находятся новые оценки $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ параметров СММ. Шаги EM-алгоритма повторяются до наступления сходимости итерационного процесса.

При наличии скрытых переменных структура и параметры моделей могут быть найдены с помощью структурного EM-алгоритма [5], на каждой итерации которого находятся новые оценки как параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}$, так и структуры модели \mathcal{E} . В рамках байесовской методологии в [6] получен вариационный байесовский EM-алгоритм (VBEM), который может рассматриваться как обобщение EM-алгоритма. С помощью VBEM может быть найдена оценка параметров $\hat{\boldsymbol{\theta}}$ по критерию максимума апостериорной плотности вероятности

$p(\theta | \mathbf{Y}, s)$, а также нижняя граница для логарифма маргинальной функции правдоподобия $P(\mathbf{Y} | s)$, что позволяет выполнять селекцию моделей.

После завершения процесса обучения СММ может применяться для решения задач фильтрации и прогнозирования.

Моделирование процедур структурно-параметрического обучения

В качестве примера для моделирования рассмотрим систему с четырьмя состояниями $a_i, i = \overline{1,4}$, между которыми возможны только последовательные переходы. Так, переход от a_2 к a_4 , минуя a_3 , невозможен, а также запрещены обратные переходы. Такая модель (рис. 2) является частным случаем процесса гибели и размножения.

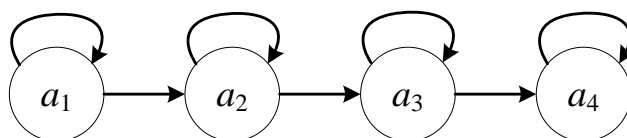


Рис. 2. Диаграмма состояний

Состояние моделируемой системы непосредственно не наблюдается. В каждый момент времени наблюдается вектор $\mathbf{y}(n) = [y_1(n), y_2(n)]^T$, компоненты которого представляют собой реализации гауссовских случайных величин со средними μ_{1i} , μ_{2i} и дисперсиями D_{1i} , D_{2i} , зависящими от скрытого состояния a_i . Кроме того, полагается, что $y_1(n)$ и $y_2(n)$ условно независимы.

Для реализации процедур прогнозирования состояния дискретных стохастических систем в среде MatLab с использованием пакета расширения BNT разработана программа, которая позволяет проводить структурное и параметрическое обучение, а также выполнять процедуры фильтрации и прогнозирования на основе реальных наблюдений или генерируемых (синтетических) данных.

Для сравнения байесовского информационного критерия (BIC) и информационного критерия Акаике (AIC) с помощью моделирования получена зависимость оценок порядка цепи Маркова, соответствующей модели состояния СММ, от объема обучающей выборки (рис. 3). При моделировании сформированы последовательности длиной $N = 200$ элементов, сгенерированные моделью второго порядка. В каждый момент дискретного времени $n = \overline{1, N}$ с помощью AIC и BIC найдены оценки порядка марковской цепи.

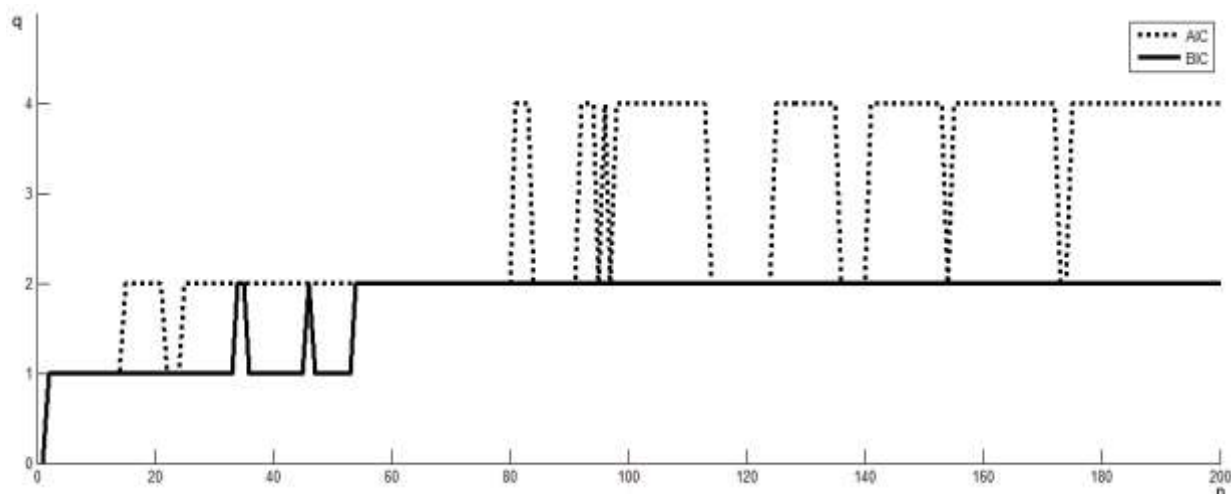


Рис. 3. Оценки порядка цепи Маркова

Результаты моделирования (рис. 3) свидетельствуют, что при малом объеме выборки решения принимаются в пользу моделей, более простых, чем модель, использованная для генерации обрабатываемых последовательностей. При увеличении длины наблюдаемой последовательности оценка порядка по ВИС сходится к истинному значению. При использовании АИС наблюдается систематическое завышение порядка модели, что согласуется с выводами, представленными в [7].

При параметрическом обучении выполнено сравнение оценок параметров по критериям максимума правдоподобия (ML) и минимума среднего риска (MAR). В качестве характеристики точности оценок параметров использована ошибка обучения, которая определяется как сумма квадратов разностей между истинными значениями переходных вероятностей (известными при моделировании) и значениями, полученными в результате обучения

$$E = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r (A_{i,j} - \hat{A}_{i,j})^2. \quad (16)$$

На рис. 4 показаны значения ошибок, полученные при параметрическом обучении десяти цепей Маркова по выборкам различного объема.

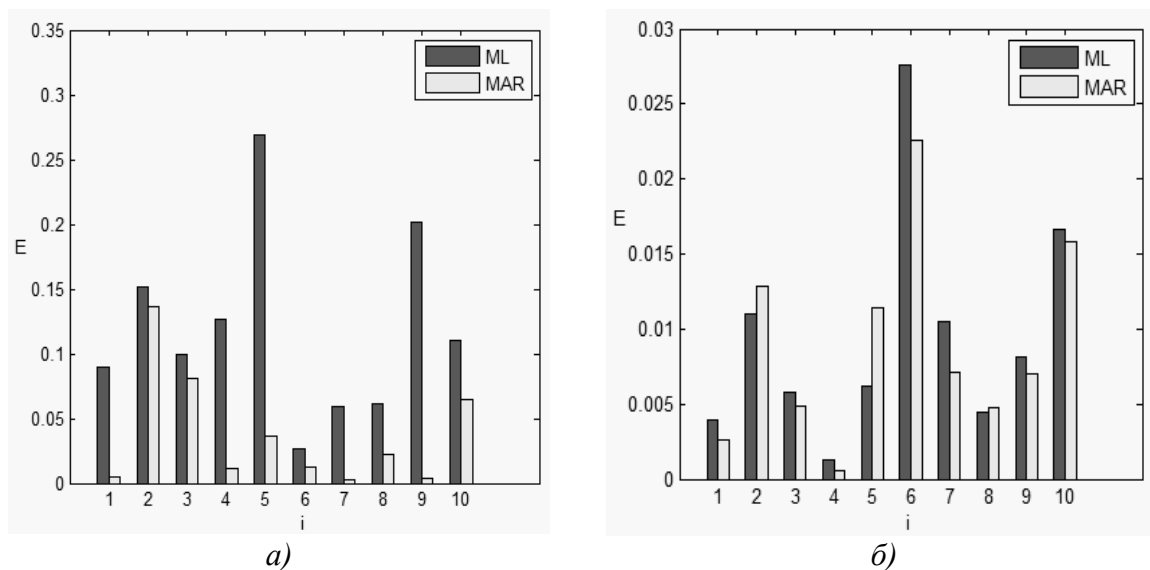


Рис. 4. Ошибки оценок переходных вероятностей по выборкам:
 а – объемом $N=10$ элементов; б – объемом $N=50$ элементов

Результаты моделирования (рис. 4) демонстрируют превосходство байесовского подхода, которое в наибольшей степени проявляется в условиях малых выборок.

Моделирование процедур прогнозирования состояния системы

Для СММ (рис. 2) выполнено моделирование процедур фильтрации и прогнозирования состояния. Для этого сформирована последовательность состояний и последовательности данных наблюдения, примеры которых приведены на рис. 5. Вертикальными штриховыми линиями обозначены моменты смены состояния. Последовательность переходов a_1, a_2, a_3, a_4 можно рассматривать как представление процесса деградации системы.

Эти последовательности подаются на вход процедур фильтрации и прогнозирования: в каждый момент времени $n = \overline{1, N}$ используется часть $\mathbf{Y}_{1:n}$ сгенерированной последовательности наблюдений. С помощью фильтрации вычисляются апостериорные вероятности состояний для шагов с 1 до n , а также выполняется прогнозирование состояния системы на τ_{Π} шагов. На рис. 6, а представлены результаты прогнозирования на $\tau_{\Pi} = 40$ шагов в начальный момент времени, на рис. 6, б и 6, в – результаты фильтрации и прогнозирования после 40 и

80 шагов наблюдения соответственно. Графики (рис. 6) свидетельствуют, что в рассматриваемом примере процедура фильтрации позволяет достаточно точно установить смену состояний системы.

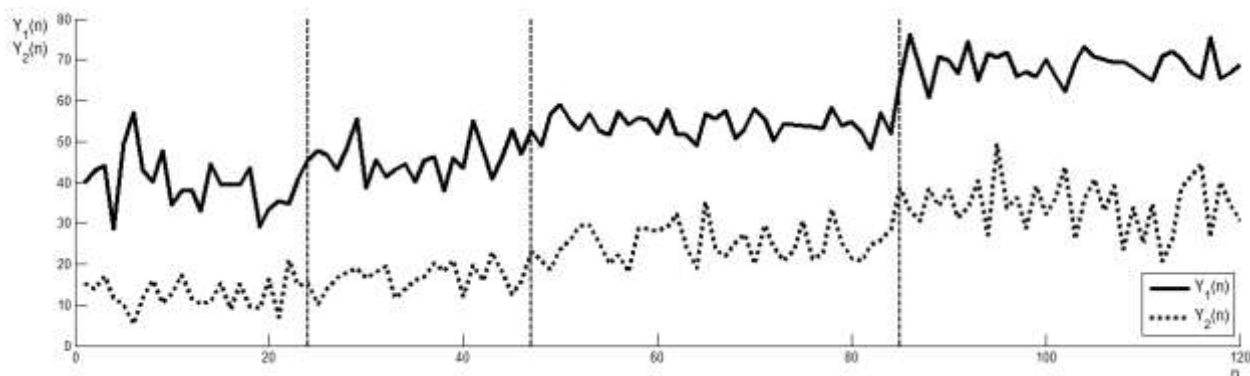


Рис. 5. Реализации данных наблюдения

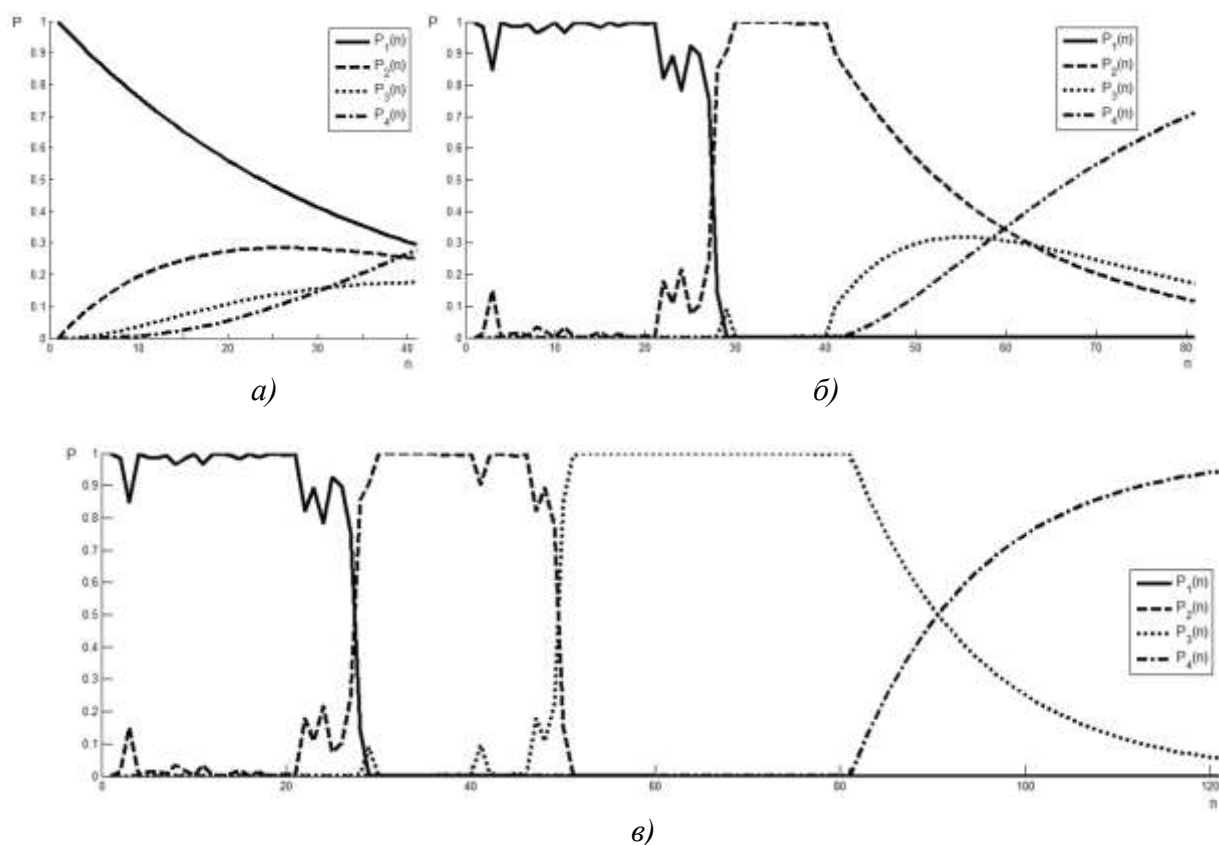


Рис. 6. Результаты прогнозирования:

a – на основе априорной информации; *б* – после 40 шагов; *в* – после 80 шагов

Вывод

На основе байесовской методологии с использованием известных алгоритмов сформированы процедуры структурно-параметрического синтеза, а также процедуры фильтрации и прогнозирования состояния стохастических систем, описываемых при помощи скрытых марковских моделей. Эти процедуры реализованы в среде MatLab в программном обеспечении прогнозирования состояния технических систем. Результаты работы могут найти применение в составе систем диагностики и управления состоянием сложных технических систем, а также систем технического обслуживания и ремонта.

Библиографический список

1. **Милов, В. Р.** Структурно-параметрический синтез нейросетевых моделей нестационарных систем / В. Р. Милов, С. А. Шалюгин // IX Всероссийская науч.-техн. конф. «Нейроинформатика-2007»: сб. науч. тр. – М.: МИФИ, 2007. Ч. 1. С. 205–213.
2. **Katz, R.** On some criteria for estimating the order of a Markov chain / Richard W. Katz // Technometrics. 1981. V. 23. № 3. – P. 243–249.
3. **Рассел, С.** Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг; пер. с англ. К. А. Птицына. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1408 с.
4. **Rabiner, L.** A tutorial on Hidden Markov Models and selected applications in speech recognition / Lawrence R. Rabiner // Proceedings of the IEEE. 1989. V. 77. № 2. – P. 257–285.
5. **Friedman, N.** The Bayesian Structural EM Algorithm // Fourteenth Conf. on Uncertainty in Artificial Intelligence. 1998. – P. 129–138.
6. **Ghahramani, Z.** Propagation algorithms for variational Bayesian learning / Z. Ghahramani, M.J. Beal // Neural Information Processing Systems 13, 2001. – P. 507–513.
7. **Csiszár, I.** The consistency of the BIC Markov order estimator / Imre Csiszár, Paul C. Shields // The Annals of Statistics. 2000. V. 28. № 6. – P. 1601–1619.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

V.R. Milov, V.G. Baranov, A.Yu. Epshteyn, I.V. Shalashov

DISCRETE STOCHASTIC SYSTEM STATE PREDICTION UNDER UNCERTAINTY ON THE BASIS OF BAYESIAN APPROACH

Probabilistic-statistical approach to technical state prediction is examined. Software prototype for state prediction for the systems described by hidden Markov models is developed.

Keywords: dynamic Bayesian network, hidden Markov model, filtering, prediction, structure-parameter learning.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791

Б.П. Конищев¹, А.А. Родионов², А.С. Митин³

ОЦЕНКА ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ТРУБ МАГИСТРАЛЬНЫХ ГАЗОПРОВОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева¹,
ОАО «Выксунский металлургический завод»²,
ООО «Научно-исследовательский институт природных газов
и газовых технологий – ВНИИГАЗ»³

На основе энергетического критерия механики разрушения с привлечением модельных представлений о трещине с тонкой пластической зоной перед вершиной (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка) проведен анализ трещиностойкости металла труб магистральных газопроводов. Предложен способ построения эталонных диаграмм разрушения труб магистральных газопроводов на основе обработки результатов натурных испытаний и требований нормативно-технической документации на трубы большого диаметра.

Ключевые слова: газопровод, электросварные прямошовные трубы, дуговая сварка под флюсом, трещиностойкость, ударная вязкость, гидростатическое давление.

Введение

Известно, что трубы для магистральных газопроводов должны соответствовать жестким требованиям нормативно-технической документации к основному металлу и сварным соединениям.

Комплекс необходимых свойств металла труб обеспечивается за счет оптимального сочетания прочностных характеристик, требований к пластичности и трещиностойкости (вязкости) трубных сталей.

Под *трещиностойкостью* металла труб в каждом конкретном случае, в соответствии с современными представлениями [1], будем понимать числовое значение критерия разрушения, определяемого неравенством вида:

$$F(p, L, T, a_i/L, b_k/L) \leq F_c, \quad (1)$$

где p – параметр внешней нагрузки; L – характерный размер трещины; a_i – другие размеры трещины, b_k – размеры элемента конструкции; $F(p, L, T, a_i/L, b_k/L)$ – аналитическое выражение критериальной величины, а F_c – критическое значение этой величины.

На плоскости (p, L) выражение $F(p, L) = F_c$, характеризующее предельное (критическое) состояние равновесия объекта с трещиной, является уравнением линии, которая называется критической диаграммой разрушения (далее – *диаграмма разрушения*). Она отделяет безопасную область (трещина не развивается), в которой $p < p_c$, $L < L_c$, от опасной (трещина распространяется), где $p > p_c$, $L > L_c$.

Этапы процесса разрушения газопровода могут быть представлены следующим образом [2]:

- а. **Зарождение дефектов** - формирование трещины.
- б. **Медленное развитие дефекта** - дефекты под воздействием того или иного фактора (или совокупности факторов) увеличиваются до своих критических размеров.
- в. **Иницирование** - в тот момент, когда воздействующие факторы (нагрузка, температура и др.), а также размер и ориентация дефекта достигнут определенного сочетания, дефект становится неустойчивым и вызывает быстро развивающееся разрушение.
- г. **Распространение** - конструкция находится в процессе разрушения.
- д. **Остановка** - на данном этапе вследствие определенных обстоятельств разрушение приостанавливается.

Представленные далее результаты относятся к изучению процесса разрушения на стадии иницирования трещины при относительно низких скоростях нагружения, обусловленном режимом работы гидравлических прессов на заводах-изготовителях труб (статическая трещиностойкость).

Режим испытаний соответствует характеру нагружения действующих магистральных газопроводов, для которых, в отличие от нефтепроводов, не характерны циклические нагрузки, вызванные особенностями работы насосных станций.

Достаточная трещиностойкость металла на стадии иницирования трещин позволяет предотвратить распространение трещины и, тем самым, обеспечить работоспособность магистрального газопровода.

Условия разрушения газопроводов. Уравнение диаграммы разрушения

Схема границ областей расчета трубопровода с трещиной приведена на рис. 1 [3].

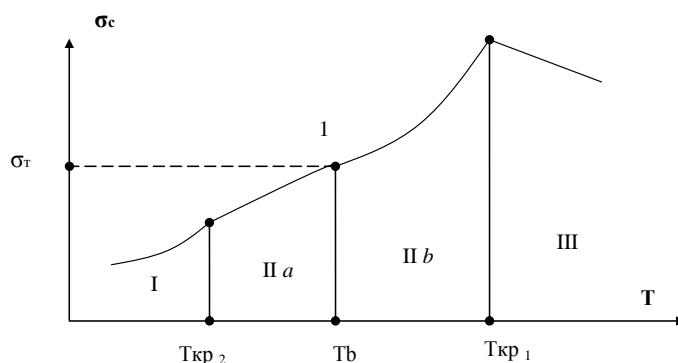


Рис. 1. Границы областей расчета:

σ_c – разрушающее напряжение в брутто-сечении; I – область хрупкого разрушения; II a и II b – области квазихрупкого разрушения при $\sigma_c \leq \sigma_t$ и $\sigma_c > \sigma_t$ соответственно; III – область пластического разрушения. Точка 1 соответствует напряжениям, равным пределу текучести (σ_t)

Из рассмотрения представленной схемы, с учетом условий работы магистрального газопровода [4] (при рабочих напряжениях в области 0,3–0,6 от предела прочности соответственно, 0,4–0,7 от предела текучести трубной стали и температуре эксплуатации в районе минус 20⁰С), следует, что с точки зрения действующих напряжений разрушение может произойти в области I или IIa, то есть в хрупкой или квазихрупкой области. При этом газопровод работает при температурах, соответствующих области разрушения III (при $T > T_{кр1}$), - значения $T_{кр1}$, определяемые по достаточно жесткому критерию 80% вязкой составляющей на образцах DWTT (T_{80}), в зависимости от марки стали – минус 19 – минус 43⁰С [2].

Таким образом, сочетание указанных факторов свидетельствует о возможности протяженного разрушения газопровода в случае появления достаточно длинных сквозных трещин (размеры которых для конкретного сортамента будут обсуждены далее), чтобы осуществилась возможность распространения трещины при относительно низких напряжениях в стенке трубы, при этом вязкая температурная область и высокая пластичность трубной стали требуют учета наличия пластической зоны в вершине трещины.

В работах [3, 5] обоснован и эффективно использован для построения критических и докритических диаграмм разрушения энергетический критерий в интегральной формулировке на базе вариационного принципа в механике разрушения:

$$\delta \int_0^L (2\lambda - \sigma_y v) dx = 0, \quad (2)$$

где δ – оператор варьирования; $\sigma_y = \sigma_y(x)$ – напряжение от заданной внешней нагрузки в теле без трещины, действующее на площадках, расположенных вдоль линии трещины (ось x совпадает с линией трещины), и раскрывающее трещину; $v = v(x, L)$ – перемещение точек берегов трещины; 2λ – поверхностная плотность энергии разрушения.

Уравнение (2) отражает наличие пластической области перед вершиной трещины предположением, что перемещение в вершине трещины $v(x, L)$ отлично от нуля.

Для расчета критической диаграммы разрушения уравнение (2) может использоваться при

$$\delta = \partial (\delta L) / \partial L. \quad (3)$$

Согласно [5, 10], энергетический критерий равновесия для задач теории трещин в идеальном упруго-пластическом теле может быть использован с привлечением модели трещины с тонкой пластической зоной перед ее вершиной на линии продолжения трещины (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка), причем пластическая зона может, в общем случае, иметь произвольную форму.

За счет схематической замены пластической зоны дополнительным разрезом, по берегам которого приложены усилия, заменяющие собой действие пластически деформированного материала, проблема сводится к решению упругой задачи, вместо упруго – пластической.

При этом размер пластической зоны не ограничен какими-либо пределами и при достаточно малой длине трещины возможно наступление общей текучести в данном сечении тела, при котором линейный размер зоны стремится к бесконечности.

Критерий равновесия, выражающий собой закон сохранения энергии, при действительном или возможном приращении площади трещины может быть записан в виде:

$$\delta W + \delta \Gamma = \delta A, \quad (4)$$

где δA – механическая работа внешних сил; δW – объемная потенциальная энергия упругой деформации тела; $\delta \Gamma$ – энергия разрушения.

Путем варьирования площади трещины при постоянной внешней нагрузке из уравнения (4) следует уравнение (2), из которого, с учетом вариации (3) окончательно получаем выражение для критической диаграммы разрушения [3]:

$$Gc [1 - \sigma_y^2(L) / \sigma_e^2] - K^2/E = 0, \quad (5)$$

где Gc – критическое значение потока энергии в вершину трещины (энергетический критерий Гриффитса), МПа*мм/мм²; σ_e – предел прочности, МПа/мм²; K – коэффициент интенсивности напряжений; E – модуль Юнга, МПа/мм².

Следует отметить, что характеристики линейной механики разрушения (Gc и K) в формуле (5) относятся к упругой задаче, полученной, как указывалось ранее, из упруго-пластической посредством привлечения модельных представлений. Таким образом, упруго-пластический характер исходной задачи уже заложен в формуле (5), что при этом не исключает корректное использование коэффициента $K(G)$ в качестве параметров при решении, приведенной к упругой упруго-пластической задаче.

С учетом известного соотношения $Kc^2 = EGc$, а также формулы для расчета напряжений в стенке трубы по безмоментной теории оболочек, $\sigma_y(x) = \sigma_\theta = pD/2h = \text{const}$, уравнение (5) примет вид:

$$1 - (\sigma_\theta/\sigma_{ep})^2 - (K/K_c)^2 = 0. \quad (6)$$

В безразмерном виде, вводя соотношения:

$$\lambda = \sigma_\theta/\sigma_{ep}; \quad \zeta = L/c; \quad K_0 = K/K_c, \quad c = \pi K_c^2 / 8 \sigma_{ep}^2 \quad (7)$$

получим из уравнения (6):

$$1 - \lambda^2 - K_0^2 = 0. \quad (8)$$

Используя предложенную в [7] формулу для определения коэффициента интенсивности напряжений цилиндрической оболочки с продольной сквозной трещиной длиной $2L$, которая находится под действием равномерного внутреннего давления p , в виде:

$$K = \frac{pD}{2h} \sqrt{\pi LM(\alpha)}, \quad (9)$$

где $M(\alpha)$ представлен как:

$$M(\alpha) = \begin{cases} 1 + 0,2454\alpha^2, & 0 \leq \alpha \leq 1,0, \\ 0,6907 + 0,4762\alpha, & 1,0 \leq \alpha \leq 8,0. \end{cases} \quad (10)$$

причем параметр α характеризует относительную длину трещины, для тонкостенных оболочек меняется в интервале $0 \leq \alpha \leq 8,0$ и записывается в виде:

$$\alpha^2 = \frac{2L^2}{Dh} \sqrt{12(1 - \nu^2)}, \quad (11)$$

получим в безразмерной форме ($\nu=1/3$ – коэффициент Пуассона):

$$1 - \lambda^2 - (\pi\lambda)^2 (\zeta/8) M(\zeta, b) = 0. \quad (12)$$

Соответственно в формуле (12):

$$M(\zeta, b) = \begin{cases} 1 + 0,8015(\zeta/b)^2, & 0 \leq \zeta/b \leq 0,5533, \\ 0,6907 + 0,8606(\zeta/b), & 0,5533 \leq \zeta/b \leq 4,4267, \end{cases} \quad (13)$$

где параметр:

$$b = \sqrt{\frac{Dh}{2c}} \quad (14)$$

характеризует геометрию оболочки.

Таким образом, для построения диаграмм разрушения в безразмерном виде, на базе модели упруго-пластического разрушения цилиндрической оболочки с продольной сквозной трещиной, получено уравнение (12), которое с учетом соотношений (7), (13) и (14) позволяет перейти к непосредственному анализу экспериментальных данных, полученных при проведении аттестации труб для магистральных газопроводов.

Объекты исследования. Экспериментальные данные

Объектами исследования являются прямошовные трубы для магистральных газопроводов отечественных и зарубежных заводов-изготовителей. В табл. 1 представлены необходимые характеристики основного металла труб и результаты испытаний.

Испытания труб большого диаметра для магистральных газопроводов с предварительно нанесенным продольным искусственным дефектом до разрушения проводились в условиях завода-изготовителя труб на горизонтальных гидравлических прессах, предназначенных для заводских испытаний.

Таблица 1

Характеристики основного металла труб и результаты испытаний

Маркировка трубы	Сталь	Механические свойства			Сортамент		Параметры испытаний				K _c , МПа/мм ^{3/2}
		$\sigma_{вр}$, МПа/мм ²	KCV, МПа*м/см ² (T _{кв} , °C)	KCU, МПа*м/см ² (T _{кв} , °C)	D, мм.	h, мм.	2L, мм	t, мм.	P, атм.	σ_0	
V2002I	X70	619	213 (-20)	218 (-60)	1067	26,0	300 (410)	16,0	185	36,11	12153
		623	201 (-20)	231 (-60)	1067	26,0	300 (410)	20,5	130	25,38	
		619	238 (-20)	215 (-60)	1067	26,0	300 (410)	18,5	160	31,23	
V2003 R1	X70	619	254 (-12)	219 (-60)	610	11,8	150 (203)	6,7	175	43,48	9053
		628	302 (-12)	310 (-60)	610	12,4	150 (210)	9,9	115	27,14	
		642	253 (-12)	243 (-60)	610	12,3	150 (205)	7,7	164	39,03	
CH200 3R	К60, 10Г2ФБ Ю	660	106 (-20)	116 (-60)	530	8,3	120 (205)	5,2	115	35,57	7266
		667	113 (-20)	120 (-60)	530	8,4	120 (203)	6,4	68	20,77	
V2003 R2	X80	811	306 (-20)	303 (-60)	1067	20,5	220 (270)	18,0	111	27,81	10529
		788	306 (-20)	303 (-60)	1067	20,5	220 (250)	16,7	130	32,56	
H2004 U	X70	606	146 (-20)	166 (-60)	1420	23,5	385 (480)	20,0	58	16,94	9558
		609	139 (-20)	164 (-60)	1420	24,0	385 (492)	17,6	81	23,15	
		60,7	138 (-20)	162 (-60)	1420	23,9	385 (552)	17,5	79	22,68	
H2004 U2	X80	632	162 (-20)	282 (-60)	1420	25,7	350 (482)	21,3	88	23,43	1226,8
		668	229 (-20)	293 (-60)	1420	25,2	350 (462)	21,9	73	19,84	
		674	184 (-20)	261 (-60)	1420	25,0	350 (462)	19,1	112	30,69	
H2004 U3	К60, 10Г2ФБ	643	172 (-20)	215 (-60)	1420	26,9	350 (467)	21,1	98	24,89	12575
		648	171 (-20)	230 (-60)	1420	26,9	350 (472)	22,5	92	23,36	
V2005 R1	X70	653	169 (-20)	185 (-60)	1420	26,8	350 (410)	21,0	110	28,04	13058
		676	170 (-20)	230 (-60)	1420	26,9	350 (415)	19,0	130	33,01	
		666	204 (-20)	235 (-60)	1420	26,7	350 (408)	20,0	120	30,71	
V2005 R2	X70	635	164 (-20)	202 (-60)	1420	19,1	350 (401)	14,5	65	23,51	12022
		622	174 (-20)	272 (-60)	1420	19,1	350 (400)	13,8	80	28,94	
		637	162 (-20)	178 (-60)	1420	18,9	350 (400)	13,8	70	25,60	
H2005 U	X70	643	143 (-20)	146 (-60)	1420	25,5	400 (580)	20,8	87	23,35	14874
		643	187 (-20)	206 (-60)	1420	25,5	400 (580)	20,7	86	23,09	
M2006 I	X70	659	217 (-20)	-	1219	22,0	305 (380)	17,4	84,8	22,70	12750
		655	215 (-20)	-	219	21,5	305 (360)	16,0	103	28,29	

Способ испытания труб, направленный на определение значений критического коэффициента интенсивности напряжений, K_c , приведенных в табл. 1, составляет предмет заявки на выдачу патента РФ на изобретение № 2005120812/28(023501) «Способ испытания трубы» (Решение о выдаче Патента на изобретение от 31.10.2006 г.) и в настоящей работе не рассматривается.

Приведем необходимые пояснения к табл. 1. В колонке «Сталь» приведены сведения о классе (категории) прочности основного металла труб. В колонке «Механические свойства» указаны: временное сопротивление разрыву ($\sigma_{вр}$) основного металла труб по результатам лабораторных испытаний (ГОСТ 1497 или API 5L, для иностранных производителей) в единицах (МПа/мм²). Также приведены значения ударной вязкости основного металла на образцах Шарпи (KCV) и Менаже (KCU) соответственно, при температурах эксплуатации (в основном минус 20°С) и строительства газопроводов (минус 60°С).

В графе «Сортамент» указаны наружный диаметр (D , мм) и толщина стенки (h , мм) исследуемых труб.

В колонке «Параметры испытаний» приведена базовая длина исходного надреза (искусственного дефекта), имитирующего сквозную продольную трещину ($2L$, мм), при этом в скобках указана общая длина надреза (рис. 2).

Глубина надреза обозначена как (t , мм.). Разрушающее давление в трубе по показаниям заводского манометра в атмосферах (МПа/см²) обозначено как (P , атм.), а разрушающее напряжение как (σ_0 , МПа/мм²).

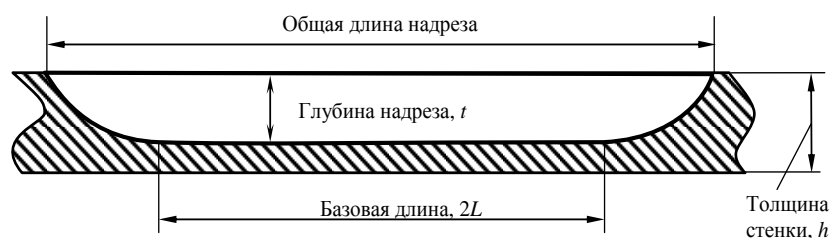


Рис. 2. Схема профиля надреза

В последней графе приведены рассчитанные по результатам испытаний критические значения коэффициента интенсивности напряжений K_c (МПа/мм^{3/2}).

Построение экспериментальных диаграмм разрушения

На рис. 3 представлены образцы экспериментальных диаграмм разрушения, построенных в соответствии с моделью, изложенной ранее, для труб различных диаметров со сравнительной целью. На рис. 3 номерами указаны диаграммы разрушения для труб следующих заводов-изготовителей.

Из рис. 3 следует, что трещиностойкость труб с увеличением диаметра возрастает, в том смысле, что при определенной длине трещины разрушающие напряжения выше для труб большего диаметра, что вполне соответствует теоретическим представлениям, согласно которым цилиндрический сосуд давления можно уподобить плоской пластине (из того же материала, той же толщины и с такой же сквозной трещиной), нагруженной растягивающим напряжением σ , номинально равным окружному напряжению σ_0 , умноженному на коэффициент концентрации напряжений $M(\alpha)$, в нашем случае заключенному в интервале 1,7–2,4. Соответственно с увеличением диаметра труб («разворачиванием» трубы в плоскость), $M(\alpha) \rightarrow 1$ и несущая способность оболочки увеличивается [7].

На рис. 4 показаны различия в решении задачи в упругой постановке (кривая 1), (по формулам (9) – (11)) и полученном в рамках используемой нами модели (12). Как и следовало ожидать, в данном случае (V2005R1, $D=1420$ мм., $h=26,9$ мм., $2L=408,5$ мм.), в области относительно коротких трещин ($L \leq 230$ мм.) наблюдаются существенные расхождения в диаграммах разрушения, обусловленные пластическим характером решения (кривая 2). При этом напряжения в случае учета пластичности металла труб в области малых трещин значительно ниже, сингулярность решения (2) выражена в меньшей степени. С практической точки зрения это означает, что общую длину исходного надреза на трубах диаметром 1420 мм следует выбирать не менее 450 мм с целью корректного определения коэффициента K_c по формулам (9)–(11). В то же время, надрез такой протяженности, соответствующий по форме (рис. 2), на реальной трубе диаметром 1420 мм изготовить довольно сложно. Поэтому, как правило, базовая длина исходного надреза определяется как $D/4$, что с учетом выхода фрезы, приводит к расчетной длине надреза 370–470 мм, что, как показано на рис. 4 т. 1, обеспечивает точность определения разрушающих напряжений в рамках модели (12), кривая 2 относительно фактического значения в районе 3–5%.

Фактически, по мнению авторов, диаграмма разрушения для труб конкретного сортамента сама по себе является объектом стандартизации требований к металлу труб по трещиностойкости. Обладая фактической диаграммой разрушения, путем сравнения ее с эталонной диаграммой, можно сделать вывод о соответствии трубы требованиям по вязкости разрушения. С точки зрения сдаточных характеристик металла труб (ударной вязкости) представляется целесообразным «привязать» конкретные значения KCV (КСУ) к

определенной точке диаграммы, например, к значению коэффициента K_c , определенного по диаграмме разрушения при рабочих напряжениях в стенке металла труб. Далее обсуждается способ построения эталонных диаграмм разрушения и представлены предложения по стандартизации значений ударной вязкости металла труб на основе диаграмм разрушения.

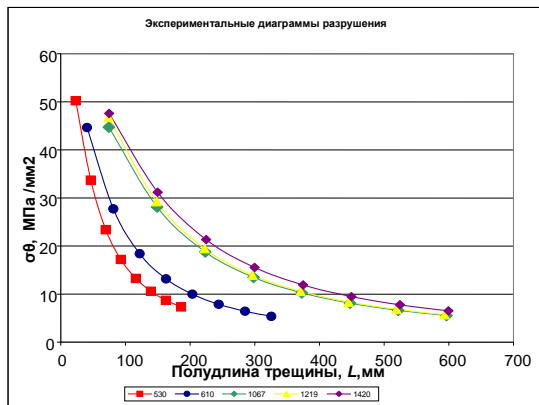


Рис. 3. Диаграммы разрушения:
 530 - труба CH2003R ($D=530\text{мм}$); 610 - труба V2003R ($D=610\text{мм}$); 1067 - труба V2002I ($D=1067\text{мм}$); 1219 - труба M2006I ($D=1219\text{мм}$); 1420 - труба H2005U ($D=1420\text{мм}$)

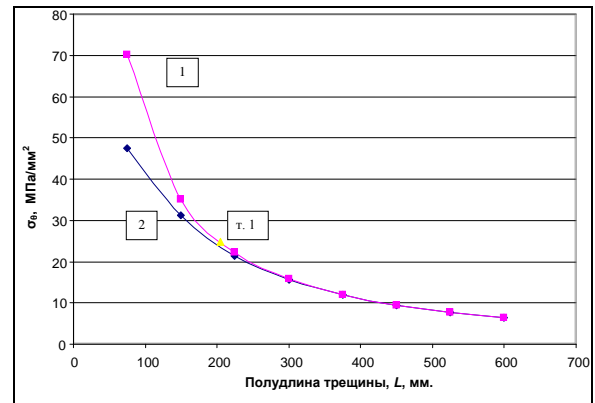


Рис. 4. Сравнительные диаграммы упругого и упруго-пластического решения:
 1 - решение задачи в упругой постановке (по формулам (9)–(11)); 2 - решение задачи в рамках модели (12)

Построение эталонных диаграмм разрушения

По мнению авторов, принципиальной разницы между способами построения фактической и эталонной диаграммы разрушения быть не должно.

Очевидно, требования к трубам большого диаметра, заложенные в нормативной документации (например, в [4]) определяют некую «идеальную» трубу с конкретными значениями диаметра, толщины стенки, прочностных и вязких базовых показателей.

Единственное ее отличие от реальной заключается в том факте, что стендовые испытания этих труб не могут быть проведены в силу «абстрактности» объекта и невозможности получить на практике трубу именно с такими характеристиками.

Но если испытания провести нельзя, то можно попытаться их смоделировать, причем на базе фактического экспериментального материала, а затем, считая трубу испытанной, использовать «модельную» диаграмму в качестве эталонной.

Напомним, что в рамках модели (7)–(12) в качестве исходных данных, необходимых для построения диаграммы разрушения, заложены $\sigma_{вр}$, D , h , K_c – соответственно предел прочности трубной стали на образцах, диаметр трубы, толщина стенки и критический коэффициент интенсивности напряжений.

Первые три характеристики определяются исходя из соответствующих технико-экономических условий и прочностных расчетов.

Попробуем определить коэффициент K_c путем проведения модельного эксперимента. Для этого вернемся к формулам (9)–(11). Очевидно, единственным неизвестным параметром, необходимым для определения коэффициента K_c , является разрушающее давление в трубе с надрезом, определяемое в процессе эксперимента.

В мировой практике [8] уже с 70-х годов прошлого века в употребление вошла очень полезная формула по определению разрушающего давления в трубе с продольным дефектом определенной длины и глубины. То, что эта формула актуальна и по сей день подтверждают не только результаты наших исследований, но и весьма авторитетные современные источники [9].

Она может быть записана в виде:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{вр} \frac{1 - \frac{t}{h}}{1 - \frac{t}{Mh}}, \quad (15)$$

где сохранены все обозначения, введенные ранее, при этом под M понимают коэффициент концентрации напряжений (M (α), Фолиас - фактор), который различными авторами записывается по-разному.

На рис. 5 точками представлен массив экспериментальных данных, полученных при испытаниях 27 труб большого диаметра. По оси X отложены расчетные значения разрушающего давления, полученные с использованием формулы (15), где Фолиас – фактор использовался в виде:

$$M = \sqrt{1 + 2,64 \frac{L^2}{Dh}}, \quad (16)$$

который отвечает минимальному разбросу значений.

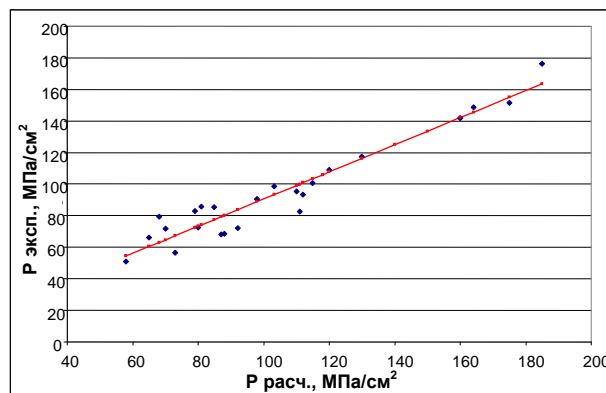


Рис. 5. Корреляционная зависимость разрушающего давления

При этом прямая линия на рис. 5 представляет результат статистической обработки экспериментальных данных методом наименьших квадратов по 27 точкам. Сомнений в линейном характере зависимости у авторов не возникало.

Таким образом, получена корреляционная зависимость, отражающая взаимосвязь величины разрушающего давления, рассчитанного с помощью формулы (15), с результатами, полученными при натурных испытаниях.

Проведем построение эталонной диаграммы разрушения труб для магистральных газопроводов размером 1420x25,8 мм из стали класса прочности $K60$ на рабочее давление до 100 атм включительно.

Исходные данные и расчет разрушающего давления ($P_{расч}$) приведены в табл. 2, расчетные параметры для построения диаграмм представлены в табл. 3.

Эталонная диаграмма разрушения трубы $\varnothing 1420 \times 25,8$ мм на рабочее давление 100 атм. приведена на рис. 6.

На рис. 7 для сравнения представлена эталонная диаграмма (рис. 6) и диаграмма разрушения реальной (двухшовной) трубы Н2005U, из которого следует, что трещиностойкость заводской трубы (кривая 2) несколько выше уровня, предусмотренного требованиями нормативно-технической документации (кривая 1).

Таблица 2

Исходные данные и расчет разрушающего давления ($P_{расч.}$)

Параметры модельного эксперимента									
Параметры трубы:			Испытания:		Расчет:			Давления, МПа/см ²	
$\sigma_{вр.}$, МПа/мм ²	D , мм.	h , мм.	Прив L , мм.	Надрез(t), мм.	M -фактор	t/h	σ_0 , МПа/мм ²	$P_{расч.}$, МПа/см ²	$P_{раб.}$, МПа/см ²
600	1420	25,8	350	19,35	1,7907668	0,75	258,0934	973,2255	1000

Таблица 3

Расчетные параметры для построения диаграмм

c , мм	Kc , МПа/мм ^{3/2}	b
164,52242	1229,429	0,8226478

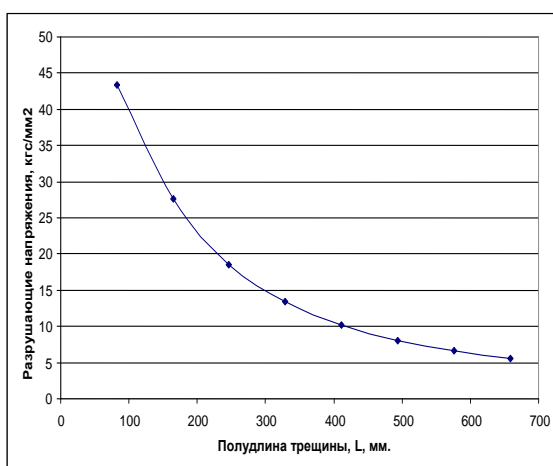


Рис. 6. Эталонная диаграмма трубы для магистрального газопровода с рабочим давлением 100 атм

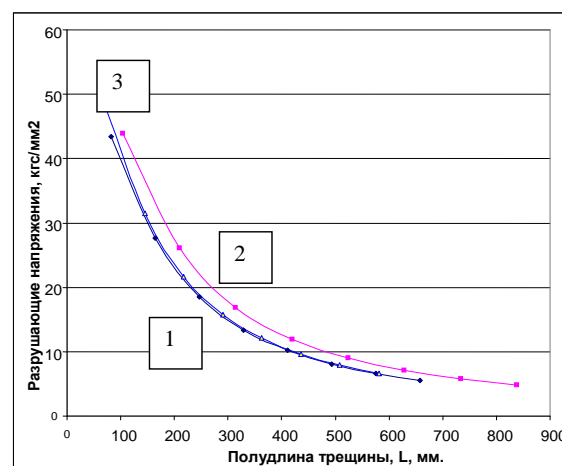


Рис. 7. Трещиностойкость 100 атмосферных труб относительно эталонной диаграммы разрушения
1 - эталонная диаграмма; 2 - труба Н2005U; 3 - труба I2005R

Также на рис. 7 представлена диаграмма разрушения одношовной трубы I2005R на рабочее давление 100 атм. (кривая 3). Как следует из рис. 7, трещиностойкость трубы I2005R уступает трубе Н2005R (двухшовной), но находится на границе допустимых требований. По всей видимости, это обусловлено различием качества листового проката.

Выводы

1. На основе энергетического критерия механики разрушения с привлечением модельных представлений о трещине с тонкой пластической зоной перед вершиной (модель Дагдейла – Леонова – Панасюка) проведен анализ трещиностойкости металла труб магистральных газопроводов.
2. Для труб большого диаметра (530–1420 мм) построены критические диаграммы разрушения на основе результатов натурных испытаний труб с искусственным дефектом до разрушения, проведенных авторами в 2002–2008 гг.
3. Предложен способ построения эталонных диаграмм разрушения труб магистральных газопроводов на основе обработки результатов натурных испытаний и требований нормативно-технической документации на трубы большого диаметра.

Библиографический список

1. **Пестриков, В.М.** Механика разрушения твердых тел: курс лекций / В.М. Пестриков, Е.М. Морозов. – СПб.: Профессия, 2002.
2. **Красовский, А.Я.** Трещиностойкость сталей магистральных трубопроводов / А.Я. Красовский, В.Н. Краси́ко. – АН УССР. Ин-т проблем прочности. – Киев: Наукова думка, 1990.
3. **Сапунов, В.Т.** Прочность поврежденных трубопроводов. Течь и разрушение трубопроводов с трещинами: учеб. пособие / В.Т. Сапунов. – М.: КомКнига, 2005.
4. Инструкция по применению стальных труб в газовой и нефтяной промышленности (Р 51-31323949-58-2000), утвержденная ОАО «ГАЗПРОМ». – М., 2000.
5. **Партон, В.З.** Механика упруго-пластического разрушения / В.З. Партон, Е.М. Морозов. – М.: Наука, 1974.
6. **Панасюк, В.В.** Распределение напряжений около трещин в пластинках и оболочках / В.В. Панасюк, М.П. Саврук, А.П. Дацышин. – Киев: Наукова думка, 1976.
7. **Хан, Г.** Критерии распространения трещин в цилиндрических сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей / под ред. акад. Ю.Н. Работнова / Г. Хан, М. Саррат, А. Розенфилд. – М.: Мир, 1972.
8. **Даффи, А.** О поведении дефектов в сосудах давления // Новые методы оценки сопротивления металлов хрупкому разрушению: сб. статей / под ред. акад. Ю.Н. Работнова / А. Даффи, Р. Эйбер, У. Макси. – М.: Мир, 1972.
9. **Demofonti, G.** Fracture behavior of X100 gas pipeline by full – scale tests / G. Demofonti, G. Mannucci and others // Proceedings of the international Pipe Dreamer's Conference held on 7–8 November, 2002 in Yokohama, Japan.
10. **Матвиенко, Ю.Г.** Модели и критерии механики разрушения / Ю.Г. Матвиенко. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

V.P. Konishchev, A.A. Rodionov, A.S. Mitin

GAS PIPELINE PIPES CRACK RESISTANCE ASSESSMENT

Analysis of pipe metal fracture strength at gas pipelines was performed on the basis of fracture mechanics energy criteria with taking into consideration certain crack model images that have thin lamellar zone in front of the top (Dagdale – Leonov – Panasjuk model). A way of pipe destruction reference plotting at gas pipelines was offered on the basis of the environmental test results and the requirements of norms and specifications for a large diameter pipe.

Key words: pipeline, electric-longitudinal welded pipes, submerged arc welding, crack resistance, impact hardness, hydrostatic pressure.

УДК 621.77

С.В. Кузнецов

ВЛИЯНИЕ ЗАЗОРОВ И ПОЛОЖЕНИЯ ПРИВОДА КРИВОШИПНО-ШАТУННОГО МЕХАНИЗМА МЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕССА НА ВЕЛИЧИНУ НАГРУЗОК В ЭЛЕМЕНТАХ ПРИВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлено моделирование нагружения привода механического пресса с использованием метода конечных элементов. Целью исследований являлась оценка изменения величины напряжений в элементах привода пресса в зависимости от зазоров в сопряжениях после выполнения технологической операции.

Ключевые слова: механический пресс, конечно-элементное моделирование, нагрузки в системе.

В работе в качестве исследуемого объекта рассматривался кривошипно-ползунный механизм однокривошипного открытого ненаклоняемого пресса силой 250 кН (модель К2124).

Целью представляемых исследований являлась оценка величины напряжений в сопряжениях элементов пресса после выполнения технологической операции, так как при разгрузке системы зазоры начинают выбираться в неопределенной последовательности, в результате чего в сопряжениях возникают ударные нагрузки, вызывающие дополнительную вибрацию и шум.

Процесс изменения зазоров в сочленениях привода носит достаточно случайный характер. Исследований по влиянию зазоров на параметры вибраций в кузнечно-прессовых машинах известно немного, поэтому было избрано целью моделирования исследование влияния величины зазоров и положения механизма на величину ударной нагрузки – первопричины колебаний в системе. За основу исследований было взято определение величины напряжений, возникающих в элементах кривошипно-ползунного механизма после выполнения технологической операции.

Для проведения исследований были использованы два программных продукта: Solid Works 2005 и Ansys 8.0 / Workbench.

Причиной выбора программы Solid Works 2005 явилось то, что на данный момент она является одной из самых мощных параметрических систем автоматизированного проектирования. В ней осуществлена возможность создания моделей различных пространственных деталей, которые далее объединяются в сложные сборочные элементы. Программа полностью параметризирована и автоматизирована, имеется возможность создавать твердотельные модели, на основе которых автоматически генерируются чертежи и спецификации; возможно создавать сложные поверхности, изменяющие свою конфигурацию согласно заданной функциональной зависимости.

В проведенной работе в данной программе было произведено создание модели рассматриваемого пресса.

ANSYS – пакет для конечно-элементного моделирования и анализа. Он используется для анализа целого спектра задач, таких как: статическая и динамическая прочность механических конструкций, теплообмен, гидро- и аэродинамика, гидравлика, электромагнитное поле, акустика и т.д. Пакет предлагает широкий спектр расчетных возможностей, которые позволяют учитывать физические свойства и различного рода нелинейности (пластичность, упругость в виде кусочно-линейной зависимости «деформация-напряжение», вязкопластичность, ползучесть, набухание, вязкоупругость), геометрические нелинейности (большие деформации, большие перемещения) и нелинейности самого элемента (общие поверхностные контактные элементы, элементы взаимодействия, элементы с армированием). ANSYS обладает широкими графическими возможностями для представления результатов исследования.

В проведенной работе в данной программе был произведен расчет и анализ созданной модели рассматриваемого пресса.

Моделирование процесса нагружения системы включало в себя несколько этапов:

1. В программе Solid Works 2005 с учетом всех зазоров была создана твердотельная модель кривошипно-ползунного механизма. При создании модели были введены следующие допущения: а) геометрические элементы системы допустимо упрощались; б) кривошипно-ползунный механизм рассматривался в двухмерном пространстве; в) зазоры в подшипниках считались одинаковыми; г) максимальная и минимальная величины зазоров (рис. 1, а) выбиралась без учета износа сопряжений, т.е. по рекомендуемым производителями пресса посадкам; д) стыки считались абсолютно жесткими; е) стыки считались абсолютно гладкими, трение и влияние смазки в сопряжениях элементов не учитывались.

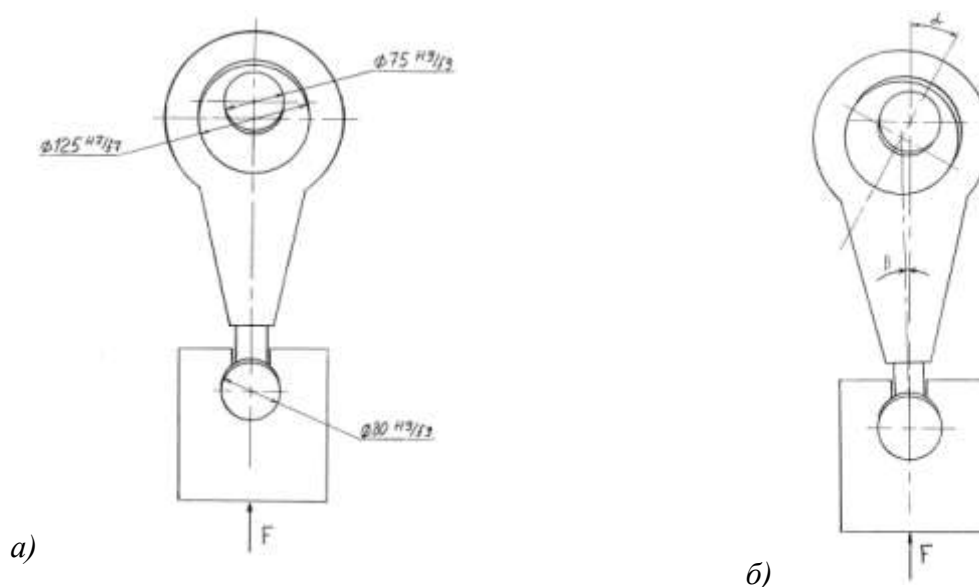


Рис. 1. Положение механизма при угле отклонения оси шатуна:
а – равном 0° ; б – на угол β

2. С помощью специальной подпрограммы, находящейся в пакете Solid Works 2005, созданная модель была интегрирована в программу конечно-элементного анализа ANSYS/Workbench 8.0.

При анализе рассматривались три положения кривошипно-ползунного механизма при угле поворота кривошипа α , равном соответственно 0° (рис. 1, а)), 15° и 30° (рис. 1, б)). При моделировании нагружение системы принималось равным номинальной силе пресса (250 кН).

При моделировании нагружения кривошипно-ползунного механизма рассматриваемые зазоры варьировались следующим образом (см. табл. 1).

Таблица 1

Изменение зазоров по видам сочленений

Вариант	Сочленение	Постоянный или изменяющийся зазор / величина зазора, мм
I	«Шатун – вал»	постоянный / 0,12
	«Подшипник – вал»	постоянный / 0,18
	«Шатун – ползун»	максимальный / 0,18 минимальный / 0,05
II	«Шатун – вал»	максимальный / 0,12 минимальный / 0,04
	«Подшипник – вал»	постоянный / 0,18
	«Шатун – ползун»	постоянный / 0,18
III	«Шатун – вал»	постоянный / 0,12
	«Подшипник – вал»	максимальный / 0,18 минимальный / 0,05
	«Шатун – ползун»	постоянный / 0,18

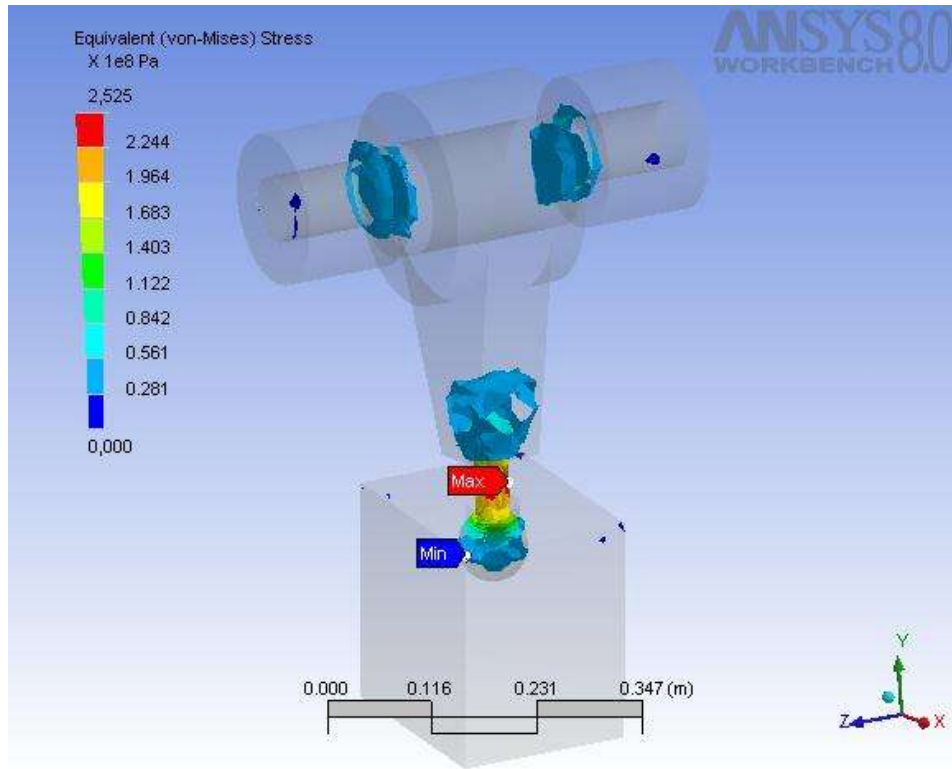


Рис. 2. Результаты моделирования нагружения кривошипно-шатунного механизма при угле поворота кривошипа, равном 30° , для максимального значения зазора

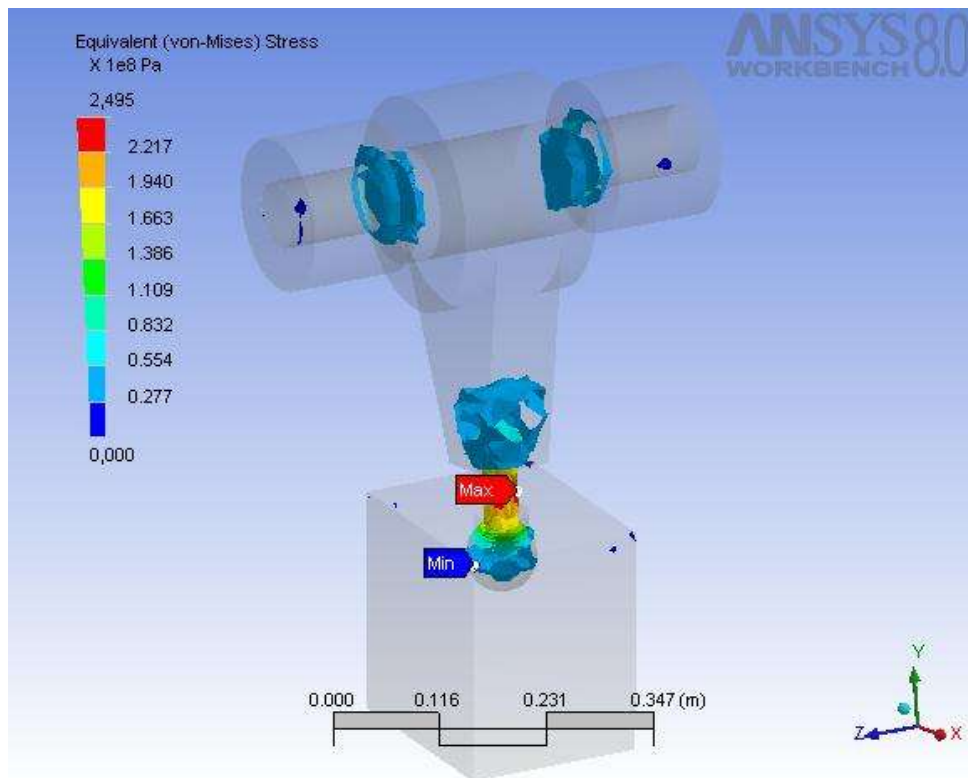


Рис. 3. Результаты моделирования нагружения кривошипно-шатунного механизма при угле поворота кривошипа, равном 30° , для минимального значения зазора

Таким образом, моделирование проводилось для шести вариантов соотношения зазоров.

В качестве примера, на рис. 2 и рис. 3 представлены результаты моделирования нагружения кривошипно-шатунного механизма при угле поворота кривошипа, равном 30° , для минимального и максимального значений зазоров.

Из результатов моделирования следует, что при нагружении кривошипно-ползунного механизма максимальные напряжения возникали в самом слабом элементе системы – в резьбе винта регулировки длины шатуна. Полученные результаты для всех вариантов моделирования были представлены в виде графической зависимости (см. рис. 4), на которой отражались значения максимального напряжения, возникающего в системе, в зависимости от положения механизма и варианта зазоров.

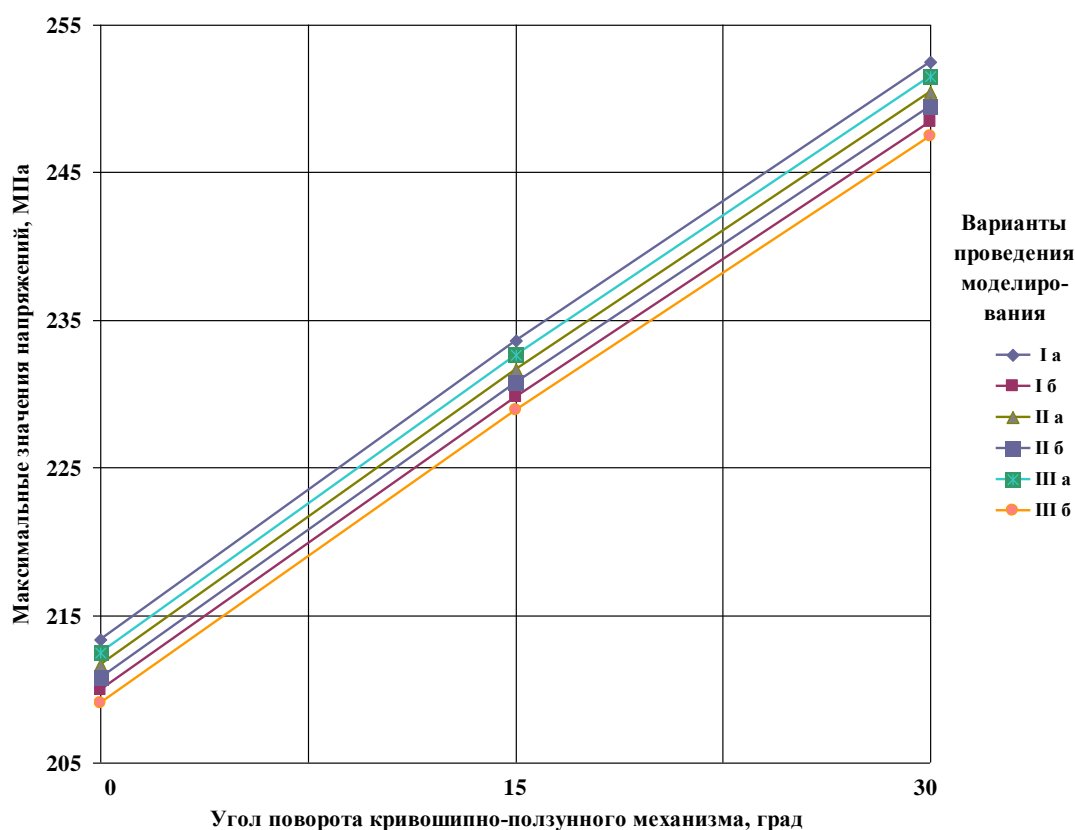


Рис. 4. Зависимость максимального напряжения системы от угла поворота шатуна

По результатам проведенного исследования были сделаны следующие выводы.

1. При увеличении угла поворота оси шатуна от 0 до 30° максимальные напряжения в элементах системы возрастают на 18%.

2. При увеличении зазора в определенном сопряжении максимальное напряжение возрастает от 0,4 до 4,2%.

3. Из изложенного следует, что изменение угла поворота оси шатуна (т.е. положение ползуна прессы по ходу его движения – угол β на рис. 1) оказывает значительно большее влияние на изменение напряжений системы, нежели изменение зазоров в сопряжениях механизма.

4. Можно предположить, что влияние зазоров может быть «недоучтено» вследствие того, что их увеличение может приводить к большему перекосу системы «ползун – направляющие», потери плоскостности контакта в сочленениях, и как следствие – ударным нагрузкам, шуму и т.д.

5. Можно предположить, что при увеличении зазоров их влияние на нагружение системы будет значительно возрастать по сравнению с регламентированными (паспортными) значениями, представленными в проведенной работе. Данные утверждения требуют дополнительной экспериментальной проверки.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

S.V. Kuznesov

**INFLUENCE OF BACKLASHES AND POSITION OF DRIVE CRANK-ROD
OF THE MECHANISM OF THE MECHANICAL PRESS ON SIZE OF LOADINGS
IN DRIVE ELEMENTS**

In the article modeling loadings a drive of a mechanical press with use of a method of final elements is presented. The purpose of researches was the estimation of change of size of pressure in elements of a drive of a press depending on backlashes in interfaces after performance of technological operation.

Key words: mechanical press, final-element modeling, loadings in system.

УДК 621.77

С.В. Кузнецов

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ СИЛ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ ДАВЛЕНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен способ теоретического определения поперечных сил, возникающих при выполнении технологических операций объемной и листовой штамповки для обработки металлов давлением. Предлагается конструкция измерительного устройства для определения поперечных сил.

Ключевые слова: обработка металлов давлением, поперечные силы, определение сил в технологических операциях обработки давлением.

При выполнении операций обработки металлов давлением на любом из существующих видов оборудования кроме сил, действующих вдоль оси деформирования, отмечено возникновение поперечных (действующих в плоскости разъема штампа и перпендикулярных оси деформирования) сил. Их появление в основном отрицательно сказывается на прессовом оборудовании и штамповой оснастке: отмечается повышенный износ элементов привода и направляющих ползуна, увеличение вероятности поломки элементов пресса и штампа, смещение верхней и нижней частей поковки, ударные нагрузки, шум, вибрации, ухудшение качества и точности изготовления получаемых изделий.

В данной работе поперечные силы в рабочей зоне машины являются основным объектом исследований.

Целью работы является нахождение теоретических и экспериментальных способов определения поперечных сил.

В результате анализа литературных источников было установлено: 1) единая методика определения поперечных сил отсутствует; 2) при выполнении операций обработки металлов давлением возникает поперечная сила, величина и направление действия которой полностью не исследованы; 3) возникновение поперечной силы связано с особенностями выполнения конкретной технологической операции.

Было проведено теоретическое определение поперечных сил для операций объемной и листовой штамповки.

С целью определения сил произвольно выделялся элементарный участок dF_K на поверхности AB контакта (рис. 1) [1]. Считалось, что на такой поверхности присутствуют распределенные нормальные σ_H и касательные τ_K напряжения.

Для произвольно выделенного участка:

$$dF_B = \sigma_H dF_K \cos \alpha + \tau_K dF_K \sin \alpha = \sigma_H dF_B + \tau_K dF_\Gamma,$$

$$dF_\Gamma = \sigma_H dF_K \sin \alpha + \tau_K dF_K \cos \alpha = \sigma_H dF_\Gamma + \tau_K dF_B,$$

где dF_Γ и dF_B – площади проекций элементарного участка заготовки на плоскости, перпендикулярную и совпадающую с направлением движения инструмента; α – угол между направлением нормального напряжения σ_H и направлением движения инструмента.

Решение задачи, связанной с определением поперечных сил, требует выявления нормального напряжения σ_x , действующего со стороны инструмента. Появление контакта инструмента с заготовкой приводит к смене схемы деформируемого состояния (см. рис. 2), а именно, объемное деформированное состояние на поверхности переходит в плоское (т.е. в

рассматриваемой точке $\sigma_x = 0$ и $\epsilon_x \neq 0$ – до момента касания, $\sigma_x \neq 0$, $\epsilon_x = 0$ – после момента касания).

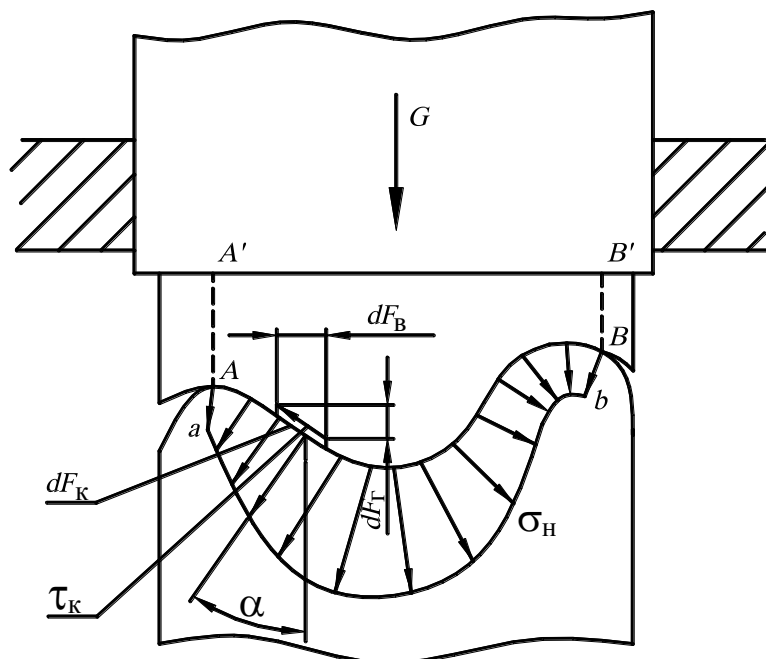


Рис. 1. Схема определения нормальных и касательных напряжений для нахождения сил для контактной поверхности

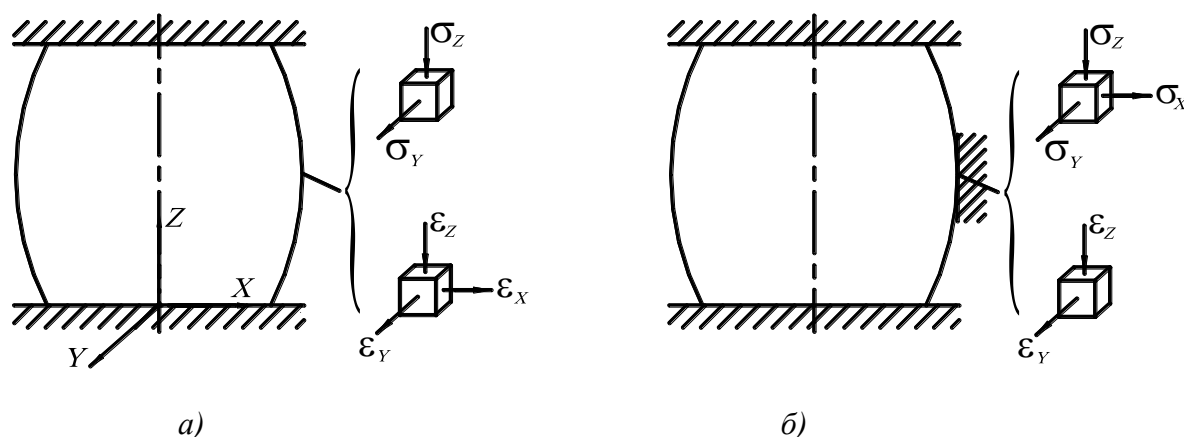


Рис. 2. Схемы напряженно-деформированного состояния образца: а – при его осадке; б – при боковом касании заготовкой инструмента

Для такого состояния справедливы выражения [1]:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_x + \sigma_z}{2}; \tau_{xy} = \tau_{zy} = 0.$$

Определение численных значений напряжений проводилось с учетом методики, предложенной М.В. Сторожевым и Е.А. Поповым [1]. Предполагалось, что процессы, протекающие на торцах заготовки и в зоне бокового контакта с инструментом, имеют схожий характер.

Вследствие этого, определение τ_{xz} проводилось по указанной методике, применяемой в расчетах на торцах заготовки. На основании этого полагалось: 1) что при касательном напряжении τ_k на контактной поверхности $\tau_k \leq 0,7k$ (где $k = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \sigma_s = 0,577 \sigma_s$ – постоянная

пластичности) напряжения определяются соотношением $\sigma_x - \sigma_z = \pm \sigma_s$, и точное значение σ_x определено быть не может; 2) при $0,7k \leq \tau_k \leq k$: $\sigma_x = \sigma_z = -\frac{\sigma_s}{3}$.

Было предложено производить определение напряжения σ_x без нахождения касательных напряжений на поверхности заготовки на основании уравнения связи между напряженным и деформированным состояниями заготовки при пластическом деформировании [1]:

$$v_\sigma = \frac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{2\varepsilon_2 - \varepsilon_1 - \varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} = v_\varepsilon,$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ – соответственно главные напряжения и главные деформации.

При этом вводились следующие допущения: а) относительные сдвиги γ отсутствуют, и направления удлинений совпадают с главными осями деформаций; б) направления напряжений совпадают с главными осями нормальных напряжений.

Для рассматриваемой задачи значение коэффициента v_σ находится в диапазоне $-1 \leq v_\sigma \leq 0$. В результате было получено, что значения искомого напряжения находятся в диапазоне $-\frac{\sigma_s}{3} \leq \sigma_x \leq 0$. Для рассмотренной схемы в предельном случае $\sigma_x = \sigma_z = -\frac{\sigma_s}{3}$. Таким образом, максимально возможное значение напряжения в зоне контакта заготовки с препятствием $\sigma_x \leq \left| \frac{\sigma_s}{3} \right|$.

В данной работе было предложено определять напряжения σ_x приближенно по значению коэффициента v_σ , который, в свою очередь, определяется на основе экспериментальных значений для рассматриваемого участка, и дает более точные значения напряжения:

$$\sigma_x = \sigma_s \frac{2v_\sigma}{3\sqrt{3+v_\sigma^2}}.$$

В результате, был предложен алгоритм расчета поперечных сил для заготовки произвольной пространственной формы: 1) криволинейная контактирующая поверхность штампа и заготовки в рассматриваемый момент времени разделяется на совокупность элементарных поверхностей (плоскость, цилиндр, сфера и т.д.), причем шаг разбиения зависит только от сложности рассматриваемой формы; 2) для каждой выделенной элементарной поверхности производится определение ее положения относительно базовой плоскости; 3) для каждой выделенной элементарной поверхности вычисляется определение площади контакта; 4) для каждой выделенной элементарной поверхности осуществляется расчет нормальных напряжений; 5) для каждой выделенной элементарной поверхности производится определение касательных напряжений; 6) определяется значение элементарной поперечной силы для каждой выделенной поверхности; 7) определяется результирующее значение поперечной силы путем векторного сложения соответствующих элементарных сил, действующих во всех выделенных участках заготовки.

Для операций листовой штамповки определение поперечных сил, возникающих при выполнении технологической операции, также проводилось с использованием метода, представленного в работе [1].

На основании рис. 3 были определены основные уравнения равновесия выделенного элемента:

а) при проецировании на нормаль к поверхности (см. рис. 3):

$$\sigma_H f_3 - 2\sigma_p f_1 (d\alpha/2) - 2\sigma_0 f_2 (d\beta/2) = 0, \quad (1)$$

б) при проецировании на касательную к поверхности заготовки в меридиональном сечении (см. рис. 3):

$$\sigma_p f_1 + d(\sigma_p f_1) - \sigma_p f_1 - 2\sigma_0 f_2 (d\theta/2) - \mu \sigma_H f_3 = 0. \quad (2)$$

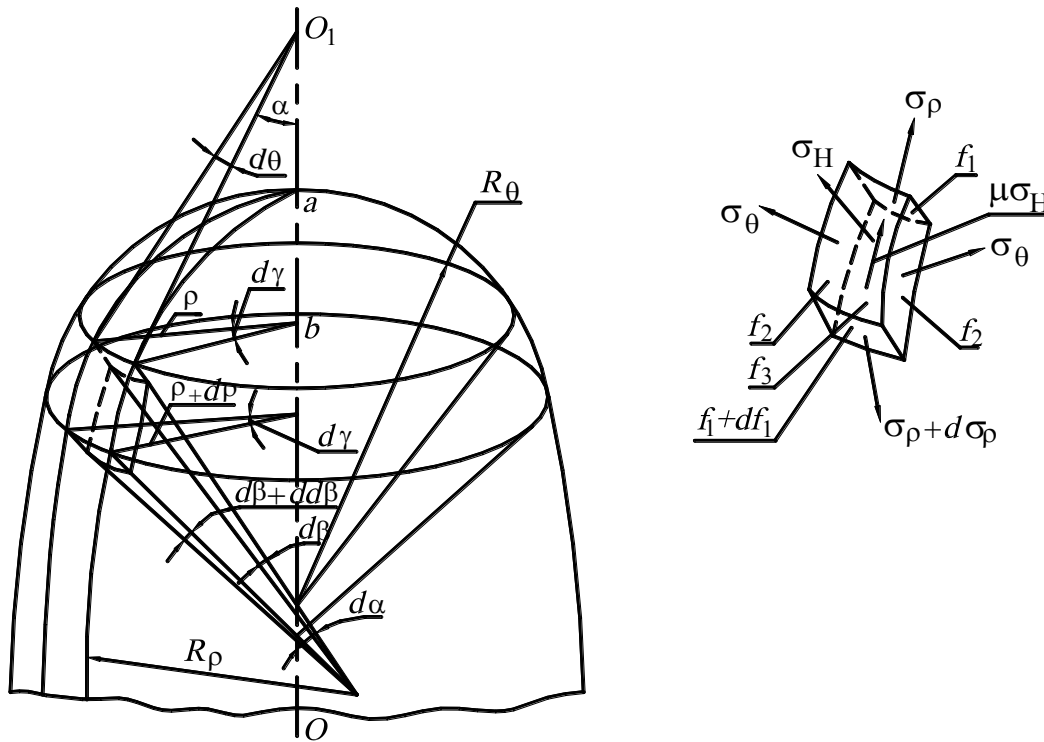


Рис. 3. Схема для определения элементарной силы трения на поверхности исходной заготовки

С учетом уравнений (1)–(2), получено:

$$dF_{Ti} = s \, d\gamma \, d\rho \left[(\sigma_\rho - \sigma_\theta) + d\sigma_\rho \cdot \frac{\rho}{d\rho} \right] \quad (3)$$

где dF_{Ti} – поверхностная сила трения; действующая в выделенном i -м элементарном участке; β – переменный коэффициент, являющийся функцией главных нормальных напряжений; s – толщина заготовки; $d\gamma$ – угол; ρ – параметр, определяющий положение выделенного элемента заготовки относительно оси симметрии.

Величина поперечной силы, действующей в выделенном сегменте, в конечном итоге, определялась:

$$F_{Ti} = \int_{r_1}^{r_2} \int_{\gamma_1}^{\gamma_2} (\pm\beta \sigma_s \, d\rho + d\sigma_\rho \, \rho) \cdot s \cdot d\gamma, \quad (4)$$

$$F_{Ti} = (\sigma_\rho \pm \beta \sigma_s \ln \rho) \cdot s \cdot \rho \cdot \gamma + C, \quad (5)$$

где r_1 и r_2 – соответственно внутренний и наружный радиусы рассматриваемого сегмента относительно оси симметрии заготовки; γ_1 и γ_2 – начальное и конечное значения угла, в пределах которого рассматривается выделенный сегмент; C – постоянная интегрирования.

Общее уравнение для определения поперечных сил в приближенном виде, полученное с использованием неравенства $\sigma_\rho = \sigma_s - |\sigma_\theta| < \sigma_s$, представленного в работе [1], рассматривалось как случай с предельными по величине поперечными силами. Оно имеет вид:

$$F_{Ti} = (\sigma_s \pm \beta \sigma_s \ln \rho) \cdot s \cdot \rho \cdot \gamma + C. \quad (6)$$

На основе уравнения (5) могут быть получены уравнения определения исследуемых сил для любых операций листовой штамповки.

В результате, был предложен алгоритм расчета поперечных сил для операций листовой штамповки: 1) определяется ось симметрии заготовки; 2) поверхность заготовки разбивается на участки (сегменты), ограниченные радиусами r_1 и r_2 и углом в диапазоне от γ_1 до γ_2 ; 3)

для каждого из выделенных сегментов экспериментально определяются значения величин s , ρ , γ ; на основе справочных данных σ_s ; 4) находятся величины деформаций ε_ρ , ε_θ , ε_z для каждого рассматриваемого участка заготовки экспериментально (например, при помощи метода координатных сеток), либо расчетными способами (например, на основе МКЭ); 5) на основе полученных значений деформаций определяется значение σ_θ по уравнению $\sigma_\theta = \sigma_s \frac{-(\varepsilon_\rho + 2\varepsilon_z)}{\varepsilon_z + 2\varepsilon_\rho}$; 6) находится σ_ρ путем подстановки полученного значения напряжения σ_θ в уравнение пластичности $\sigma_\rho - \sigma_\theta = \pm\beta \sigma_s$; 7) на основе уравнения (5) в зависимости от рассматриваемой технологической операции, условий ее проведения и граничных условий, определяется постоянная интегрирования C ; 8) на основе полученного уравнения устанавливается величина поперечной силы в пределах выделенного сектора; 9) аналогично определяются поперечные силы во всех выделенных секторах заготовки; 10) находится результирующее значение поперечной силы путем векторного сложения сил, действующих в каждом выделенном сегменте, по всей поверхности заготовки.

Экспериментальные исследования поперечных сил проводились для ряда операций объемной и листовой штамповки. С этой целью было спроектировано, изготовлено и опробовано измерительное устройство (см. рис. 4).

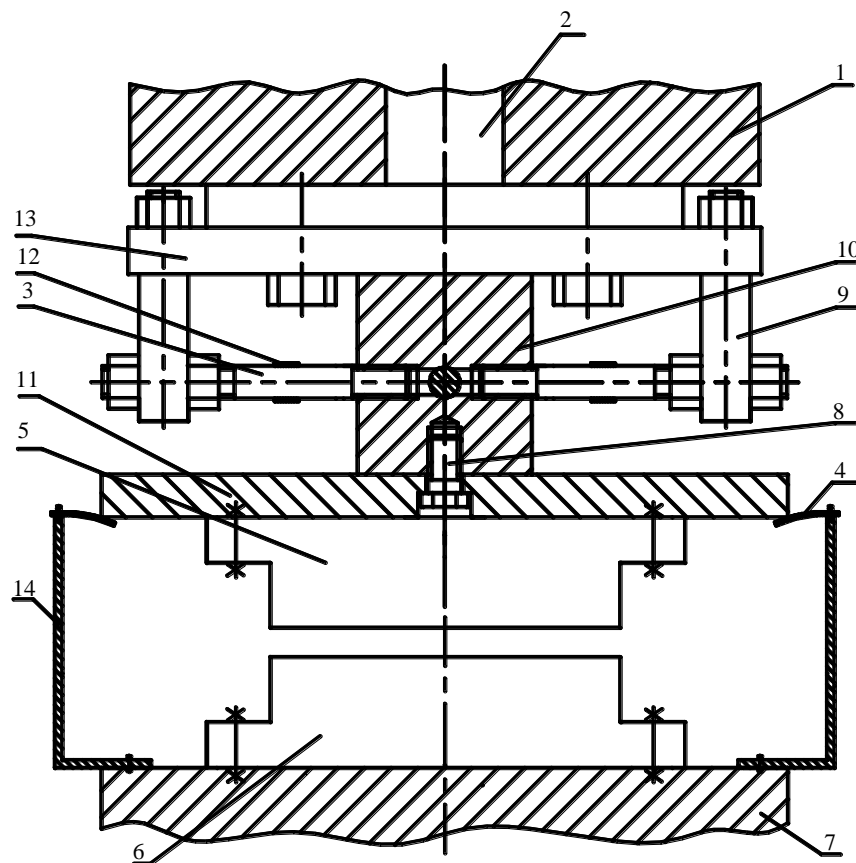


Рис. 4. Схема измерительного устройства:

1 – ползун пресса; 2 – узел крепления; 3 – стержни силоизмерительные; 4 – датчики малых перемещений; 5 – верхняя половина штампа; 6 – нижняя половина штампа; 7 – стол пресса; 8 – узел крепления; 9 – держатель вспомогательный; 10 – держатель основной; 11 – плита промежуточная; 12 – тензодатчики; 13 – плита опорная; 14 – устройства фиксации датчиков малых перемещений

Принцип действия измерительного устройства основан на разрыве жесткой связи между верхней плитой штампа и ползуном пресса. Для передачи нагрузок, действующих в плос-

кости разъема штампа, вводятся четыре силоизмерительных стержня 3 и четыре вспомогательных держателя 9. Силоизмерительные стержни расположены в плоскости разъема штампа под углом 90° друг относительно друга. На силоизмерительных стержнях расположены тензодатчики 12. Вспомогательные держатели жестко зафиксированы на опорной плите 13, которая, в свою очередь, жестко крепится к ползуну прессы 1, например, посредством хвостовика 2. Верхняя половина штампа крепится к держателю основному 10 либо непосредственно при помощи специального узла крепления 8, либо через промежуточную плиту 11. Определение поперечных сил производится по величинам деформаций силоизмерительных стержней с тензодатчиками при помощи регистрирующей аппаратуры (аналого-цифровой преобразователь с выводом на ЭВМ). Также имеется возможность измерения перекоса ползуна 1 путем определения расстояния между неподвижными устройствами фиксации датчиков малых перемещений 14 и ползуном.

Выводы

1. Подтвержден факт возникновения поперечных сил при выполнении технологической операции.
2. Предложены аналитические зависимости для определения поперечных сил для определенных технологических операций обработки металлов давлением.
3. Разработаны алгоритмы для определения поперечных сил в зависимости от выполняемых технологических операций объемной и листовой штамповки.
4. Установлено теоретически и экспериментально подтверждено, что величина поперечных сил может достигать $\sim 20 \div 100\%$ от силы деформирования.

-
1. **Сторожев, М.В.** Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 423 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

S.V. Kuznesov

RESEARCH OF CROSS-SECTION FORCES AT PERFORMANCE OF TECHNOLOGICAL OPERATIONS OF PROCESSING OF METALS BY PRESSURE

In article the way of theoretical definition of the cross-section forces arising at performance of technological operations of volume and sheet punching of processing of metals by pressure is presented. The design of the measuring device for definition of cross-section forces is offered.

Key words: processing of metals by pressure, cross-section forces, definition of forces in technological operations of processing by pressure.

УДК 621.9

Е.В. Симагина¹, Ю.В. Агабеков²**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
С НАНОСТРУКТУРНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**ООО «Нижегородские моторы» группа ГАЗ¹,
НПФ «Элан-Практик»²

В условиях действующего производства проведены испытания твердосплавных режущих пластин с различными видами наноструктурных покрытий. Выявлено четырёхкратное увеличение стойкости режущего инструмента с наноструктурным покрытием AlTiN по сравнению с пластинами без покрытия.

Ключевые слова: наноструктурное покрытие, стойкость режущего инструмента, вакуумная установка, магнетронное плазменное напыление.

Работоспособность металлорежущего инструмента в процессе механической обработки в значительной мере влияет на качество обрабатываемой поверхности за счет изменения контактных условий в зоне резания, стабильности процесса резания, а также на производительность обработки за счет сокращения времени резания (возможности увеличения режима резания) и снижения времени на замену режущего инструмента (увеличение периода стойкости) [1].

В современной промышленности широко применяются различные конструкционные материалы: титановые, алюминиевые, титан - алюминиевые сплавы и др. Эти материалы, при низкой удельной массе обладают высокими прочностными и вязкостными характеристиками. Высокая вязкость существенно затрудняет обработку таких материалов. В связи с этим к современному металлорежущему инструменту предъявляются повышенные требования, он должен иметь высокую стойкость в условиях высоких механических и тепловых нагрузок.

Процесс обработки металлов резанием может быть существенно усовершенствован за счёт применения покрытия режущего инструмента.

Состав и свойства износостойких покрытий в значительной степени зависят от техники и технологии их нанесения [2]. Методы нанесения путём осаждения делятся на две большие группы: физические (ФОП, или PVD) и химические (ХОП, или CVD). Внутри этих двух основных групп существует большое количество разновидностей. Также активно применяются комбинированные методы.

При *физическом* осаждении (PVD) материал покрытия переходит в газовую фазу из твёрдого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счёт кинетической энергии столкновения частиц материала. Нанесение покрытий методом PVD происходит при невысокой температуре (до 450°C), что не приводит к практическим ограничениям по материалам, на которые наносится покрытие. Это важно при нанесении покрытия на быстрорежущую сталь, так как температура не превышает температуру отпуска закалённой стали (около 550°C). Процессы PVD происходят в вакууме или в атмосфере рабочего газа при достаточно низком давлении (около 10⁻² мбар).

Метод *химического* осаждения (CVD) практически не имеет ограничений по химическому составу покрытий. Свойства получаемого покрытия зависят от комбинации материалов и параметров процесса. Если процесс протекает при заполнении пространства реакционным газом (кислородом, азотом, углеводородом), происходит нанесение оксидных, нитридных и карбидных покрытий.

При таком методе нанесения покрытия химические реакции происходят на или около поверхности покрываемого материала. В противоположность процессам PVD, при которых твёрдые материалы покрытия переводятся в газообразную фазу путём испарения или распыления, при процессе CVD в камеру покрытия подаётся смесь газов.

Для протекания необходимых химических реакций требуется температура до 1100°. Это существенно ограничивает число материалов, на которые можно нанести покрытие методом CVD. Процессы CVD происходят в менее глубоком вакууме при давлениях между 100 и 1000 Па.

Область применения двух основных методов нанесения покрытия определяется их описанными ранее свойствами. Процессы CVD протекают при высоких температурах и при более высоком давлении. В следствие чего, этот метод не пригоден для изделий из быстрорежущей стали (термообработанные быстрорежущие стали теряют все свои свойства в результате отпуска), а для твёрдого сплава такие температуры приводят к неприятным последствиям – в поверхностном слое наблюдается снижение вязкости твёрдого сплава с покрытием по сравнению с твёрдым сплавом без покрытия. Это является следствием обезуглероживания граничной зоны, что приводит к образованию эта-фазы твёрдого сплава – хрупкой поверхностной зоны толщиной 3-5 мкм.

Для снижения вредного воздействия температуры нанесения покрытия на свойства подложки был разработан способ нанесения покрытия CVD при более низких температурах (около 800°C). Такой метод получил название *среднетемпературного метода CVD* (MT-CVD) в отличии от *высокотемпературного* (HT-CVD).

Снижение температуры позволило сократить снижение вязкости, но не решило эту проблему полностью. Скомпенсировать снижение вязкости твёрдого сплава под воздействием температуры способствовало появлению градиентных твёрдых сплавов (с изменяемым по глубине составом) и нанесению многослойных покрытий.

Два метода нанесения покрытия также различаются между собой по виду внутренних напряжений в слое покрытия. При нанесении покрытий методом PVD имеют место сжимающие напряжения, а при нанесении методом CVD – растягивающие. Растягивающие напряжения улучшают адгезию покрытия и основы.

Таким образом, описанные свойства двух методов нанесения покрытия определили их область применения. Химический метод нанесения покрытия в основном используется для нанесения покрытия на твердосплавные пластины для токарной обработки. Доля фрезерных пластин с покрытием CVD значительно ниже, так как они более чувствительны к возможному снижению вязкости в поверхностной зоне под покрытием из-за постоянной работы с переменными нагрузками.

На сегодняшний день разработана ещё одна разновидность метода CVD, позволившая снизить температуру покрытия практически до уровня покрытия PVD и избежать её негативных последствий, – этот метод представляет собой практическую комбинацию двух основных методов нанесения покрытий методом CVD и происходит в среде плазмы, как при методе PVD.

Кроме способа нанесения покрытия, PVD и CVD отличаются также по составу и структуре.

В основе твердых упрочняющих покрытий лежат тонкопленочные керамические материалы – нитриды, карбиды, карбонитриды переходных металлов (титана, хрома, циркония, вольфрама и др.). Эволюция упрочняющих покрытий представлена на рис.1.

Развитие упрочняющих покрытий шло в направлении усложнения их структуры: от монофазных к многофазным, от однослойных к многослойным и градиентным покрытиям.

Одним из перспективных направлений повышения стойкости РИ является нанесение нанокompозитных покрытий. Нанокompозитные покрытия представляют собой новый класс материалов, которые обладают уникальным комплексом физических и механических свойств.

Нанокompозитное покрытие состоит, по крайней мере, из двух фаз, имеющих нанометровые размеры: нанокристаллической и аморфной, или двух различных нанокристаллических фаз. Механические и трибологические свойства нанокompозитных (наноструктурных) покрытий не подвержены правилам объемного смешивания, а зависят от эффектов границ зерен, и от синергетических взаимодействий композитных составных частей, благодаря размерному эффекту.

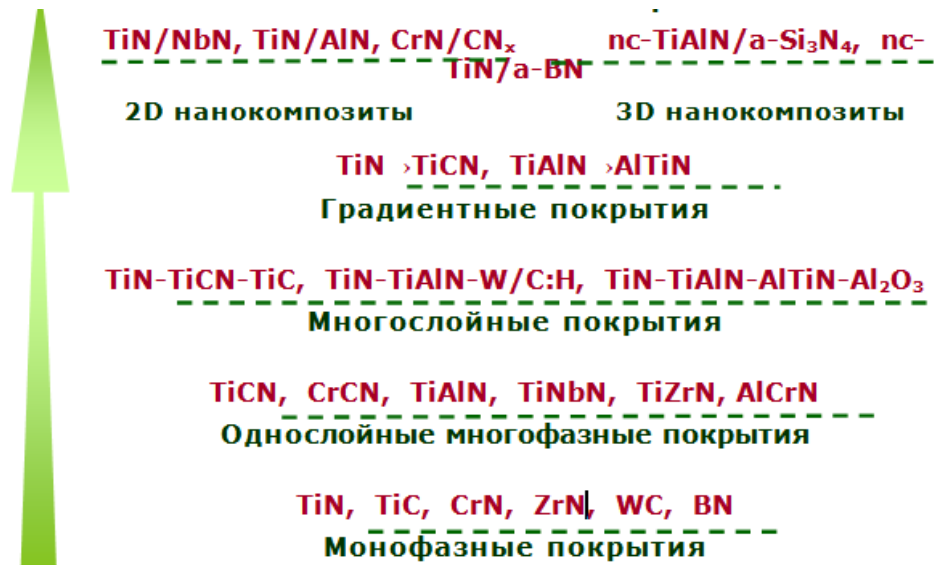


Рис. 1. Развитие упрочняющих нанокompозитных покрытий

Нанокompозитные покрытия могут быть разделены на два типа: двухразмерные (2D) и трехразмерные (3D) нанокompозиты.

2D нанокompозиты (покрытия типа superlattice) – это многослойные покрытия с периодической структурой двух или более чередующихся нанослоев (толщиной от 1 нм до 10 нм) различных материалов. В качестве материалов нанослоев могут выбираться различные металлы, углерод, нитриды, карбиды, оксиды переходных металлов и др.

3D нанокompозиты – это покрытия, структура которых представляет собой объемное распределение двух и более наноразмерных фаз, находящихся в непосредственном контакте друг с другом. Фазы, входящие в состав нанокompозита, могут иметь нанокристаллическую или аморфную структуру. По своему химическому составу эти фазы могут быть металлическими, углеродными или керамическими (нитриды, карбиды, оксиды переходных металлов и др.).

В настоящей работе описаны производственные испытания режущих сменных многогранных неперетачиваемых пластин (СНП), организованные с целью оценки работоспособности режущего инструмента с различными видами наноструктурных покрытий. Систематическое исследование такого вида покрытий в настоящее время отсутствует.

Испытания проводились в условиях действующего производства ООО «Нижегородские моторы» специалистами отдела развития технологических процессов и подготовки производства в период с июля по декабрь 2009. Были испытаны СНП формы TNMG 220408 из сплава BK8, производства «Кировоградский завод твердых сплавов», с различным видами наноструктурных покрытий (пять видов), нанесенных для испытания в вакуумной установке для магнетронного плазменного распыления (PVD-покрытий) UniCoat 700 НПФ «Элан-практик» (г. Дзержинск). В настоящее время магнетронное распыление является одним из основных широко распространенных вакуумных методов нанесения тонкопленочных покрытий.

Таблица 1

Характеристики покрытий

№ п/п	Номер опыта	Тип покрытия	Цвет покрытия	а, мкм	Н, ГПа	Е*, ГПа	Н/Е	nГ, %	HV	Адгезия
1	48к АТ	AlTiN	Серый	3,1	44	367	0,127	75	4125	HF1
2	54к АТ-Т	AlTiN- TiN ml	Радужный	3,0	39	326	0,127	74	3686	HF1
3	84к АХ	AlCrN	Светло-серый	3,5	42	363	0,122	73	3931	HF1
4	57к АТ-Т	AlTiN-TiN ml	Радужный	3,5	41	369	0,118	71	3851	HF1
5	6к АТ	(Ti,C)N	Светло-коричневый	3,0	42	317	0,14	78	3932	HF1

Примечание:

а – расчётная толщина.

Н – инденторная твёрдость.

$E^* = E / (1 - \nu^2)$, ГПа – приведённый модуль упругости (где E – модуль Юнга, $\nu = 0,25$ – коэффициент Пуассона).

HV – микротвёрдость по Виккерсу.

nГ, % - доля работы упругой деформации (упругое восстановление)

Механические характеристики покрытия (табл. 1) оценивались методом наноиндентации образца-свидетеля в соответствии с DIN EN ISO 14577-1 с использованием системы FISHERSCOPE ®H100C. Адгезия покрытия к основе оценивалась по адгезионному тесту Роквелла (стандарт VDI-3198) – индентации образца-свидетеля с покрытием на твердомере Роквелла под нагрузкой 1500 Н и последующей визуальной оценкой результата индетации по шестибальной шкале. Балл HF1 соответствует наивысшей адгезионной прочности.

Испытания образцов проводились на операции токарной обработки детали 31029-1701040 – Крышка первичного вала (материал СЧ18 ГОСТ1412-85 – отливка 143-229 НВ) (табл. 2).

Таблица 2

Данные об операции токарной обработки

№ п/п	Операция	05-токарная
1	Обработка	Получистовая с ЧПУ
2	Оборудование	Станок токарный с ЧПУ СВ-141
3	СОЖ	АТМ СОЖ
4	Обрабатываемый размер	$d116/d82$
5	Частота вращения шпинделя	$n=380$ об/мин
6	Скорость резания	$V=100-130$ м/мин
7	Глубина резания	$a=0,5-1$ мм
8	Длина обработки	$L_{обр}=32$ мм
9	Минутная подача	$S_m=57$ мм/мин
10	Время резания	$T_{рез}=0,56$ мин

Испытания проводились по действующей методике М 37.102.0022. В процессе испытания фиксировалась величина фактической стойкости и износа СНП. Смена изношенных граней СНП производилась по технологическому критерию затупления (при несоответствии

обработанной поверхности заданным параметрам точности и шероховатости). После окончания испытаний проводилась статистическая обработка полученных результатов.

Оценка работоспособности СНП с различными покрытиями осуществлялась на основе сравнения их стойкости со стойкостью СНП без покрытия (рис. 2). Коэффициент стойкости СНП без покрытия принят равным 1. Из рис. 2 видно, что наибольшую работоспособность проявляет покрытие AlTiN. Этот вывод вытекает и из анализа табл. 3.

Стойкость СНП при обработке СЧ18

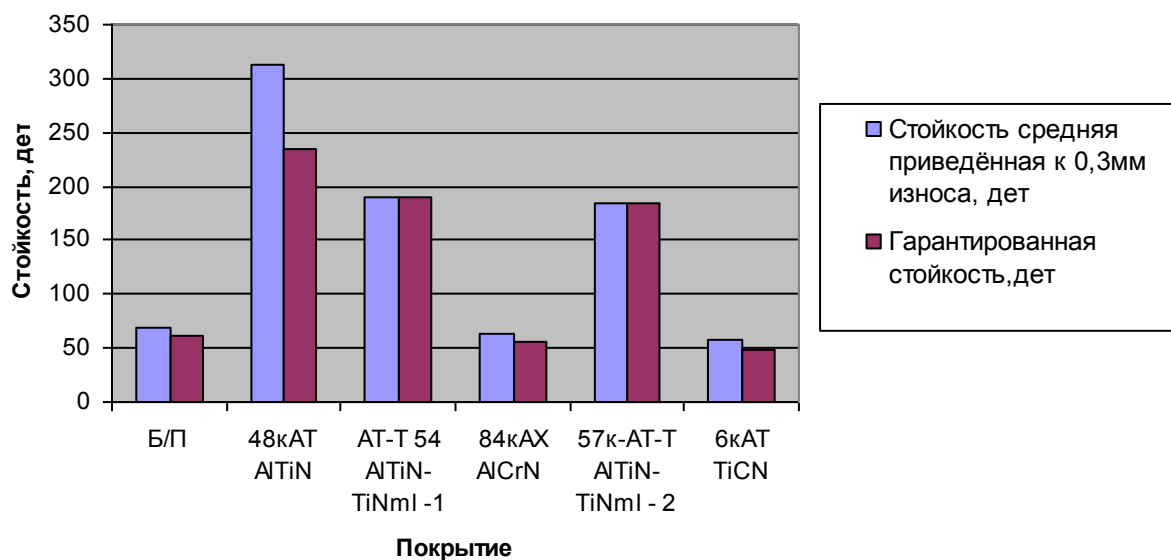


Рис. 2. Гистограмма, иллюстрирующая стойкость СНП с различными видами наноструктурных покрытий при обработке СЧ18

В табл. 3 приведены результаты математической обработки испытуемого инструмента с наноструктурными покрытиями.

Таблица 3

Результаты испытания вариантов покрытий

№ п/п	Покрытие	Количество опытов	Средняя приведённая стойкость, дет./грань	Гарантированная стойкость, дет./грань	Коэффициент стойкости (по сравнению с непокрытым образцом)	Коэффициент вариации средней приведённой стойкости
-	Без покрытия	9	69	61	1,00	0,09
1	AlTiN	9	312	234	4,54	0,20
2	AlTiN-TiNml1	9	189	145	2,75	0,18
3	AlCrN	9	64	55	0,92	0,10
4	AlTiN-TiNml2	9	185	161	2,68	0,10
5	(Ti,C)N	9	58	48	0,84	0,13

Выводы

1. Низкое значение коэффициентов вариации свидетельствует о достоверности и высокой степени повторяемости полученных данных.

2. Значительное повышение стойкости (в 4,54 раза по сравнению с непокрытым образцом) наблюдалось при эксплуатации режущего элемента с покрытием AlTiN (образец №1), а также с покрытием AlTiN-TiNml (образец №2). Снижение стойкости (по сравнению с непокрытым образцом) наблюдалось при эксплуатации режущего элемента с покрытием (Ti,C)N.

Библиографический список

1. **Бобров, В.Ф.** Резание металлов / В.Ф. Бобров. – М.: Машиностроение, 1975. – 343 с.
2. **Локтев, Д.А.** Методы нанесения износостойких покрытий и оборудование для их реализации // Стружка. 2004. № 12. С. 6-11.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

E.V. Simagina, Y.V. Agabekov

THE ENHANCE OF CUTTING INSTRUMENTS WEAR AND TEAR BY MEANS OF NANOTECHNOLOGIES

The five hard-metal nano-coated inserts for turning were tested in industry-conditions of “Gorky Automobile Plant”. The AlTiN-nano-coat increased tool life in four times.

Key words: nano-structure -coating, cutting instruments wear and tear, vacuum - adjustment, magnetron-plasma-covering.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.372.801

А.С. Раевский, С.Б. Раевский, О.В. Усков

СПЕКТР ВОЛН КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО СЛОИСТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

С позиции теории несамосопряженных операторов формулируются краевые задачи для круглого открытого диэлектрического волновода. Рассматривается полный спектр волн, включая собственные и несобственные комплексные волны. Основное внимание уделяется особенностям волн, связанных с несамосопряженностью электродинамических операторов.

Ключевые слова: круглый открытый диэлектрический волновод, спектр волн, собственные и несобственные комплексные волны.

Введение

Круглый открытый диэлектрический волновод (ОДВ) является одной из наиболее широко используемых открытых направляющих структур как СВЧ и КВЧ, так и оптического диапазонов волн. Интерес к нему определяется, с одной стороны, широкими возможностями его использования при построении линий связи и функциональных узлов (ФУ) указанных диапазонов, с другой стороны, тем, что ОДВ удобен для теоретического исследования особенностей открытых направляющих структур в силу возможности строгого решения соответствующей ему краевой задачи. Для круглого ОДВ возможна точная запись (в замкнутой форме) дисперсионных уравнений, гарантирующая адекватность используемой математической модели реальной направляющей структуре. Математическая модель круглого регулярного ОДВ позволяет выявить основные особенности волн, направляемых открытыми диэлектрическими волноводами, в частности, волоконными световодами. В большинстве работ [1-8], посвященных исследованию ОДВ, он рассматривался в основном как структура, направляющая поверхностные волны, поля которых экспоненциально убывают в радиальном направлении. Теория именно таких волн получила наиболее полное развитие [9-16]. Поверхностные волны – основной тип волн, на которых осуществляется перенос энергии в волоконных световодах, для их исследования используется математическая модель ОДВ. Однако в целом ряде устройств (это, в первую очередь, относится к плавным переходам линий передач с малым замедлением [16] и к антеннам неосевого излучения) поверхностные волны используются лишь для возбуждения, подвергаясь затем преобразованию в волны, слабо связанные с направляющей структурой, имеющие большую поперечную протяженность поля. При этом возникают задачи о расчете поля излучения и характеристик передачи нерегулярных участков тракта [16], при решении которых неизбежно приходится учитывать полный спектр волн диэлектрического волновода.

В отличие от экранированных направляющих структур полный спектр открытых волноводов, помимо дискретной, имеет (в силу отсутствия на внешней границе краевого усло-

вия, соответствующего задаче Штурма-Лиувилля [17]) непрерывную часть, представляемую интегралом по одному из волновых чисел. Волновые числа непрерывного спектра изменяются в пределах от нуля до бесконечности и соответствуют полю излучения из волновода и полю вблизи источника. Эти поля частично описываются также различными типами комплексных волн (КВ), входящих в дискретную часть спектра. Комплексность волновых чисел указанных волн не связана с тепловыми потерями в средах направляющей структуры.

1. Краевые задачи для открытого слоистого диэлектрического волновода. Виды возможных решений

Общее решение уравнения (уравнения Гельмгольца: $\Delta \Pi_z^{e,m} + k^2 \Pi_z^{e,m} = 0$, где $k = \omega \sqrt{\epsilon \mu}$) в случае ОДВ имеет вид

$$\Pi_z^{e,m} = Z_n(\alpha_m r) \begin{cases} \cos n\varphi \\ \sin n\varphi \end{cases} e^{-i\beta z}, \quad (1)$$

где Z_n - цилиндрическая функция 1-го рода для внутреннего слоя, линейная комбинация цилиндрических функций 1-го и 2-го рода для промежуточных слоев, цилиндрическая функция 3-го рода для внешней области.

При $n = 0$ поля волн ОДВ не зависят от координаты φ (симметричные волны). При наложении граничного условия на бесконечности общее число граничных условий прямой краевой задачи будет:

$$U_m = 0; m = 1, 2, \dots, 2q; N = 2q,$$

где q - число слоев, на которое разбивается поперечное сечение рассматриваемой структуры. Поскольку число граничных условий сопряженной краевой задачи

$$N^* = q(2\bar{n}) - N = 2q; N^* = N,$$

оператор является самосопряженным. Здесь \bar{n} - порядок дифференциального уравнения.

При снятии граничного условия на бесконечности $N = 2q - 1$. В результате, поскольку $N^* = q(2\bar{n}) - (2q - 1) = 2q + 1 \neq N$, оператор становится несамопряженным.

Действительным собственным значениям краевой задачи соответствуют решения дисперсионного уравнения, являющиеся волновыми числами поверхностных волн. Это волны, направляемые данной структурой. Их распространение обусловлено полным внутренним отражением на границах раздела сред.

Известно [6, 18], что на критических частотах поверхностные волны переходят в волны излучения - вытекающие волны. Для описания этих волн необходимо вводить вместо (1) интегральное представление поля и соответственно непрерывный спектр собственных значений, хотя термин «собственные значения» в данном случае не является строгим, поскольку вытекающие волны не удовлетворяют условию излучения, в результате чего краевая задача для них не является однородной.

В случае несимметричных волн ($n \neq 0$) второе условие самосопряженности оператора не выполняется (в независимости от граничного условия на бесконечности), в результате чего в спектре решений дисперсионного уравнения краевой задачи, которая является несамопряженной, присутствуют комплексные значения, соответствующие различным типам комплексных волн. Для собственных комплексных волн, удовлетворяющих условию излучения, они соответствуют однородной краевой задаче, для несобственных (не удовлетворяющих условию излучения) - полуюднородной.

Несобственные комплексные волны подразделяются [19, 20] на вытекающие и медленные несобственные волны. Дисперсионные характеристики вытекающих волн, первое упоминание о которых было в [18], являются продолжениями характеристик поверхностных волн на частотах ниже критических. Комплексность их волновых чисел обусловлена потерями на излучение. Вытекающие волны могут переходить в собственные комплексные волны.

Термин «собственные» означает, что они при тех же параметрах рассматриваемой структуры будут присутствовать и в спектре решений однородной задачи. В случае малых n такие волны существуют при достаточно высоком значении отношения диэлектрических проницаемостей слоев ОДВ. В случае больших n они появляются при меньших значениях этого отношения [21]. Характерной особенностью таких волн является равенство нулю среднего за период потока мощности, переносимой через поперечное сечение структуры.

С уменьшением частоты собственные комплексные волны снова переходят [19] в вытекающие, а те, в свою очередь, в медленные несобственные. Физическая природа комплексности решений, соответствующих медленным несобственным комплексным волнам, не вполне ясна.

Если в рассматриваемом ОДВ учесть потери на поглощение хотя бы в одном из слоев, то краевая задача будет несамосопряженной независимо от того, накладывается условие излучения или не накладывается. Все собственные значения будут комплексными, а значит, и решения дисперсионного уравнения также будут комплексными. В данном случае комплексность волновых чисел обусловлена потерями на поглощение, приводящими к уменьшению амплитуд полей по продольной координате ОДВ.

Дисперсионное уравнение двухслойного ОДВ имеет [19] вид

$$\frac{n^2(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)}{a^2 \alpha_1^4 \alpha_2^4} (\varepsilon_2 \mu_2 \alpha_1^2 - \varepsilon_1 \mu_1 \alpha_2^2) - \left[\frac{\varepsilon_1 J'_n(\alpha_1 a)}{\alpha_1 J_n(\alpha_1 a)} - \frac{\varepsilon_2 H_n^{(2)'}(\alpha_2 a)}{\alpha_2 H_n^{(2)}(\alpha_2 a)} \right] \cdot \left[\frac{\mu_1 J'_n(\alpha_1 a)}{\alpha_1 J_n(\alpha_1 a)} - \frac{\mu_2 H_n^{(2)'}(\alpha_2 a)}{\alpha_2 H_n^{(2)}(\alpha_2 a)} \right] = 0, \tag{2}$$

где J_n - функция Бесселя; $H_n^{(2)}$ - функция Ханкеля 2-го рода.

На рис.1 приведены качественные частотные зависимости фазовых постоянных и коэффициентов затухания, для гибридных волн с $n = 1$, взятые из [19]. На рисунке обозначено: $\tilde{\beta}_1 = \beta_1 / k_0$ - нормированная фазовая постоянная (сплошные линии), $k_0 = \omega \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2}$; $\tilde{\beta}_2 = -\beta_2 a$ - нормированный коэффициент затухания (пунктир), a - радиус ОДВ. Продольное волновое число в общем случае комплексное: $\beta = \beta_1 + i\beta_2$; $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$.

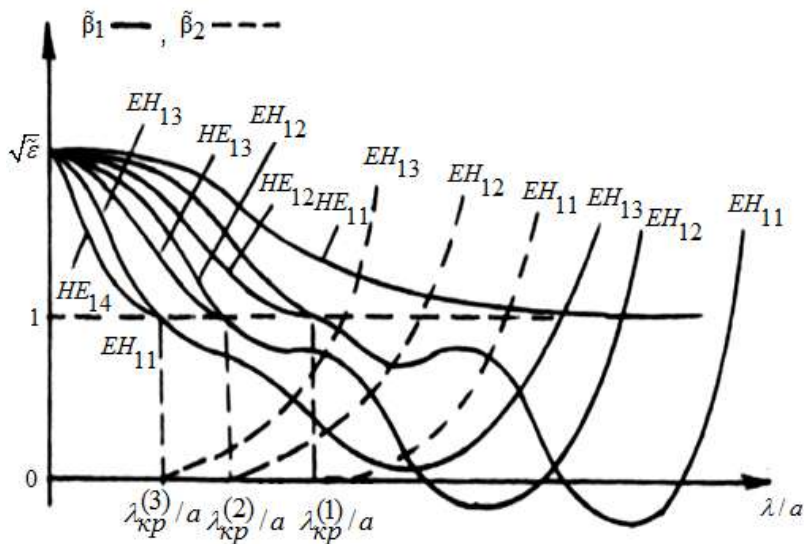


Рис. 1. Частотные зависимости фазовых постоянных и коэффициентов затухания волн круглого ОДВ

Из рисунка видно, что с уменьшением длины волны λ нормированные фазовые постоянные поверхностных волн EH_{1m} и HE_{1m} стремятся к $\sqrt{\tilde{\varepsilon}}$. На критических частотах (в точках $\lambda_{кр}^{(i)}/a$) волны EH_{1m} переходят в вытекающие. При достаточно больших значениях $\tilde{\varepsilon}$ на характеристиках волн EH_{11} и EH_{12} есть участки, соответствующие собственным комплексным волнам ($\tilde{\beta}_1 < 0$), которые при уменьшении частоты переходят сначала в вытекающие, а затем в медленные несобственные. Волны HE_{1m} , как, впрочем, и все волны HE_{nm} , продолжения в виде вытекающих на частотах ниже критических в структуре без диссипации энергии не имеют.

2. Критические частоты HE и EH-волн двухслойного ОДВ

Традиционно считается [6], что поверхностные волны EH_{nm} и $HE_{n,m+1}$ имеют одинаковые критические частоты, ниже которых только волны EH_{nm} имеют продолжения в виде вытекающих. Однако численные расчеты показывают, что на частотах, близких к критическим, дисперсионные характеристики волн HE_{nm} не просчитываются, на них $\tilde{\beta}$ очень близко подходит к $\sqrt{\tilde{\varepsilon}_2}$ ($\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1/\varepsilon_2$), но не достигает этого значения.

Проведем анализ дисперсионного уравнения двухслойного ОДВ (2) вблизи критических частот поверхностных волн, которое, как известно [22], может быть записано в виде

$$P_n(\alpha_1 a) = \frac{1}{2} F_n(\alpha_2 a) \frac{\alpha_1}{\alpha_2} \left(\frac{\varepsilon_2 + \mu_2}{\varepsilon_1 + \mu_1} \right) \pm \pm \sqrt{\frac{1}{4} F_n^2(\alpha_2 a) \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^2 \left(\frac{\varepsilon_2 - \mu_2}{\varepsilon_1 - \mu_1} \right)^2 + \frac{\alpha_1^2}{\varepsilon_1 \mu_1} Q}, \quad (3)$$

где α_1 и α_2 - поперечные волновые числа внутри ОДВ и в окружающей среде соответственно; ε_1, μ_1 и ε_2, μ_2 - диэлектрическая и магнитная проницаемости ОДВ и окружающей среды; a - радиус ОДВ;

$$P_n(\alpha_1 a) = \frac{J'_n(\alpha_1 a)}{J_n(\alpha_1 a)}; \quad Q = \frac{(\alpha_1^2 - \alpha_2^2)(\varepsilon_2 \mu_2 \alpha_1^2 - \varepsilon_1 \mu_1 \alpha_2^2)}{a^2 \alpha_1^4 \alpha_2^4}.$$

В общем случае поле во внешней среде описывается (1) функциями Ханкеля, при этом

$$F_n(\alpha_2 a) = H_n^{(2)'}(\alpha_2 a) / H_n^{(2)}(\alpha_2 a). \quad (4)$$

Поля поверхностных волн во внешней среде могут быть также представлены [23] функциями Мак-Дональда. В этом случае

$$F_n(\alpha_2 a) = -K_n'(\alpha_2 a) / K_n(\alpha_2 a). \quad (5)$$

В (5) K_n - функции Мак-Дональда; штрих в (4) и (5) означает дифференцирование по всему аргументу. Поперечное волновое число во внутренней области вычисляется как

$$\alpha_1 = \sqrt{\varepsilon_1 \mu_1 \omega^2 - \beta^2}. \quad (6)$$

Поперечное волновое число в окружающей среде в (4) определяется аналогичным соотношением

$$\alpha_2 = \sqrt{\varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 - \beta^2}, \quad (7)$$

а в формуле (5) – соотношением:

$$\alpha_2 = \sqrt{-\varepsilon_2 \mu_2 \omega^2 + \beta^2}.$$

Два знака перед радикалом в уравнении (3) указывают [6] на существование у дисперсионного уравнения двух ветвей решений. При использовании представления (5) знак минус соответствует [6] волнам HE_{nm} , знак плюс – волнам EH_{nm} . При использовании представления (4) знак минус соответствует [19] волнам EH_{nm} , знак плюс – волнам HE_{nm} . Поверхностная волна HE_{11} , как известно, не имеет критической частоты. Критические частоты других гибридных волн, считается, попарно совпадают: EH_{11} и HE_{12} , EH_{12} и HE_{13} и т.д. [6].

Используя представление функции $F_n(\alpha_2 a)$ в виде (5), уравнение (3) при $n=1$ вблизи критических частот поверхностных волн ($\omega \rightarrow \omega_{кр}$), взятое со знаком плюс перед радикалом, приводим к виду

$$\frac{y^2}{x^2} f(x) = \left(\frac{1}{\tilde{\varepsilon}} + \frac{1}{\tilde{\mu}} \right), \quad (8)$$

со знаком минус – к виду

$$f(x)/x^2 = -\frac{2}{\tilde{\varepsilon} + \tilde{\mu}} \left[\ln\left(\frac{y}{2}\right) + C \right], \quad (9)$$

где $x = \alpha_1 a$; $y = \alpha_2 a$; $\tilde{\varepsilon} = \varepsilon_1 / \varepsilon_2$; $\tilde{\mu} = \mu_1 / \mu_2$; $f(x) = x J_1'(x) / J_1(x)$; C – постоянная Эйлера. Уравнение (8) дает участки дисперсионных характеристик поверхностных волн EH_{1m} вблизи их критических частот, уравнение (9) – волн $HE_{1,m+1}$ также вблизи критических частот ($m=1,2,3,\dots$).

Нетрудно показать, что ветвь решений уравнения (8) доходит до точки $x = h_{1m}$, $y = 0$, где h_{1m} – m -й корень уравнения $J_1(x) = 0$, соответствующий критической частоте волны EH_{1m} . Действительно, при $\omega \rightarrow \omega_{кр}$ имеем $x \rightarrow h_{1m}$; $\tilde{\beta} = \frac{\beta\lambda}{2\pi} \rightarrow 1$, $\sqrt{\tilde{\varepsilon}\tilde{\mu}-1} \frac{2\pi a}{\lambda} \rightarrow h_{1m}$, в результате чего уравнение (8) принимает вид

$$\frac{\left(\frac{2\pi a}{\lambda}\right)^2 (\tilde{\varepsilon}\tilde{\mu}-1) - x^2}{x(x-h_{1m})} = \frac{1}{\tilde{\varepsilon}} + \frac{1}{\tilde{\mu}}. \quad (10)$$

Численный анализ показывает, что величина $\frac{2\pi a}{\lambda} \sqrt{\tilde{\varepsilon}\tilde{\mu}-1}$ при $\omega \rightarrow \omega_{кр}$ стремится к h_{1m} медленнее, чем $x \rightarrow h_{1m}$. В результате левая часть уравнения (10) вблизи $\omega_{кр}$ всегда положительная и решение этого уравнения устойчиво сходится к точке $x = h_{1m}$, $y = 0$, $\tilde{\beta} = 1$.

Поскольку левая и правая части уравнения (9) при $x \rightarrow h_{1m}$, $y \rightarrow 0$ стремятся к бесконечности, создается впечатление, что решение этого уравнения в пределе также стремится к точке $x = h_{1m}$, $y = 0$, $\tilde{\beta} \rightarrow 1$, в результате чего критические частоты волн EH_{1m} и $HE_{1,m+1}$ совпадают. Однако в действительности такого совпадения нет, потому что при $\omega \rightarrow \omega_{кр}$ в левой и правой частях уравнения (9) получаются бесконечности разного порядка.

Действительно, уравнение (9), переписанное в виде

$$\frac{f(x)}{x^2 [\ln((y/2) + C)]} = -\frac{2}{\tilde{\varepsilon} + \tilde{\mu}}, \quad (11)$$

в левой части при $\omega \rightarrow \omega_{кр}$ имеет неопределенность вида ∞/∞ . Только в том случае, когда предел левой части уравнения (11) при $x \rightarrow h_{1m}$ будет конечной величиной, это уравнение будет иметь решение в точке $x = h_{1m}$, $y = 0$, $\tilde{\beta} = 1$.

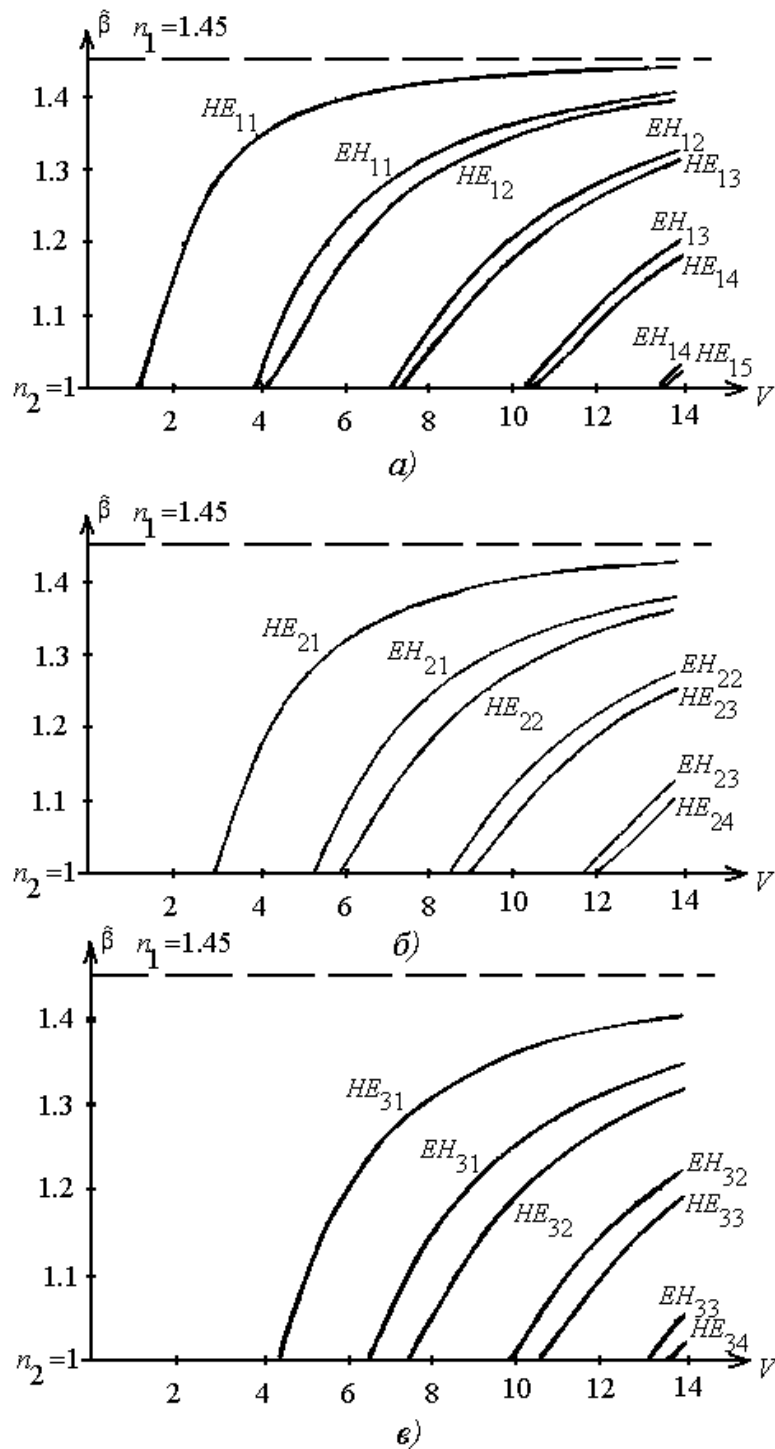


Рис. 2. Дисперсионные характеристики волн ОДВ с параметрами:
 $\tilde{\epsilon}_1 = 2,1025$; $\tilde{\epsilon}_2 = 1$

Поскольку

$$\lim_{x \rightarrow h_m} \frac{f(x)}{x^2 \left(\ln \left(\frac{y}{2} \right) + C \right)} = \lim_{x \rightarrow h_m} \frac{2}{h_m (h_m - x)} \rightarrow \infty,$$

можно утверждать, что уравнение (11) не может иметь решения в точке $x = h_m, y = 0$, соответствующей критической частоте волны EH_{1m} . Как показывают численные расчеты, дис-

персионные характеристики волн $HE_{1,m+1}$, начиная с определенных частот, достаточно удаленных от $\omega_{кр}(EH_{1m})$, находятся на линии $\tilde{\beta} = 1$ в пределах точности получаемых результатов. Таким образом, утверждение [6] о том, что критические частоты поверхностных волн $HE_{1,m+1}$ и EH_{1m} совпадают, является ошибочным.

На рис. 2, а приведены дисперсионные характеристики гибридных волн ОДВ с $n=1$ для $\varepsilon_1 = 2,1025$, $\varepsilon_2 = 1$. Видно, что фактически критические частоты волн $HE_{1,m+1}$, на которых $\tilde{\beta}$ начинает отличаться от $\sqrt{\tilde{\varepsilon}_2}$, находятся несколько выше критических частот волн EH_{1m} . Из рис. 2, б в видно, что при $n = 2, 3$ эта тенденция усиливается.

3. Трансформация поверхностных волн в комплексные

Рассмотрим характеристики несимметричных волн ОДВ вблизи их критических частот.

Дисперсионное уравнение волн ОДВ, составленное методом согласования полей на границе раздела сред, имеет вид (2). Это уравнение решается совместно с уравнениями, связывающими волновые числа (6) и (7).

Спектр волн ОДВ, определяемый по корням дисперсионного уравнения (2), включает в себя [20] поверхностные (направляемые) волны и различные типы волн излучения: вытекающие, медленные несобственные и собственные комплексные волны. Считается [6], что все поверхностные волны, за исключением волны HE_{11} , имеют критические частоты, на которых поперечное волновое число во второй области (окружающая среда) $\alpha_2 = 0$. При этом фазовая постоянная $\beta_1 = k_0 = \omega^2 \varepsilon_2 \mu_2$. На частотах выше критических у поверхностных волн α_2 — чисто мнимое отрицательное, что приводит к экспоненциальному убыванию поля при удалении от ОДВ.

Рассмотрим поведение волновых чисел волн ОДВ в закритической области. Обратимся к несимметричным волнам с индексом $n = 1$. Известно [19], что для ОДВ краевая задача может быть поставлена с наложением нулевого условия на бесконечности и без него. В первом случае в спектре ОДВ, помимо поверхностных волн, могут присутствовать лишь собственные комплексные волны, поле которых убывает при удалении от ОДВ, поскольку у них $Im(\alpha_2) < 0$. Однако эти волны возникают лишь при определенных параметрах направляющей структуры и не могут являться продолжением поверхностных волн в закритической области. Во втором случае в спектре ОДВ дополнительно появляются комплексные волны, которые являются несобственными ($Im(\alpha_2) > 0$, поле нарастает с удалением от ОДВ). На рис. 3, а, б приведены дисперсионные характеристики волн при $n = 1$. Вытекающие волны являются непосредственным продолжением поверхностных волн в закритическую область. С уменьшением частоты при $\beta_1 > k_0$ они переходят в медленные несобственные волны. Считается [24], что на критических частотах в вытекающие при $n \neq 0$ переходят лишь поверхностные волны типа EH_{nm} . Как показано в [19], в спектре ОДВ присутствуют также волны HE_{1m}^k , комплексные во всем частотном диапазоне, также являющиеся несобственными. Характеристики указанных комплексных волн, приведенные на рис. 3, соответствуют параметрам $\varepsilon_1 = 2,129\varepsilon_0$; $\varepsilon_2 = \varepsilon_0$.

Собственных комплексных волн при этом нет. Помимо комплексных волн, характеристики которых ранее приводились [19], были обнаружены [22, 25] волны, появляющиеся на критических частотах поверхностных волн (K_{11} на рис. 3) и имеющие дисперсионные характеристики, сближающиеся с ростом частоты с характеристиками поверхностных волн HE_{1m} . Однако у этих волн $Im(\alpha_2) > 0$ и растет с увеличением частоты, т.е. по характеру зависимости поля от радиальной координаты эти волны относятся к медленным несобственным волнам. С математической точки зрения эти комплексные волны, имеющие $Im(\alpha_2) > 0$, не являются собственными волнами ОДВ, поскольку описываются решениями полуоднородной задачи. Таким образом, при смене знака у $Im(\alpha_2)$ происходит качественный скачок в опреде-

лении типа краевой задачи для ОДВ, заключающийся в переходе однородной задачи в полую однородную.

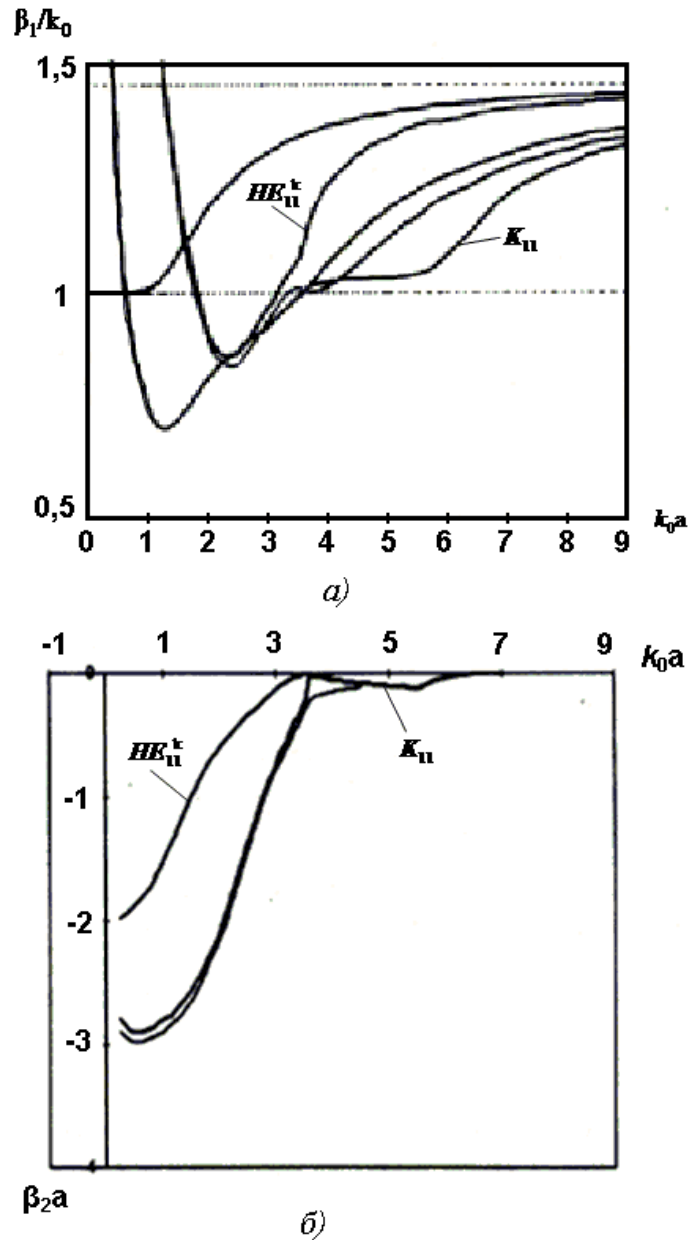


Рис. 3. Дисперсионные характеристики волн ОДВ с параметрами: $\varepsilon_1 = 2,129$; $\varepsilon_2 = 1$

Чтобы приблизить постановку задачи к реальным условиям, введем во внешней области потери, то есть запишем $\varepsilon_2 = \varepsilon_0 (1 - i \operatorname{tg} \delta)$. Из рис. 4 видно, что при $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ дисперсионная характеристика волны HE_{11}^k переходит в характеристику волны HE_{12} , в результате чего волна HE_{11}^k как таковая перестает существовать. Обнаруженный эффект с математической точки зрения можно объяснить, используя уравнение (7) для внешней области ОДВ. Из него следует

$$\gamma_2 \delta_2 = -\beta_1 \beta_2 / 2 k_2 \operatorname{tg} \delta . \quad (12)$$

Поскольку $\beta_2 < 0$, при определенном значении $\operatorname{tg} \delta$ правая часть (12) обращается в нуль и далее с ростом $\operatorname{tg} \delta$ становится отрицательной. При этом, поскольку $\gamma_2 > 0$, для выполнения равенства (12) должно быть: $\delta_2 < 0$, то есть несобственная комплексная волна исчезает. Для волны K_{11} отмеченный эффект не наблюдается.

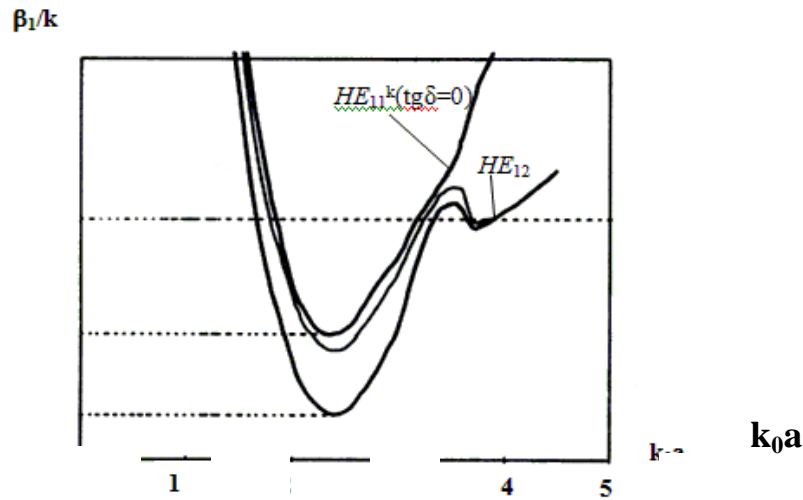


Рис. 4. Трансформация волны HE_{11}^k в волну HE_{12} при введении потерь

Все отмеченные эффекты наблюдаются также для несимметричных волн при $m=2$. При определенном значении $\text{tg}\delta$ характеристика волны HE_{12}^k при $\beta_1 = k_0$ переходит в характеристику волны HE_{13} . На характеристику волны K_{12} введение потерь в окружающей ОДВ области качественного влияния не оказывает.

Таким образом, на основании изложенного можно сделать следующие выводы. Во-первых, при введении потерь во внешней области волны типа HE_{1m}^k исчезают, а у характеристик волн $HE_{1,m+1}$ возникают продолжения в виде вытекающих волн, то есть они становятся подобными характеристикам волн EH_{1m} . Во-вторых, если в краевой задаче для ОДВ не накладывается нулевое граничное условие на бесконечности среди решений дисперсионного уравнения существуют явно нефизичные (волна K_{1m}). В-третьих, по-видимому, модель ОДВ, находящегося в среде с потерями, наиболее хорошо соответствует физической реальности. Например, волоконные световоды, используемые в технике оптической связи, имеют защитное полимерное покрытие, которое является для инфракрасного излучения слабопрозрачной средой. Сложность заключается в установлении критерия: каким брать значение $\text{tg}\delta$ для установления перехода поверхностных волн $HE_{1,m+1}$ в вытекающие.

4. Круглый ДВ, помещенный в диссипативную среду

Рассмотрим изменение характеристик комплексных волн круглого диэлектрического волновода при введении потерь в окружающей среде.

Волны в круглом регулярном диэлектрическом волноводе (ДВ), в общем случае это может быть многослойный волновод, описываются решениями краевой задачи, состоящей из уравнения Гельмгольца:

$$\Delta u + k^2 u = 0 \tag{13}$$

и граничного условия

$$\alpha \frac{\partial u}{\partial n} + \gamma u = f|_L, \tag{14}$$

где контур L соответствует внешней границе направляющей структуры; n - нормаль к этому контуру, лежащая в плоскости поперечного сечения; под функцией u подразумеваются продольные компоненты электрического и магнитного полей, связанные между собой в гибридной волне (в волне, имеющей азимутальную зависимость поля) дисперсионным уравнением.

Без нарушения общности в (14) можно полагать $\alpha = 1$ (действительно, все граничное условие можно разделить на постоянную α). Тогда любые две функции u_m и u_k , являющиеся решениями краевой задачи (13), (14), будут удовлетворять уравнению

$$(k_k^2 - k_m^2) \int_S u_m u_k ds = \int_L \left[u_k \left(\frac{\partial u_m}{\partial n} + \gamma u_m \right) - u_m \left(\frac{\partial u_k}{\partial n} + \gamma u_k \right) \right] dl, \quad (15)$$

вытекающему из формулы Грина [17]. В формуле (15) k_m и k_k - поперечные волновые числа, являющиеся решениями дисперсионного уравнения и связывающие в неявном виде электрические и магнитные потенциальные функции гибридной волны.

С учетом того, что поперечное сечение рассматриваемой направляющей структуры состоит из двух областей, уравнение (15) можно переписать в виде

$$\begin{aligned} & (k_{1k}^2 - k_{1m}^2) \int_{S1} u_m^{(1)} u_k^{(1)} ds + (k_{2k}^2 - k_{2m}^2) \int_{S2} u_m^{(2)} u_k^{(2)} ds = \\ & = \int_L \left[u_k \left(\frac{\partial u_m}{\partial n} + \gamma u_m \right) - u_m \left(\frac{\partial u_k}{\partial n} + \gamma u_k \right) \right] dl. \end{aligned} \quad (16)$$

Решения дисперсионного уравнения волн открытого ДВ могут соответствовать двум вариантам граничного условия (14) на контуре L , удаленном в бесконечность: $f=0$; $f \neq 0$. В структуре без диссипации энергии первый вариант соответствует поверхностным и собственным комплексным волнам, второй - вытекающим и медленным несобственным комплексным волнам [20]. В первом случае правая часть уравнения (16) обращается в нуль, во втором, поскольку на контуре L , удаляемом в бесконечность, $f \rightarrow \infty$, в правой части (16) получается расходящийся интеграл. Представляет интерес рассмотрение записи уравнения (16) для волн ДВ, помещенного в диссипативную среду.

В работах [25, 26] показано, что в точках, соответствующих критическим частотам поверхностных волн, в круглом ДВ возникают вытекающие волны, которые с уменьшением частоты при определенных параметрах волновода переходят в собственные комплексные волны. Последние в свою очередь при дальнейшем уменьшении частоты вновь переходят сначала в вытекающие, а затем в медленные несобственные волны. Таким образом, в определенных точках частотного диапазона происходит как бы стыковка решений однородной и неоднородной краевых задач.

В слабонаправляющих световодах спектр волн оболочки практически совпадает со спектром указанных комплексных волн однослойного круглого ДВ. Поскольку оболочка световода, как правило, ограничена чехлом, представляет интерес исследование характеристик комплексных волн ДВ, помещенного в диссипативную среду с достаточно большим значением тангенса угла диэлектрических потерь ($\text{tg} \delta$).

При решении различных дифракционных задач, связанных с расчетом полей на неоднородностях диэлектрических волноводов (в частности, световодов), возникает вопрос об учете вытекающих волн, диапазоны существования которых перекрываются с диапазонами поверхностных волн. Для этого необходима информация об особенностях их распространения при наличии поглощения в среде.

Дисперсионное уравнение волн круглого ДВ (2) решается совместно с уравнениями (6) и (7), связывающими волновые числа, которые в общем случае являются комплексными величинами. При расчетах полагали, что входящая в дисперсионное уравнение (2) диэлектрическая проницаемость среды, в которой находится ДВ, является комплексной величиной: $\varepsilon_2 = \varepsilon_2' - i\varepsilon_2''$.

На рис. 5 приведены дисперсионные характеристики (зависимости продольного волнового числа $\beta = \beta_1 + i\beta_2$ от частоты $k_0 a$) волны EH_{11} круглого ДВ при различных значениях диэлектрической проницаемости ε_2 окружающей среды. Всем характеристикам соответствует значение $\varepsilon_1 = 18$. Внутренний слой (сам ДВ) считаем недиссипативным. Кривая 1 соответствует $\varepsilon_2'' = 0$.

Как видно из рисунка, наличие потерь в окружающей среде приводит к качественным изменениям в поведении дисперсионных характеристик. Точки перехода поверхностных

волн в вытекающие смещаются в более низкочастотный диапазон. При этом, как иллюстрирует кривая 3 ($\varepsilon_2 = 1,0 - i 2,0$), при понижении частоты в начальном участке диапазона своего существования вытекающая волна может переходить в медленную несобственную. При не очень большом поглощении характеристики собственных комплексных волн и диапазон их существования мало отличаются, от характеристик в случае $\varepsilon_2'' = 0$. Однако уже при $\varepsilon_2'' = 4,0$ наблюдается качественное изменение: собственная комплексная волна не переходит при понижении частоты в вытекающую, а продолжает свое существование во всем нижнем участке частотного диапазона (кривая 5).

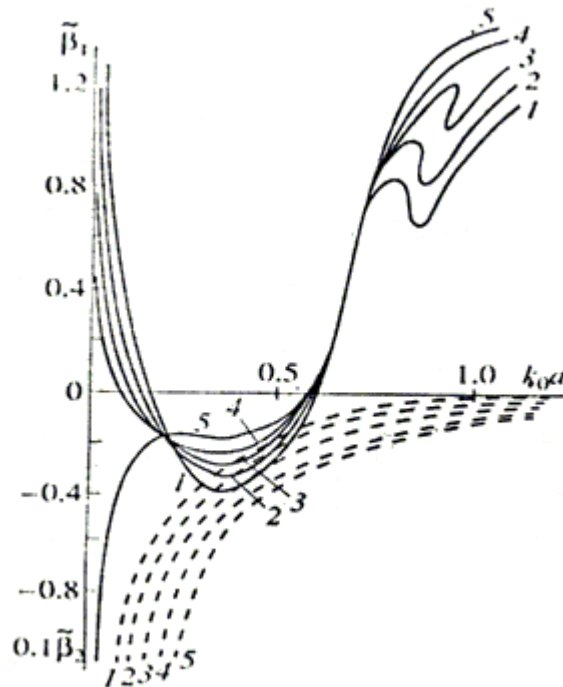


Рис. 5. Дисперсионные характеристики затухания волны EH_{11} круглого ДВ при $\xi_1 = 18,0$.

Кривые 1-5 соответствуют значениям $\varepsilon_2'' = 0; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0$. Сплошные линии - $\tilde{\beta}_1 = \beta_1 / k_0$, штриховые линии - $\tilde{\beta}_2 = \beta_2 / k_0$

На рис. 6 показано поведение поперечного волнового числа k_2 внешней области, соответствующего характеристикам, изображенным на рис. 5. Как видно из рисунка, с увеличением $\text{tg } \delta$ окружающей среды относительный диапазон существования вытекающей волны с нарастающим в радиальном направлении полем уменьшается. Так, при $\varepsilon_2'' = 1,0$ указанный диапазон составляет 60 % от всего диапазона существования вытекающей волны, 40 % при $\varepsilon_2'' = 2,0$; 30 % при $\varepsilon_2'' = 3,0$; при $\varepsilon_2'' = 4,0$ диапазон вытекающих волн исчезает совсем.

На рис. 7 приведены дисперсионные характеристики и характеристики затухания вытекающей волны EH_{11} волоконного световода из кварцевого стекла с $\varepsilon_1 = 2,127$ ($n_1 \approx 1,46$ на $\lambda = 0,589$ мкм). На рис. 8 показано поведение поперечных волновых чисел k_2 , соответствующих этим характеристикам.

Как видно из рис. 7, при небольших значениях ε_1 качественный характер кривых $\beta(k_0 a)$, показанных на рис. 5, при изменении ε_2'' сохраняется, исчезает лишь частотная область существования собственных комплексных волн вследствие того, что при малом параметре $\varepsilon_1 / \varepsilon_2'$ дифракционные явления на криволинейной границе раздела сред слабо выражены и встречные потоки мощности, приводящие к возникновению собственных комплексных волн, не образуются. В этом случае при понижении частоты вытекающие волны переходят непосредственно в медленные несобственные. В поведении поперечных волновых чисел проявля-

ется уже отмеченная ранее закономерность: с увеличением $\text{tg } \delta$ относительный диапазон существования вытекающей волны с нарастающим в радиальном направлении полем уменьшается. Так, при $\varepsilon_2''=0,5$ этот диапазон составляет $\sim 65\%$ от всего диапазона существования вытекающей волны, $\sim 40\%$ при $\varepsilon_2''=1,0$; $\sim 20\%$ при $\varepsilon_2''=2,0$.

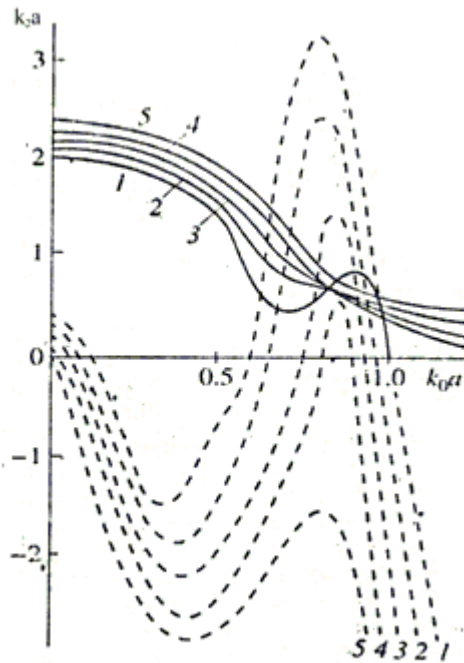


Рис. 6. Частотные зависимости поперечного волнового числа k_2 волны EH_{11} круглого ДВ при $\tilde{\varepsilon}_1=18,0$ в области П: сплошные линии – $\text{Re}(k_2 a)$; штриховые – $\text{Im}(k_2 a)$

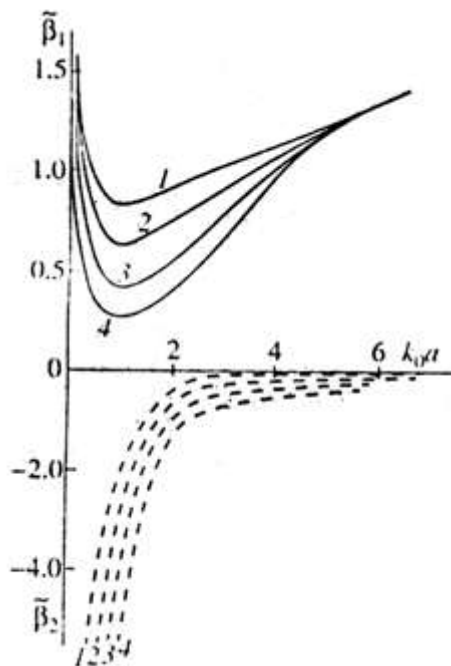


Рис. 7. Дисперсионные характеристики и характеристики затухания волны EH_{11} волоконного световода при $\tilde{\varepsilon}_1=2,127$. Кривые 1-4 соответствуют значениям $\tilde{\varepsilon}_2''=0; 0,5; 1,0; 2,0$: сплошные линии – для $\tilde{\beta}_1$; штриховые – для $\tilde{\beta}_2$

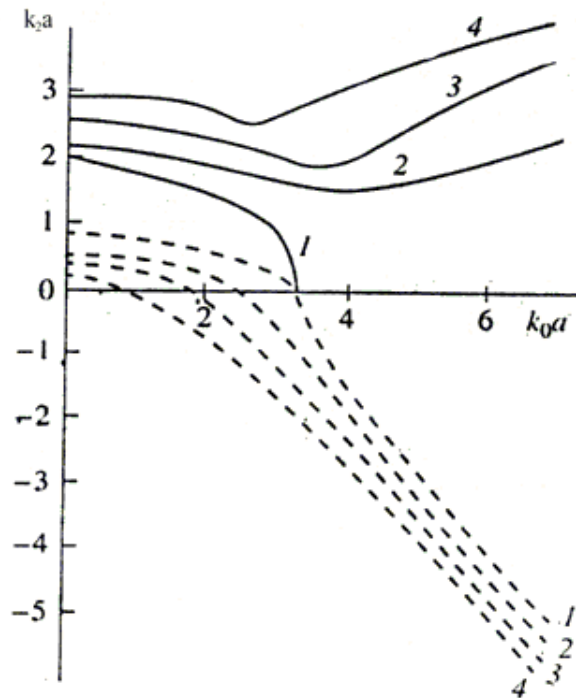


Рис. 8 Частотные зависимости поперечного волнового числа k_2 волны EH_{11} волоконного световода с $\xi_1=2,127$ в области II: сплошные линии – $\text{Re}(k_2a)$; штриховые – $\text{Im}(k_2a)$

Таким образом, можно сделать вывод, что при помещении ДВ в диссипативную среду его комплексные волны приобретают новые свойства. В частности, вытекающие волны в значительной части диапазона своего существования, а при больших $\text{tg } \delta$ и во всем диапазоне имеют экспоненциально спадающее в радиальном направлении поле. В этом случае на контуре L , удаленном в бесконечность, $f=0$, в результате чего краевая задача становится однородной, а уравнение (16), записанное для собственных функций вытекающих волн, приводит к условию ортогональности последних:

$$\int_{S_1} u_m^{(1)} u_k^{(1)} ds + \int_{S_2} u_m^{(2)} u_k^{(2)} ds = \begin{cases} 0, m \neq k, \\ N_m, m = k, \end{cases} \quad (17)$$

где u_m и u_k - либо электрические, либо магнитные продольные компоненты поля гибридной волны, связанные между собой граничными условиями при $r=a$, из которых получается дисперсионное уравнение (2). Поперечные волновые числа, на которых определены эти потенциальные функции, находятся из совместного решения уравнений (2), (6) и (7). Амплитудные коэффициенты продольных компонент полей областей I и II в (17) связаны граничными условиями при $r=a$.

Выполнение условия (17) при решении дифракционных задач проекционными методами позволяет включать вытекающие волны в базис, по которому производится разложение дифракционного поля.

Отметим, что при наличии в окружающей среде диссипации энергии все свойства вытекающих волн (основное - это быстрые волны) сохраняются, однако их поле в значительном (или во всем) диапазоне частот становится экспоненциально убывающим при удалении от ДВ. При этом поперечные волновые числа для внешней области оказываются преимущественно в четвертом квадранте комплексной плоскости k_2 (рис. 6, 8).

Библиографический список

1. **Вайнштейн, Л.А.** Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн. – М.: Радио и связь, 1988.
2. **Каценеленбаум, Б.З.** Высокочастотная электродинамика / Б.З. Каценеленбаум. – М.: Наука, 1966.

3. **Взятышев, В.Ф.** Диэлектрические волноводы / В.Ф. Взятышев. – М.: Советское радио, 1970.
4. Интегральная оптика / под ред. Т. Тамира. – М.: Мир, 1978.
5. **Семенов, Н.А.** Оптические кабели связи. Теория и расчет/ Н.А.Семенов. – М.: Радио и связь, 1981.
6. **Унгер, Х.Г.** Планарные и волоконные оптические волноводы / Х.Г.Унгер. – М.: Мир, 1988.
7. **Гроднев, И.И.,** Оптические кабели / И.И. Гроднев, Ю.Т. Ларин, И.И. Теумин. – М.: Энергоиздат, 1991.
8. Волоконно-оптические системы передачи: учебник для вузов / М.М. Бутусов [и др.]; под ред. В.Н.Гомзина. – М.: Радио и связь, 1992.
9. **Беланов, А.С.** Трехслойные волноводы для широкополосных оптических линий связи // Изв. АН СССР. Сер. Физическая, 1978. Т. 42. № 12. С. 1522-1533.
10. **Адамс, М.** Введение в теорию оптических волноводов / М.Адамс. – М.:Мир, 1984.
11. Введение в интегральную оптику / под ред. М.Барноски.– М.:Мир, 1977.
12. **Маркузе, Д.** Оптические волноводы / Д.Маркузе. – М.: Мир, 1974.
13. **Теумин, И.И.** Волноводы оптической связи / И.И. Теумин. – М.: Связь, 1988.
14. **Чео, П.К.** Волоконная оптика / П.К. Чео. – М.: Энергоиздат, 1988.
15. **Семенов, А.С** Интегральная оптика для систем передачи и обработки информации/ А.С. Семенов, В.А. Смирнов, А.В. Шмалько. – М.: Радио и связь, 1990.
16. **Шевченко, В.В.** Плавные переходы в открытых волноводах / В.В.Шевченко. – М.: Наука, 1969.
17. **Маделунг, Э.** Математический аппарат физики / Э. Маделунг. – М.: Гос. изд-во физико-математической литературы, 1961.
18. **Arnbak J.Leaky Waves an Dielectric Road** // Electronics Letts, 1969. V. 5. № 3. P. 41-42.
19. **Веселов, Г.И.** Слоистые металло-диэлектрические волноводы / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский. – М.: Радио и связь, 1988.
20. **Шевченко, В.В.** Наглядная классификация волн, направляемых регулярными открытыми волноводами // Радиотехника и электроника, 1969. Т. 12. №10. С. 36-49.
21. **Мурад-Мурадович, А.Н.** О комплексных волнах высших типов круглого диэлектрического волновода // Радиотехника и электроника, 1995. Т. 40. №9. С. 1359-1361.
22. **Раевский, А.С.** Волны HE и EH круглого диэлектрического волновода // Радиотехника и электроника, 1999. Т.44. №5. С. 517-519.
23. **Каценеленбаум, Б.З.** Возбуждение диэлектрического волновода произвольного сечения при частоте, близкой к критической / Б.З. Каценеленбаум // Радиотехника и электроника, 1980. Т. 25. №2. С. 241-246.
24. **Бритов, И.Е.** О характеристиках несимметричных волн открытого диэлектрического волновода вблизи критических частот / И.Е. Бритов, А.С. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы, 1999. Т. 2. № 2. С. 33-36.
25. **Гетманцева, Т.Н.** О комплексных волнах в круглом диэлектрическом волноводе / Т.Н. Гетманцева, С.Б. Раевский // Изв. вузов. СССР. Радиофизика, 1978. Т. 21. № 9. С. 1332-1337.
26. **Веселов, Г.И.** Комплексные волны круглого диэлектрического волновода / Г.И. Веселов, С.Б. Раевский // Радиотехника и электроника. 1983. Т. 28. № 2. С. 230-236.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

A.S. Raevsky, S.B. Raevsky, O.V. Uskov

THE WAVE SPECTRUM OF CIRCULAR OPEN LAYERED DIELECTRIC WAVEGUIDE

By the theory of not self-adjoint operators is formulated boundary problem for a circular open dielectric waveguide. The full wave spectrum, including the proper and improper complex wave (CW). is considered. The special emphasis is placed for the characteristics of waves associated with not self-adjoint electrodynamics operators.

Key words: circular open dielectric waveguide, the wave spectrum, proper and improper complex waves.

УДК 535.8+621.373.826

А.А. Денисенко¹, А.В. Назаров², Е.А. Попов³**БЫСТРЫЕ ВОЛНЫ КРУГЛОГО ВОЛНОВОДА С ДВУМЯ СЕКТОРИАЛЬНЫМИ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИМИ ВСТАВКАМИ**Горьковский региональный центр связи нижегородской дирекции связи ОАО «РЖД»¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
ООО «Теком»³

Рассмотрен круглый волновод с двумя симметрично расположенными диэлектрическими вставками в виде частично заполненных секторов. Приведена постановка краевой задачи на основе модифицированного метода Галёркина, описана процедура составления дисперсионного уравнения, представлены дисперсионные и энергетические характеристики нескольких быстрых волн структуры.

Ключевые слова: быстрая волна, метод Галёркина, уравнения Максвелла, дисперсионная характеристика, ряд Фурье.

Рассмотрим круглый волновод радиусом a с двумя симметрично расположенными диэлектрическими вставками в виде частично заполненных секторов (рис. 1). Диэлектрическая проницаемость заполнения волновода при этом будет являться функцией радиальной и азимутальной координат цилиндрической системы: $\varepsilon = \varepsilon(r, \varphi)$.

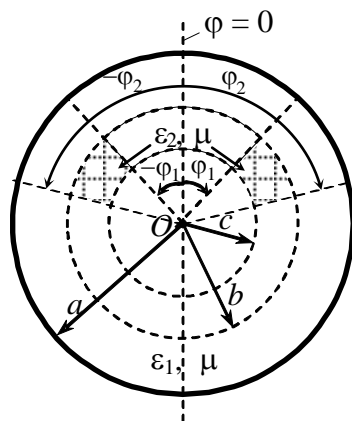


Рис. 1. Круглый волновод с двумя симметрично расположенными диэлектрическими вставками в виде частично заполненных секторов

Диэлектрическая проницаемость среды, находящейся за пределами вставок, равна ε_1 . Магнитная проницаемость всюду одинакова: $\mu = \mu_0$. Внутренний и внешний радиусы диэлектрических вставок с проницаемостью ε_2 равны c и b соответственно. Расстоянию между секторами соответствует угол $2\varphi_1$. Каждому сектору соответствует угол, равный $(\varphi_2 - \varphi_1)$.

Представим функцию $\varepsilon = \varepsilon(r, \varphi)$ в виде

$$\varepsilon(r, \varphi) = \varepsilon_1 + (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)P(r)\Phi(\varphi),$$

$$\text{где } P(r) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < r < c \text{ и } b < r < a; \\ 1 & \text{при } c < r < b, \end{cases}$$

$$\Phi(\varphi) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 < \varphi < \varphi_1, \varphi_2 < \varphi < (2\pi - \varphi_2) \text{ и } (2\pi - \varphi_1) < \varphi < 2\pi; \\ 1 & \text{при } \varphi_1 < \varphi < \varphi_2 \text{ и } (2\pi - \varphi_2) < \varphi < (2\pi - \varphi_1). \end{cases}$$

Графики функций $P(r)$ и $\Phi(\varphi)$ приведены на рис. 2 и рис. 3 соответственно.

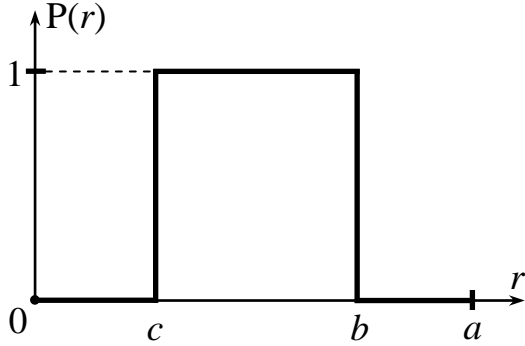


Рис. 2. Вид функции $P(r)$

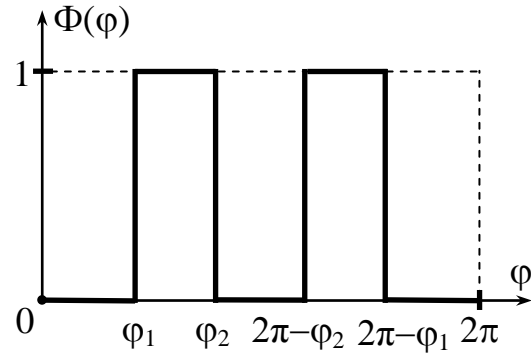


Рис. 3. Вид функции $\Phi(\varphi)$

Электродинамический анализ рассматриваемой направляющей структуры проведем, заменив ее круглым волноводом с градиентным диэлектрическим заполнением, для которого функция $\varepsilon = \varepsilon(r, \varphi)$ является непрерывной. Для этого разложим функции $P(r)$ и $\Phi(\varphi)$ в ряды Фурье:

$$P(r) = \frac{b-c}{a} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi j} \left[\sin\left(\pi j \frac{b}{a}\right) - \sin\left(\pi j \frac{c}{a}\right) \right] \cos\left(\pi j \frac{r}{a}\right); \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \Phi(\varphi) = & \frac{\pi - \varphi_1}{\pi} + \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi j} \left[\sin\left(j \frac{2\pi - \varphi_1}{2}\right) - \sin\left(j \frac{\varphi_1}{2}\right) \right] \cos\left(j \frac{\varphi}{2}\right) - \\ & - \frac{\pi - \varphi_2}{\pi} - \sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{\pi j} \left[\sin\left(j \frac{2\pi - \varphi_2}{2}\right) - \sin\left(j \frac{\varphi_2}{2}\right) \right] \cos\left(j \frac{\varphi}{2}\right). \end{aligned}$$

Задачу о распространении электромагнитных волн вдоль круглого волновода с градиентным диэлектрическим заполнением решим модифицированным методом Галёркина (ММГ) [1].

Пусть в структуре, изображенной на рис. 1, в положительном направлении оси Oz распространяется монохроматическая электромагнитная волна частоты ω , напряженности электрического и магнитного полей которой имеют зависимость от времени t и координаты z вида $\exp[i(\omega t - \beta z)]$, где β – продольное волновое число. Тогда из уравнений Максвелла, обобщающих закон электромагнитной индукции и опытные факты происхождения вихревого магнитного поля, получаем следующие соотношения, связывающие поперечные составляющие напряженностей электрического и магнитного полей с их продольными составляющими:

$$\begin{aligned} E_r &= -\frac{i\beta}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{i\omega\mu}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi}; \\ E_\varphi &= -\frac{i\beta}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} + \frac{i\omega\mu}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial H_z}{\partial r}; \\ H_r &= \frac{i\omega\varepsilon}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \varphi} - \frac{i\beta}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial H_z}{\partial r}; \\ H_\varphi &= -\frac{i\omega\varepsilon}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial E_z}{\partial r} - \frac{i\beta}{\varepsilon\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial \varphi}. \end{aligned} \quad (2)$$

Полагая, что в плоскости $\varphi = 0$ находится магнитная стенка (рассматриваемая структу-

ра симметрична относительно плоскости $\varphi = 0$), продольные составляющие электрического и магнитного полей представляем в виде:

$$E_z = \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} J_n(\alpha_{nm} r) \cos(n\varphi) e^{-i\beta z}; \quad (3)$$

$$H_z = \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} J_n(\kappa_{nk} r) \sin(n\varphi) e^{-i\beta z}, \quad (4)$$

где A_{nm} и B_{nk} – неизвестные амплитудные коэффициенты, α_{nm} и κ_{nk} находятся из уравнений $J_n(\alpha_{nm} a) = 0$ и $J'_n(\kappa_{nk} a) = 0$ соответственно.

Для поперечных составляющих полей получаем:

$$\begin{aligned} E_r &= -i \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} \frac{\beta}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \alpha_{nm} J'_n(\alpha_{nm} r) \cos(n\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} \frac{\omega \mu}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \frac{n}{r} J_n(\kappa_{nk} r) \cos(n\varphi) \right\} e^{-i\beta z}; \\ E_\varphi &= i \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} \frac{\beta}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \frac{n}{r} J_n(\alpha_{nm} r) \sin(n\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} \frac{\omega \mu}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \kappa_{nk} J'_n(\kappa_{nk} r) \sin(n\varphi) \right\} e^{-i\beta z}; \\ H_r &= -i \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} \frac{\omega \varepsilon(r, \varphi)}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \frac{n}{r} J_n(\alpha_{nm} r) \sin(n\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} \frac{\beta}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \kappa_{nk} J'_n(\kappa_{nk} r) \sin(n\varphi) \right\} e^{-i\beta z}; \\ H_\varphi &= -i \left\{ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} \frac{\omega \varepsilon(r, \varphi)}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \alpha_{nm} J'_n(\alpha_{nm} r) \cos(n\varphi) + \right. \\ &\quad \left. + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} \frac{\beta}{\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2} \frac{n}{r} J_n(\kappa_{nk} r) \cos(n\varphi) \right\} e^{-i\beta z}, \end{aligned}$$

где штрих означает производную функции Бесселя по всему аргументу.

Подставив выражения для составляющих электрического и магнитного полей в неиспользованные ранее соотношения, следующие из уравнений Максвелла:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r E_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \varphi} &= -i \omega \mu H_z; \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r H_\varphi) - \frac{1}{r} \frac{\partial H_r}{\partial \varphi} &= i \omega \varepsilon E_z, \end{aligned}$$

приходим к системе функциональных уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} f_{nm}^{(1)}(r, \varphi) + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} f_{nk}^{(2)}(r, \varphi) = 0; \\ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M A_{nm} f_{nm}^{(3)}(r, \varphi) + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K B_{nk} f_{nk}^{(4)}(r, \varphi) = 0, \end{cases} \quad (5)$$

$$\text{где } f_{nm}^{(1)}(r, \varphi) = - \frac{\beta \mu \omega^2}{[\varepsilon(r, \varphi) \mu \omega^2 - \beta^2]^2} \left\{ \frac{n}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} J_n(\alpha_{nm} r) \sin(n\varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial \varepsilon}{\partial \varphi} \alpha_{nm} J'_n(\alpha_{nm} r) \cos(n\varphi) \right\},$$

$$\begin{aligned}
 f_{nk}^{(2)}(r, \varphi) &= -\frac{\omega\mu}{\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2} \left[\kappa_{nk}^2 J_n(\kappa_{nk}r) + \frac{\mu\omega^2}{\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial\varepsilon}{\partial r} \kappa_{nk} J_n'(\kappa_{nk}r) \right] \sin(n\varphi) + \\
 &+ \omega\mu J_n(\kappa_{nk}r) \sin(n\varphi) - \frac{\mu^2\omega^3}{[\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2]^2} \frac{n}{r^2} \frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi} J_n(\kappa_{nk}r) \cos(n\varphi); \\
 f_{nm}^{(3)}(r, \varphi) &= -\frac{\omega}{\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2} \left[\varepsilon(r, \varphi)\alpha_{nm}^2 J_n(\alpha_{nm}r) + \frac{\beta^2}{\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2} \frac{\partial\varepsilon}{\partial r} \alpha_{nm} J_n'(\alpha_{nm}r) \right] \cos(n\varphi) + \\
 &+ \omega\varepsilon(r, \varphi) J_n(\alpha_{nm}r) \cos(n\varphi) + \frac{\omega\beta^2}{[\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2]^2} \frac{n}{r^2} \frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi} J_n(\alpha_{nm}r) \sin(n\varphi); \\
 f_{nk}^{(4)}(r, \varphi) &= \frac{\beta\mu\omega^2}{[\varepsilon(r, \varphi)\mu\omega^2 - \beta^2]^2} \left\{ -\frac{n}{r} \frac{\partial\varepsilon}{\partial r} J_n(\kappa_{nk}r) \cos(n\varphi) + \frac{1}{r} \frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi} \kappa_{nk} J_n'(\kappa_{nk}r) \sin(n\varphi) \right\}; \\
 \frac{\partial\varepsilon}{\partial r} &= (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)\Phi(\varphi) \frac{dP}{dr}; \\
 \frac{dP}{dr} &= -\sum_{j=1}^{\infty} \frac{2}{a} \left[\sin\left(\pi j \frac{b}{a}\right) - \sin\left(\pi j \frac{c}{a}\right) \right] \cos\left(\pi j \frac{r}{a}\right); \\
 \frac{\partial\varepsilon}{\partial\varphi} &= (\varepsilon_2 - \varepsilon_1)P(r) \frac{d\Phi}{d\varphi}; \\
 \frac{d\Phi}{d\varphi} &= \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\pi} \left[\sin\left(j \frac{2\pi - \varphi_2}{2}\right) - \sin\left(j \frac{\varphi_2}{2}\right) \right] \sin\left(j \frac{\varphi}{2}\right) - \\
 &- \sum_{j=1}^{\infty} \frac{1}{\pi} \left[\sin\left(j \frac{2\pi - \varphi_1}{2}\right) - \sin\left(j \frac{\varphi_1}{2}\right) \right] \sin\left(j \frac{\varphi}{2}\right).
 \end{aligned}$$

Умножаем первое уравнение системы (5) на $rJ_{\bar{n}}(\kappa_{\bar{n}\bar{k}}r)\sin(\bar{n}\varphi)$, второе уравнение – на $rJ_{\bar{n}}(\alpha_{\bar{n}\bar{m}}r)\cos(\bar{n}\varphi)$, где $\kappa_{\bar{n}\bar{k}}$ и $\alpha_{\bar{n}\bar{m}}$ находятся из уравнений $J_{\bar{n}}'(\kappa_{\bar{n}\bar{k}}a) = 0$ и $J_{\bar{n}}(\alpha_{\bar{n}\bar{m}}a) = 0$ соответственно; $\bar{n} = 0, 1, 2, \dots, N$; $\bar{k} = 1, 2, 3, \dots, K$; $\bar{m} = 1, 2, 3, \dots, M$, и интегрируем полученные соотношения по $r \in [0; a]$ и $\varphi \in [0; 2\pi]$. В результате получаем систему линейных однородных алгебраических уравнений (СЛАУ) относительно неизвестных амплитудных коэффициентов A_{nm} и B_{nk} :

$$\begin{cases} \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M a_{nm}^{\bar{n}\bar{k}} A_{nm} + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K b_{nk}^{\bar{n}\bar{k}} B_{nk} = 0; \\ \sum_{n=0}^N \sum_{m=1}^M c_{nm}^{\bar{n}\bar{m}} A_{nm} + \sum_{n=0}^N \sum_{k=1}^K d_{nk}^{\bar{n}\bar{m}} B_{nk} = 0, \end{cases} \quad (6)$$

где $a_{nm}^{\bar{n}\bar{k}} = \int_0^a \int_0^{2\pi} r f_{nm}^{(1)}(r, \varphi) J_{\bar{n}}(\kappa_{\bar{n}\bar{k}}r) \sin(\bar{n}\varphi) dr d\varphi$, $b_{nk}^{\bar{n}\bar{k}} = \int_0^a \int_0^{2\pi} r f_{nk}^{(2)}(r, \varphi) J_{\bar{n}}(\kappa_{\bar{n}\bar{k}}r) \sin(\bar{n}\varphi) dr d\varphi$;

$c_{nm}^{\bar{n}\bar{m}} = \int_0^a \int_0^{2\pi} r f_{nm}^{(3)}(r, \varphi) J_{\bar{n}}(\alpha_{\bar{n}\bar{m}}r) \cos(\bar{n}\varphi) dr d\varphi$, $d_{nk}^{\bar{n}\bar{m}} = \int_0^a \int_0^{2\pi} r f_{nk}^{(4)}(r, \varphi) J_{\bar{n}}(\alpha_{\bar{n}\bar{m}}r) \cos(\bar{n}\varphi) dr d\varphi$.

Условие нетривиальности решений СЛАУ (6) дает дисперсионное уравнение (ДУ) волн круглого волновода с двумя симметрично расположенными диэлектрическими вставками в виде частично заполненных секторов:

$$\det U = 0, \quad (7)$$

где U – матрица СЛАУ (6).

Для проверки корректности работы программы поиска корней ДУ (7) были выполнены предельные переходы от круглого волновода с двумя секториальными диэлектрическими

вставками к круглому однородно заполненному волноводу ($\varepsilon_2 \rightarrow \varepsilon_1 = \varepsilon_0$, $a = 30$ мм) и к круглому волноводу с аксиальной диэлектрической трубкой, внутренний и внешний радиусы которой равны c и b соответственно ($\varphi_1 \rightarrow 0$, $\varphi_2 \rightarrow \pi$, $a = 30$ мм, $b = 6$ мм, $c = 3$ мм, $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$, $\varepsilon_2 = 2,2\varepsilon_0$).

В табл. 1 приведены результаты исследования предельного перехода к круглому однородно заполненному волноводу (КВ). Как видно из таблицы, относительное отклонение корней ДУ (7) от точных значений [2] коэффициентов замедления $\beta/\omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$ волн КВ не превышает 1%.

Таблица 1

Значения корней ДУ волн КВ

	Волна КВ		
	H_{11}	E_{01}	E_{11}
$f = 3$ ГГц			
Точное решение	0,2396		
ММГ	0,2406		
$f = 4$ ГГц			
Точное решение	0,6886	0,3091	
ММГ	0,6891	0,3065	
$f = 5$ ГГц			
Точное решение	0,8167	0,6517	
ММГ	0,8172	0,6491	
$f = 6$ ГГц			
Точное решение	0,8785	0,7769	
ММГ	0,8791	0,7740	
$f = 7$ ГГц			
Точное решение	0,9138	0,8434	0,5019
ММГ	0,9144	0,8404	0,4987
$f = 8$ ГГц			
Точное решение	0,9359	0,8839	0,6554
ММГ	0,9367	0,8809	0,6525

На рис. 4 представлены дисперсионные характеристики трех быстрых волн круглого волновода с аксиальной диэлектрической трубкой, полученные методом частичных областей (пунктирные линии) и на основе ММГ (сплошные линии). Здесь $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}$.

Как видно из рис. 4, для первой (по порядку следования критических частот) волны структуры имеет место расхождение результатов, полученных методом частичных областей (точные решения) и на основе ММГ, в то время как для двух следующих волн корни ДУ (7), полученные при выполнении предельного перехода, крайне мало отличаются от точных решений. Исследования показали, что расхождение результатов для первой волны можно уменьшить, подобрав соответствующим образом число слагаемых, учитываемых в разложениях (1), (3) и (4). Так, например, в (3) и (4) достаточно взять $N = M = K = 3$, в разложениях (1) функций $P(r)$ и $\Phi(\varphi)$, описывающих зависимость диэлектрической проницаемости заполнения волновода от радиальной и азимутальной координат, следует учитывать $G = 50$ и $S = 100$ слагаемых соответственно.

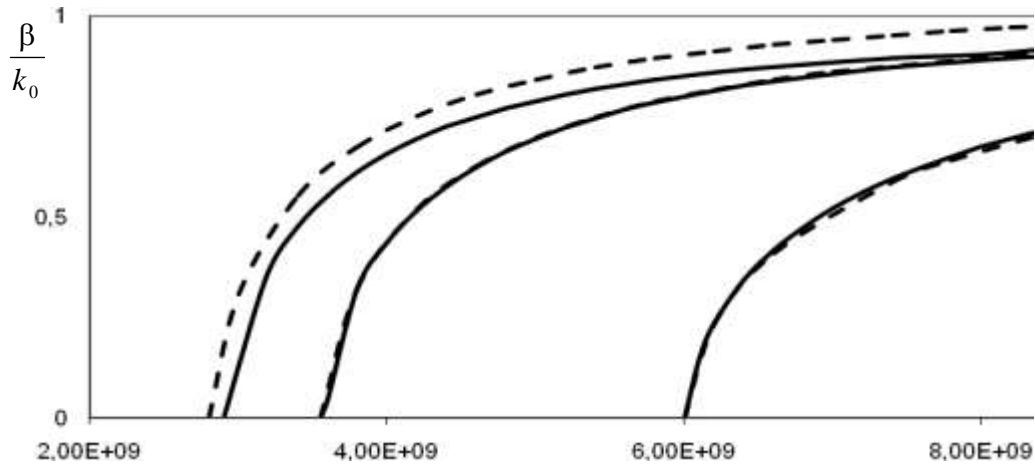


Рис. 4. Дисперсионные характеристики волн круглого волновода с аксиальной диэлектрической трубкой

На рис. 5 представлен вид функции диэлектрической проницаемости $\varepsilon(r, \varphi)$ при $G = 50$ и $S = 100$ для круглого волновода с двумя симметрично расположенными диэлектрическими вставками в виде частично заполненных секторов с параметрами: $a = 30$ мм, $b = 20$ мм, $c = 10$ мм, $\varphi_1 = \pi/6$, $\varphi_2 = \pi/3$, $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$, $\varepsilon_2 = 2,2\varepsilon_0$, $\mu = \mu_0$.

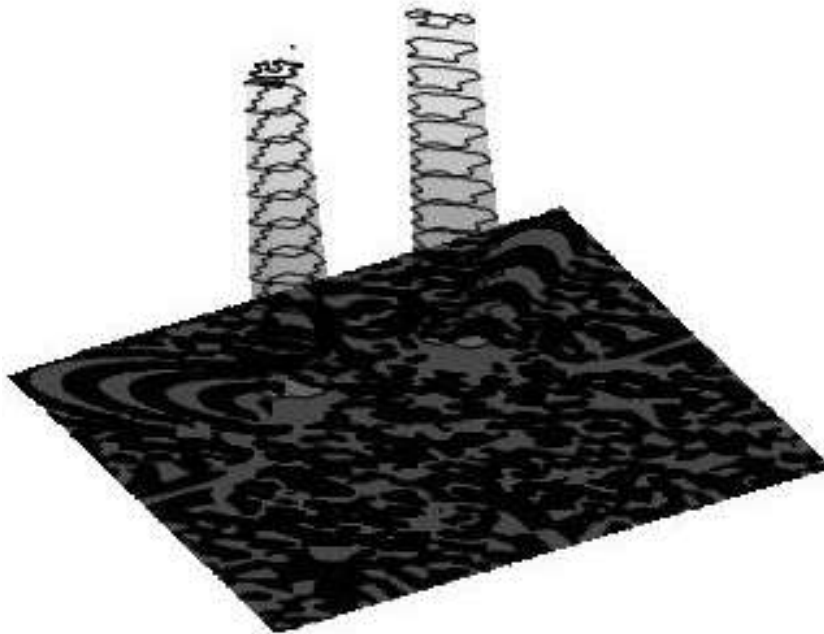


Рис. 5. Вид функции $\varepsilon(r, \varphi)$

На рис. 6 приведены дисперсионные характеристики первых трёх (по порядку следования критических частот) быстрых волн рассматриваемого волновода, а также картины распределения продольной составляющей плотности потока мощности в поперечном сечении структуры.

На картинах распределения продольной составляющей плотности потока мощности каждому значению функции соответствует свой оттенок серого цвета. Области, где имеет место максимум плотности потока мощности, переносимой в прямом направлении, то есть в положительном направлении оси Oz , изображаются белым цветом, области, в которых исследуемая функция принимает наименьшее значение – черным цветом. Рядом с каждой картиной распределения приведена цветовая шкала с указанием численных значений функции, нормированной на ее наибольшее значение, соответствующих черному и белому цветам.

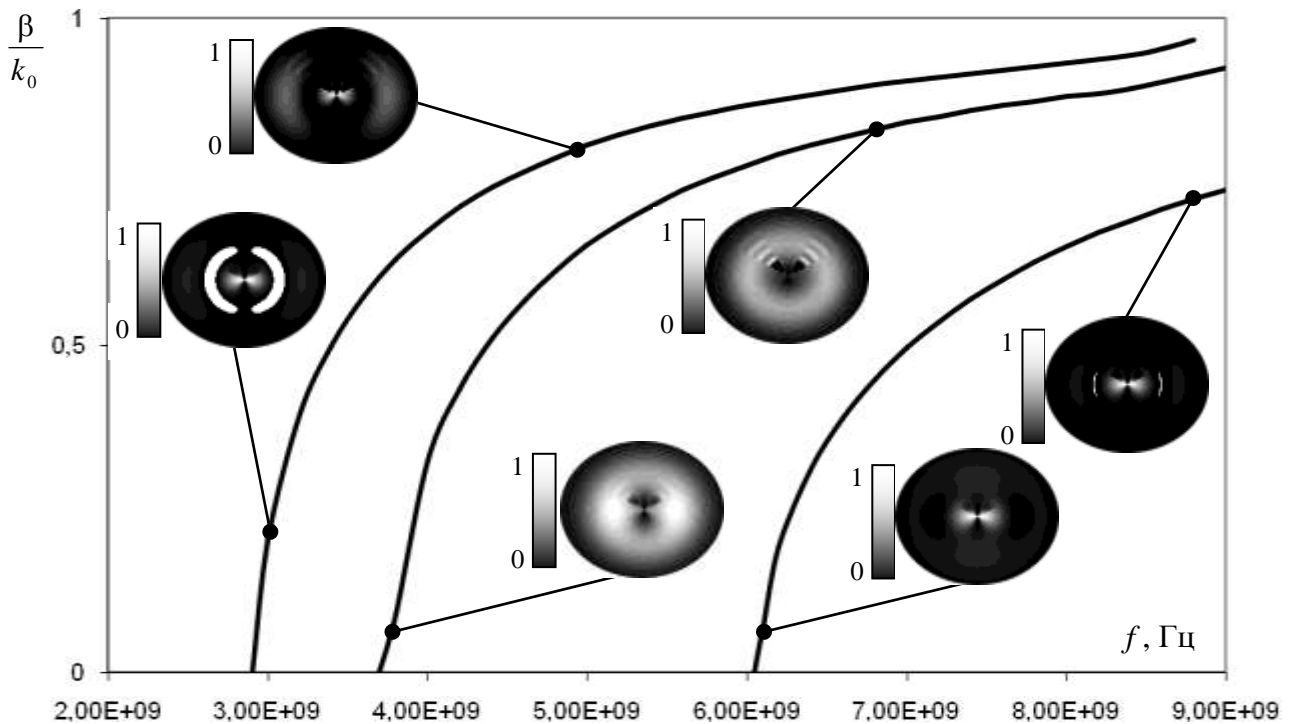


Рис. 6. Дисперсионные характеристики быстрых волн круглого волновода с двумя секториальными диэлектрическими вставками

Как видно из рис. 6, дисперсионные характеристики волн исследуемой структуры качественно похожи на дисперсионные характеристики волн круглого волновода с аксиальной диэлектрической трубкой (рис. 4). Так как рассматриваемые волны являются быстрыми, то их фазовая скорость больше скорости света в вакууме, и переносимая ими мощность распределена за пределами диэлектрических вставок (рис. 6). При этом наблюдается диэлектрический эффект: с ростом частоты переносимая всеми тремя волнами мощность начинает концентрироваться вблизи диэлектрических стержней – областей с большим значением диэлектрической проницаемости.

Библиографический список

1. Математические методы прикладной электродинамики: монография / под ред. С.Б. Раевского. – М.: Радиотехника, 2007. – 88 с.
2. **Неганов, В.А.** Электродинамика и распространение радиоволн / В.А. Неганов, О.В. Осипов, С.Б. Раевский, Г.П. Яровой. – М.: Радиотехника, 2007. – 744 с.

Дата поступления
в редакцию 30.03.2010

A.A. Denisenko, A.V. Nazarov, E.A. Popov

FAST MODES PROPAGATING IN A CIRCULAR WAVEGUIDE WITH TWO SECTORIAL DIELECTRIC INSERTS

A circular waveguide with two symmetrically allocated dielectric inserts in the form of partially filled sectors is considered. The edge problem based on modified Galerkin method is posed, the procedure of the dispersion equation composing is described. The dispersion and energy characteristics of the several fast modes propagating in the structure are presented.

Key words: fast wave, Galerkin method, Maxwell equations, dispersion characteristic, Fourier series.

УДК 669.017: 539.43

А.В. Миронов¹, В.В. Андреев²**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ МЕТАЛЛОВ
ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМОЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Институт ядерной энергетики и технической физики²

Рассмотрен способ восстановления информации об условиях, при которых происходило циклическое нагружение с использованием математических моделей, описывающих поведение металлов при данном виде внешнего воздействия. Прогнозирование поведения рассматриваемой системы выполняется с учетом свойств структурно чувствительного показателя сопротивления усталости, результатов применения обобщенного анализа и программ, реализующих искусственную нейронную сеть в составе информационной системы восстановления информации.

Ключевые слова: усталость металлов, структурно чувствительный показатель, условия испытаний, восстановление описания, интеллектуальная информационная система.

Основным видом внешних воздействий на конструкционный материал при эксплуатации деталей машин и конструкций считается циклическое нагружение. Данное воздействие оказывается различными эксплуатационными нагрузками, термоциклированием, воздействием высокого или низкого давления. При циклическом нагружении численные значения показателей сопротивления материала данному воздействию ниже, чем в случае действия однократной нагрузки. Кроме того, свойства материалов будут существенно зависеть от того, в условиях каких совокупностей действующих факторов будет происходить циклическое нагружение. Усталостное разрушение приводит к существенно неблагоприятным последствиям в форме отказов технических устройств и вызываемыми этим авариями. Последствия таких аварий в условиях современных устремлений на интенсификацию производственных процессов с одновременной экономией средств на производство и модернизацию могут приводить к тяжелым последствиям для здоровья обслуживающего персонала и населения, а также к значительным экономическим потерям в различных отраслях промышленности. В качестве примера подобного разрушения представлен усталостный излом зубьев ведомой шестерни (рис. 1).



Рис. 1. Усталостный излом зубьев ведомой шестерни

Экспериментальное определение величины показателей сопротивления усталости в каждом конкретном случае дорого в силу многообразия рассматриваемых ситуаций и длитель-

ности выполнения экспериментальных работ, необходимых для построения кривой усталости (построение одной кривой усталости в многоцикловой области требует разрушения в исследуемых условиях 20-30 образцов, на что уходит до недели непрерывной работы экспериментальной установки). Математическое моделирование данного явления осложняется отсутствием необходимых эмпирических данных для “наполнения” аналитических зависимостей и отсутствием адекватной процедуры учета межфакторных взаимодействий, усиливающих или, наоборот, ослабляющих индивидуальный вклад того или иного фактора в итоговое значение показателей сопротивления усталости. Наиболее подходящим для решения этой задачи представляется использование свойств структурно чувствительного показателя сопротивления усталости в процессе построения обобщенных моделей поведения металлов при циклическом нагружении. Данный прием позволяет обоснованно объединять в рамках единой математической модели поведения материала многообразные разнородные экспериментальные данные по усталости металлов и сплавов и решать различные прикладные задачи используя результаты этого объединения. В частности, целью нашего исследования являлась попытка реализации процедуры “прогноза наоборот” – восстановления информации о действующих при циклическом нагружении факторах на основе ограниченного набора показателей сопротивления усталости. Данная задача возникает, например, в случае проведения различного рода экспертиз при необходимости подтверждения воздействия на разрушившийся объект предусмотренных штатными условиями эксплуатации факторов, либо в случае необходимости “заполнения пустот” в описании действующих факторов при формировании различных баз данных по экспериментальным результатам. В такой постановке рассматриваемая задача относится к классическим задачам “data mining” или задачам “интеллектуального анализа данных”, в рамках которых среди обширного объема данных (в нашем случае - экспериментальных результатов по усталости металлов и сплавов, накопленных к настоящему времени) имеющих разнородный характер (количественных, качественных, текстовых) необходимо выявить конкретные и понятные результаты (восстановить информацию обо всех, либо о наиболее существенных, условиях испытаний (о действующих факторах).

Попытки традиционного построения математических моделей, которые бы описывали связь “действующие факторы – показатели сопротивления усталости” осложняются в первую очередь отсутствием необходимого объема экспериментальных данных. Методы планирования эксперимента, оптимизирующие объем экспериментальных работ путем, например, формирования дробных реплик [1], в нашем случае неприемлемы, в силу обширности перечня факторов различной природы (конструктивных, технологических, эксплуатационных) и высокой стоимости экспериментальных данных. В то же время экспериментальных данных к настоящему времени накоплено достаточно много, например [2], однако эти данные представлены в литературе в виде результатов узких исследований влияния какого-либо конкретного фактора и, кроме того, имеют, как правило, “рыхлый” характер (в описании условий экспериментов отсутствует информация обо всех действующих факторах и их параметрах). Различные приемы совместного учета коэффициентов индивидуального влияния конкретного фактора (например, их простое перемножение или перемножение с возведением в какую-либо степень, как представлено, например, в обзоре таких методов, выполненном в [3]) не универсальны, поскольку соответствуют ограниченному объему экспериментов, выполненных автором конкретного приема. Наиболее удачным в плане объединения всех накопленных к настоящему времени результатов экспериментального определения показателей сопротивления усталости представляется прием построения обобщенных моделей поведения металлов при циклическом нагружении, использующий в качестве своей основы свойства структурно чувствительного показателя сопротивления усталости. Известны результаты исследований ряда ученых-материаловедов [4, 5, 6], связывающих совокупность действующих факторов с величиной структурно-чувствительного показателя сопротивления усталости. Таким показателем принято считать тангенс угла наклона кривой усталости к оси числа

циклов нагружения ($\text{tg}\alpha_w$) в том случае, когда кривую усталости представляют в логарифмической системе координат. Значение угла наклона будет определять положение точки перелома кривой усталости в многоциклового области, имеющей следующие координаты: по оси ординат – σ_R , (МПа) – предел выносливости, по оси абсцисс - N_G , (циклов нагружения до разрушения объекта). Кроме того, определяя поведение материала при циклическом нагружении структурно-чувствительный показатель сопротивления усталости определяет и положение левого круто наклоненного участка кривой усталости – положение любой точки, лежащей на кривой. Такие точки принято называть *ограниченными пределами выносливости*, они лежат выше точки перелома и имеют следующие координаты: по оси ординат – σ_{RN} , (МПа) – ограниченный предел выносливости, а по оси абсцисс – N – число циклов нагружения, соответствующих указанному ранее уровню нагрузки. Зная три указанных параметра: угол наклона кривой усталости к оси числа циклов нагружения, величину ограниченного или физического предела выносливости, то есть ординату точки на кривой усталости и число циклов нагружения, которое им соответствует (абсцисса точки на кривой усталости) – можно спрогнозировать всю кривую усталости (ее многоциклового область) и решать стоящие перед исследователем прикладные задачи, например, задачу определения остаточного ресурса. Однако простое сопоставление этих параметров друг с другом для большого количества кривых усталости не дает возможности получить какие-либо функциональные зависимости в силу значительного разброса значений параметров сопротивления усталости, что вызвано разнообразным действием совокупностей факторов. В качестве примера представлены результаты простого сопоставления друг с другом кривых усталости, полученных экспериментальным путем и приведенных в [2] (рис. 2).

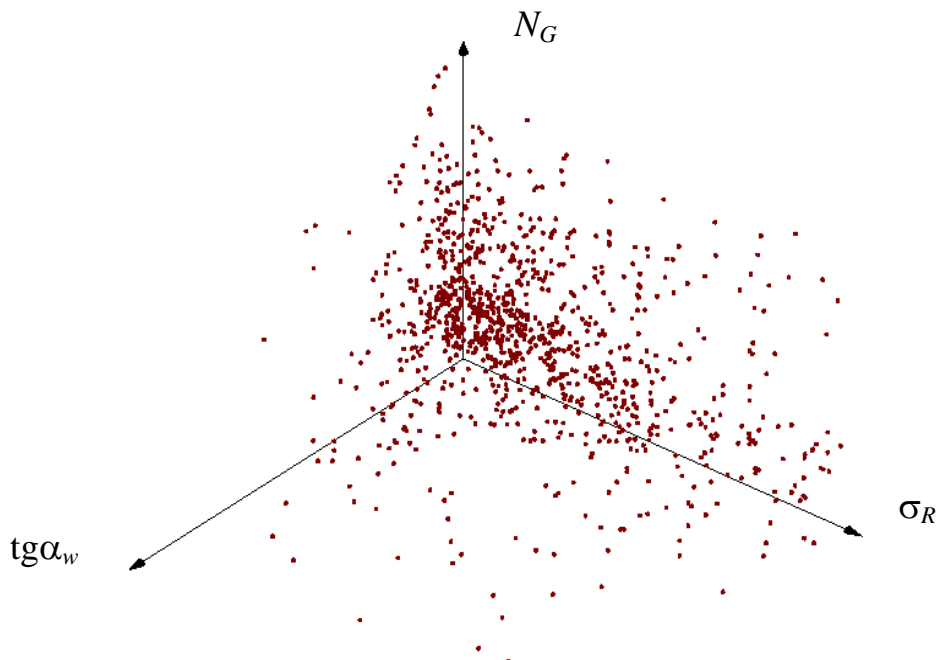


Рис. 2. Сопоставление кривых усталости в трехмерном пространстве, показателей сопротивления усталости, представленных в традиционной форме:

σ_R – предел выносливости, МПа; N_G - число циклов нагружения до разрушения объекта;
 $\text{tg}\alpha_w$ - тангенс угла наклона кривой усталости к оси числа циклов нагружения.

(Диапазон изменения указанных величин 50-1000МПа, 10^4 - 10^8 циклов нагружения, 0,001 – 4 соответственно)

В трехмерном пространстве, образованном координатными осями (“ σ_R - N_G - $\text{tg}\alpha_w$ ”), представлены 1179 точек. Каждая точка соответствует экспериментальной кривой усталости,

хранящейся в базе данных, ее точке перелома. Диапазон изменения величины показателей сопротивления усталости приведен в подрисуночной подписи.

Известен прием решения подобных проблем в рамках обобщенного анализа [7], который можно представить как особый способ уменьшения трудностей, обусловленных множественностью аргументов. В начале решения, ценой утери некоторой доли информации (т.е. исключения некоторых индивидуализирующих особенностей физического процесса), достигается уменьшение числа аргументов и в таком виде решение доводится до конца. Затем, посредством достаточно простой дополнительной операции, информация (и, следовательно, индивидуализация процесса) полностью восстанавливается.

Реализация данного алгоритма применительно к экспериментальным результатам по многоциклового усталости металлов и сплавов [8, 9]

позволила перейти в новое пространство приведенных показателей сопротивления усталости и там получить ряд практически функциональных зависимостей между показателями сопротивления усталости в их приведенной форме.

Обобщенную зависимость приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении физических пределов выносливости) и обобщенную поверхность приведенных параметров сопротивления усталости (образованную при сопоставлении точек, лежащих выше предела выносливости) можно рассматривать как универсальные математические модели, описывающие поведение металлов при данном виде воздействия.

В качестве примера представлены основные элементы пространства приведенных показателей сопротивления усталости (рис. 3). Практически сплошная линия из точек представляет собой результат подбора аппроксимирующей зависимости для всех сопоставляемых кривых усталости; точки по соседству с ней – экспериментальным путем полученные кривые усталости представленные в преобразованном пространстве.

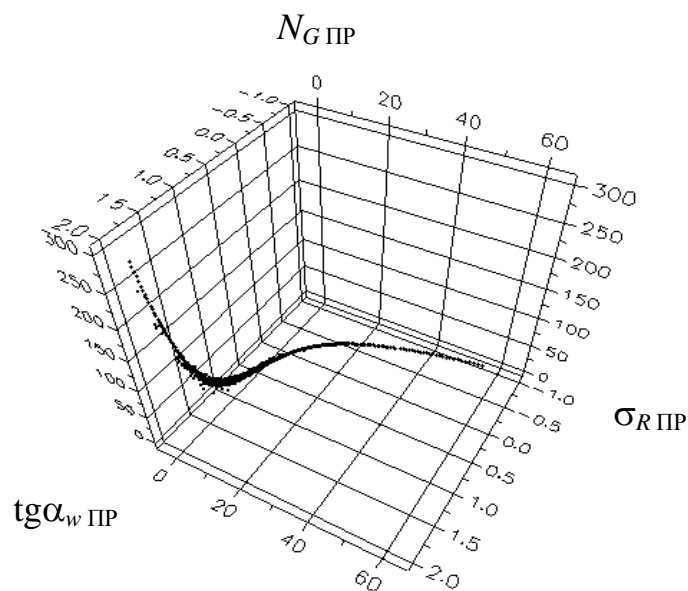


Рис. 3. Основные элементы пространства приведенных показателей сопротивления усталости - кривые усталости в преобразованном пространстве и обобщенная зависимость приведенных параметров сопротивления усталости

Далее (рис. 4) представлено схематичное изображение обобщенной зависимости и обобщенной поверхности приведенных параметров сопротивления усталости в пространстве преобразованных показателей сопротивления усталости.

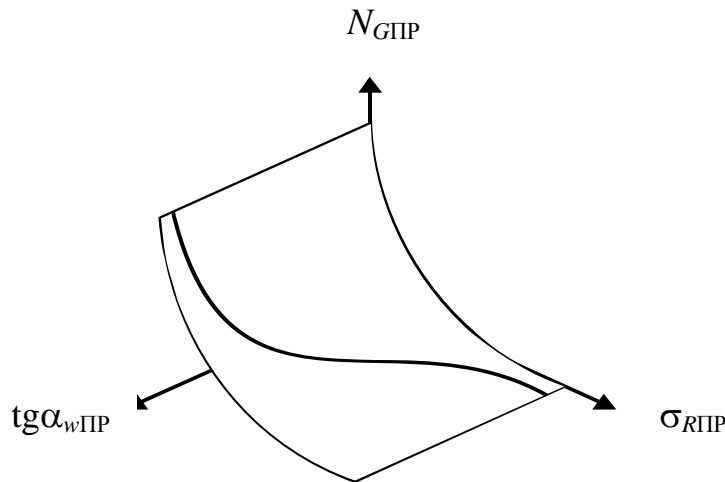


Рис. 4. Схематичное изображение поверхности приведенных параметров сопротивления усталости с выделенными на ней точками, соответствующими физическим пределам выносливости металлов и сплавов – обобщенной зависимостью приведенных параметров сопротивления усталости

Фактически, процедура преобразования показателей сопротивления усталости в их приведенные аналоги позволяет перейти в некоторое условное трехмерное пространство, в котором удобно выполнять необходимые преобразования. Для практического использования получаемых полезных результатов необходимо лишь произвести обратное преобразование (восстановление) показателей сопротивления усталости из их аналогов. Каждая экспериментально полученная кривая усталости в приведенном пространстве формирует и уточняет обобщенную зависимость или обобщенную поверхность (располагаясь на них). Смена совокупности действующих факторов изменяет угол наклона кривой усталости, смещает кривую усталости вдоль обобщенной зависимости, в результате чего изменение претерпевают координаты точки перелома кривой усталости (предел выносливости и абсцисса точки перелома). В рассмотренном приведенном пространстве каждая кривая усталости на обобщенной зависимости представляется точкой с тремя координатами. Это как бы свернутая форма хранения информации об особенностях действующих условий и поведении материала в ответ на оказанное воздействие. Очевидно, что существуют задачи, при решении которых возникает необходимость движения в направлении, как бы обратном тому, что было рассмотрено ранее. То есть при известных значениях показателей сопротивления усталости требуется расшифровка (восстановление) описания тех условий, при которых были получены конкретные значения показателей сопротивления усталости. Решение задачи в такой постановке требует увеличения размерности рассматриваемого пространства приведенных показателей сопротивления усталости: каждый фактор можно рассматривать как координату в таком пространстве и конкретное значение параметров сопротивления усталости будет действительно формироваться полной совокупностью действующих факторов. Недосток эмпирических данных при работе в данном направлении (их “рыхлость”) было решено компенсировать использованием программы, реализующей искусственную нейронную сеть.

Для создания и обучения искусственной нейронной сети использовался программный продукт компании NeuroProject NeuroShell2, который содержит в себе реализацию следующих типов искусственных нейронных сетей: сеть Ворда, сеть с общей регрессией с генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев, сеть с обходными соединениями, трёхслойная сеть со стандартными соединениями. В теории нейронных сетей существуют две актуальные проблемы, одной из которых является выбор оптимальной структуры нейронной сети, а другой – построение эффективного алгоритма обучения нейронной сети. Для поиска оптимальной структуры ИНС были исследованы все указанные ранее типы искусственных нейронных сетей. Входы для нейронной сети представляли собой кодирован-

ные значения действующих факторов, а выходами являлись значения показателей сопротивления усталости. Выполнялось исследование с целью определения типа нейронной сети и формы представления данных при обучении нейронной сети, которые обеспечили бы наибольшую эффективность работы программы. Показатели эффективности определялись с точки зрения времени, необходимого на обучение сети, и с точки зрения величины ошибки в определении показателей сопротивления усталости как результата действия совокупности факторов. Создав и обучив ИНС на нашем наборе данных с помощью NeuroShell2, был получен график зависимости ошибки, выдаваемой сетью на тестовом наборе данных, полученной по всем выходам для каждого примера обучающей выборки, усредненной по всем примерам обучающей выборки, в зависимости от времени обучения. Далее (рис. 5) представлены результаты расчета величины ошибки прогнозирования показателей сопротивления усталости как функции действующих факторов в зависимости от типа сети и от формы представления показателей сопротивления усталости – в приведенной или традиционной форме.

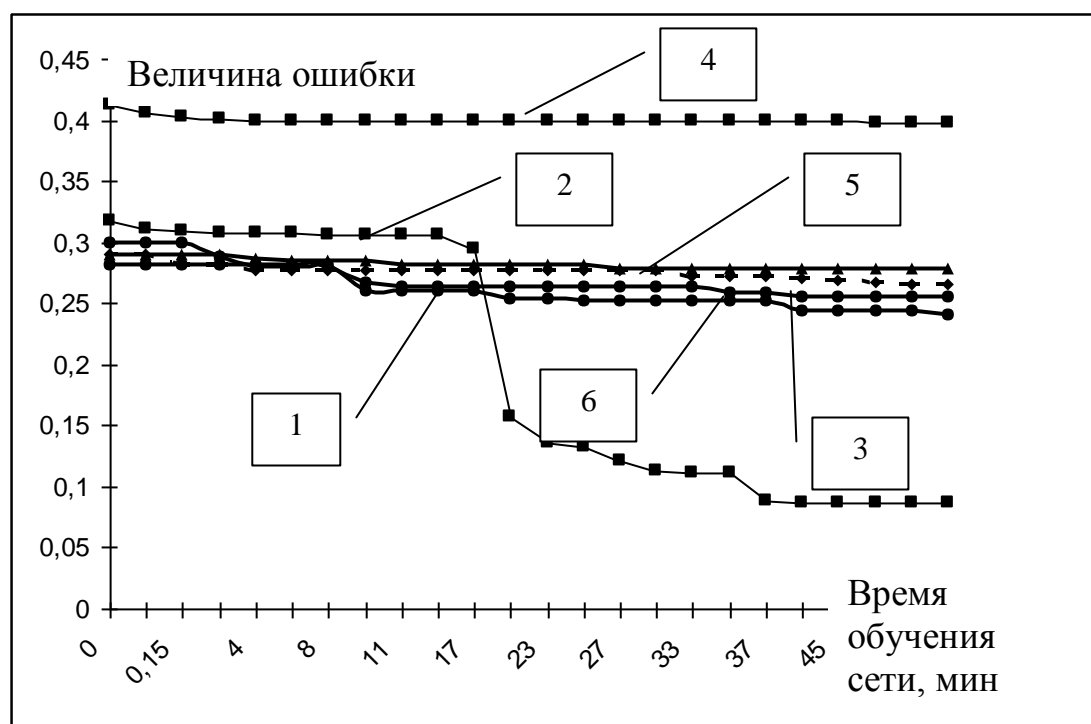


Рис. 5. Результаты расчета ошибки прогнозирования показателей сопротивления усталости от действующих факторов на сетях различных типов и для разных форм представления показателей сопротивления усталости (в приведенной и традиционной форме):

1 и 5 - сеть Ворда, традиционная и приведенная форма представления параметров сопротивления, соответственно; 2 и 4 - нейронная сеть с общей регрессией с генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев, приведенная форма представления параметров сопротивления и традиционная форма представления параметров сопротивления соответственно; 3 и 6 – трехслойная нейронная сеть со стандартными соединениями, традиционная и приведенная форма представления параметров сопротивления соответственно

Из приведенных результатов можно сделать вывод о том, что для описания поведения нашей системы и для решения задачи восстановления информации об условиях испытаний на усталость металлов оптимальной будет нейронная сеть с общей регрессией и генетическим алгоритмом подстройки весов скрытых и выходных слоев и приведенной формой представления показателей сопротивления усталости.

Указанная последовательность использования нейронной сети соответствовала решению задачи прогнозирования в прямом направлении – от описания действующих факторов к значениям показателей сопротивления усталости. Положительные результаты работы про-

граммы, реализующей ИНС, позволили сначала поставить, а затем и решить задачу прогнозирования и в обратной последовательности. Действительно, если сеть позволяет решить задачу прогнозирования в прямой постановке, то нельзя ли ее решить в обратном направлении - нельзя ли задать значения показателей сопротивления усталости и по ним, пользуясь всеми приведенными ранее результатами, подобрать один (может быть, наиболее вероятный) вариант совокупности действующих факторов. Формально, обобщенная зависимость и обобщенная поверхность позволяют реализовать эту задачу, однако нужно представлять себе, что, очевидно, одно и то же значение угла наклона кривой усталости может быть получено при различных комбинациях действующих факторов. При этой оговорке становится понятно, что решение задачи восстановления информации о совокупности действующих факторов предполагает некоторую неопределенность. Однако, как следует из работ по обобщенному анализу, системы, для которых в процессе перехода к безразмерным критериям были получены одинаковые значения приведенных показателей сопротивления усталости, будут подобны друг другу несмотря на то, что конкретные совокупности действующих факторов будут различны, например, по совокупности факторов, либо по значению параметров в пределах одинаковой совокупности. Данное положение позволяет несколько упростить задачу, например, путем получения необходимой информации в ходе испытания образцов-свидетелей, циклически нагружаемых в условиях, подобных искомой ситуации с точки зрения воздействия на материал, но технически реализуемых более просто. Как первый шаг на пути ее решения должны рассматриваться некоторые упрощенные ситуации – восстановления искомых значений (количественных параметров) для отдельных факторов при известных остальных, либо восстановление информации о факторе, действие которого оказывается наиболее существенным. Работа ИНС и последующая оценка точности восстановления информации подтвердили эти, в общем, очевидные предположения. В качестве переменных рассматривались показатели сопротивления усталости (в количестве трех) и факторы, формирующие условия нагружения (температура, асимметрия цикла, частота нагружения, шероховатость поверхности и т.д. – всего девять факторов). Были рассмотрены ситуации, при которых параметры сопротивления задавались всегда, а число факторов, известных и неизвестных, варьировалось. Далее показаны результаты расчета ошибки восстановления информации в зависимости от разности между числом известных и числом неизвестных (восстанавливаемых) факторов (рис. 6).

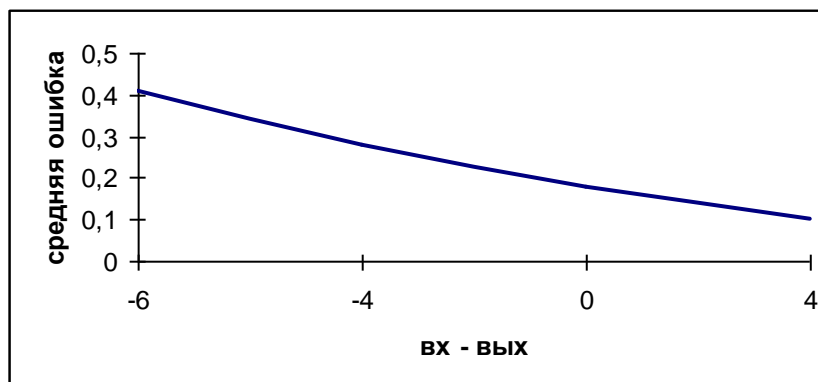


Рис. 6. Зависимость величины ошибки восстановления информации от соотношения числа известных и восстанавливаемых факторов (на рисунке обозначено как (vx-vyx))

В процессе обучения ИНС в качестве обучающей и экзаменующей выборок рассматривались строки базы данных об условиях испытаний и значениях показателей сопротивления усталости, а также была найдена оптимальная форма для представления показателей сопротивления усталости, предъявляемых сети и определено оптимальное соотношение числа входов и выходов, предъявляемых сети в качестве известных величин и величин, получае-

мых в результате ее работы. Показатели сопротивления усталости должны быть предъявлены ИНС в приведенной форме, то есть в виде безразмерных параметров, образующих практически функциональную зависимость. Точность восстановления информации зависит от соотношения входов (числа известных параметров сопротивления усталости и известных факторов) и выходов (числа восстанавливаемых кодированных значений действующих факторов). Была реализована система программного обеспечения, позволяющая решать задачу восстановления информации, в частности [10].

В качестве практической задачи, предъявляемой уже обученной ИНС, были рассмотрены результаты испытаний на усталость поршневого пальца двигателя автомобиля, представленного на рис. 7.

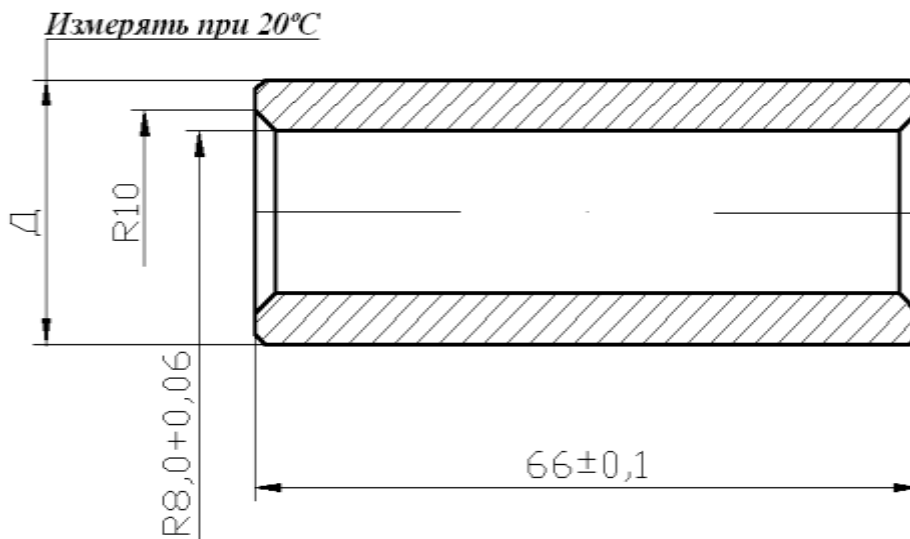


Рис. 7. Чертеж пальца поршневого двигателя автомобиля, испытания на усталость которого моделировались в процессе восстановления информации о действующих факторах

Сравнение результатов работы программы восстановления информации и описания факторов, фактически имевших место при циклическом нагружении, показали, что в условиях стендовых испытаний программа позволяет надежно определять до трех действующих факторов, что согласуется с результатами численного моделирования работы программы, представленными на рис. 6.

Дальнейшее увеличение числа искомых неизвестных приводит к неприемлемому увеличению ошибки при восстановлении информации.

Библиографический список

1. **Адлер, Ю.П.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий / Ю.П. Адлер, Е.В. Маркова, Ю.В. Грановский. – М.: Наука, 1971. – 285 с.
2. **Трощенко, В.Т.** Сопротивление усталости металлов и сплавов / В.Т. Трощенко, Л.А. Сосновский. – Киев: Наук. думка, 1987. – 1303 с.
3. **Акимов, Л.М.** Выносливость жаропрочных материалов / Л.М. Акимов. – М.: Металлургия, 1977. – 152 с.
4. **Трощенко, В.Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении / В.Т. Трощенко. – Киев: Наук. думка, 1981. – 343 с.
5. **Гребенник, В.М.** Усталостная прочность и долговечность металлургического оборудования / В.М. Гребенник. – М.: Машиностроение, 1969. – 256 с.
6. **Шетулов, Д.И.** Прогнозирование долговечности деталей машин по нестандартным физико-механическим параметрам конструкционных материалов / Д.И. Шетулов, В.В. Андреев // Изв. РАН. Металлы. 1998. №3. С. 55-59.
7. **Гухман, А.А.** Обобщенный анализ / А.А. Гухман, А.А. Зайцев. – М.: Факториал, 1998. – 304 с.

8. **Андреев, В.В.** Предел выносливости металлов на обобщенной зависимости приведенных параметров сопротивления усталости: учеб. пособие / В.В. Андреев; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2003. – 304 с.
9. **Андреев, В.В.** Анализ многомерных данных по усталости металлов на основе представления экспериментальной информации в пространстве приведенных параметров / В.В. Андреев, А.В. Миронов // Системный анализ и информационные технологии: тр. третьей международной конференции САИТ-2009. – Звенигород, 2009. С. 19.
10. **Андреев, В.В.** Программа оценки эффективности различных стратегий обучения искусственной нейронной сети при выполнении восстановления информации об условиях испытаний на усталость // Программы для ЭВМ. Базы данных. Топологии интегральных микросхем.: официальный бюллетень федеральной службы по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам / В.В. Андреев, Е.Д. Варламова, А.В. Миронов. – М., 2007. № 3. С. 190.

*Дата поступления
в редакцию 06.04.2010*

A. V. Mironov, V.V.Andreev

FORECASTING OF THE CYCLIC LOADING CONDITIONS ON THE BASIS OF THE GENERALIZED MODELS OF THE METALS BEHAVIOUR AT THE GIVEN KIND OF THE EXTERNAL EFFECT

In the given article the way of the restoration of the information on conditions at which occurred cyclic loading is considered. This task carried out with using of the metals behavior mathematical models. Modeling of the behavior of the considered system carried out with using of the structurally sensitive parameter properties, the results of application of the generalized analysis and the programs realizing an artificial neural network in the structure of the information system of the information restoration.

Key words: fatigue of metals, the structurally sensitive parameter, conditions of cyclic loading, the information restoration, the information system.

УДК 621.039

М.Н. Боровков, С.Е. Белов, Э.Г. Новинский

РАЗРАБОТКА СТРАХОВОЧНЫХ ПОДШИПНИКОВ ВЕРТИКАЛЬНОЙ ТУРБОМАШИНЫ УСТАНОВКИ ГТ-МГР

ОАО «ОКБМ Африкантов»

Представлена программа научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ по созданию страховочных подшипников турбомашин ГТ-МГР, а также некоторые итоги выполненных работ. Опыт, полученный в результате реализации данной программы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

Ключевые слова: электромагнитный подшипник, страховочный подшипник, блок преобразования энергии, турбомашин, материалы пар трения, сегмент, демпфирующий блок.

Введение

В настоящее время в мире нет опыта создания страховочных подшипников, подобных подшипникам турбомашин ГТ-МГР, удерживающих гибкий вертикальный ротор с большими массой и диаметральными размерами. Сложность и новизна задачи создания страховочных подшипников, которая определяется уникальностью турбомашин, высокими требованиями по надежности, необходимостью верификации расчетных методик, требуют проведения всесторонних экспериментов на поэтапной основе, начиная от малоразмерных моделей до полномасштабных образцов

страховочных подшипников. С этой целью, в рамках проекта ГТ-МГР, запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Высокотемпературные газоохлаждаемые реакторы (ВТГР) – единственная ядерная технология, способная обеспечить температуру теплоносителя до 1000 °С. ВТГР присущи высокая безопасность и эффективность производства электроэнергии при меньшем влиянии на окружающую среду. В экспериментальных и опытно-промышленных ВТГР, созданных для производства электроэнергии, использовался паротурбинный цикл, обеспечивающий надежную работу и снижающий технический риск создания АЭС. Однако паротурбинный цикл не мог дать значительного преимущества в КПД, который не превышал 40–43% при температуре газа до 800 °С на выходе

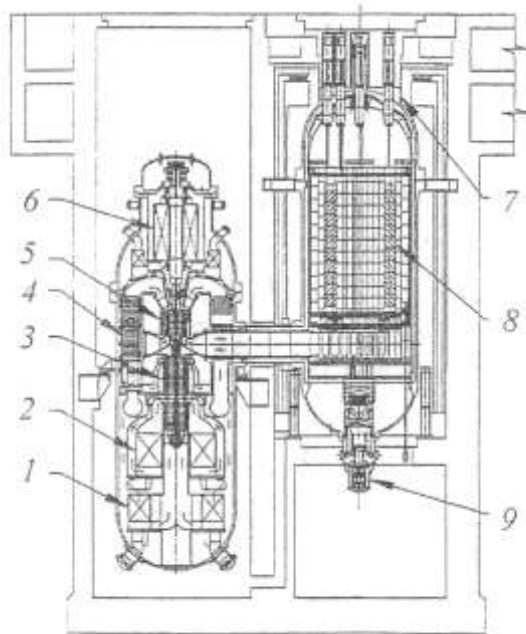


Рис. 1. Компоновка реакторной установки ГТ-МГР:

- 1, 2 – концевой и промежуточный холодильники;
- 3 – компрессор; 4 – рекуператор; 5 – турбина;
- 6 – генератор; 7 – помещение для стержней СУЗ;
- 8 – активная зона; 9 – система охлаждения
остановленного реактора

из реактора. Возможности ВТГР для производства электроэнергии в большей степени раскрываются при использовании блока преобразования энергии (БПЭ) с прямым замкнутым

газотурбинным циклом в первом контуре. В этом случае при температуре газа 850–950⁰С КПД АЭС с ВТГР может достигать 48% и выше. Кроме того, прямой газотурбинный цикл преобразования энергии, по сравнению с паровым, значительно упрощает схему энергоблока и сокращает число необходимого оборудования и систем. Благодаря достижениям в области газовых турбин, высокоэффективных рекуператоров и электромагнитных подшипников (ЭМП), появилась реальная возможность разработки реакторной установки, которая сочетает безопасный модульный газоохлаждаемый реактор и БПЭ, реализующий высокоэффективный газотурбинный цикл Брайтона. Одним из проектов реакторной установки, реализующим данную концепцию, является проект реакторной установки ГТ-МГР, компоновка которой приведена на рис. 1.

Основным компонентом БПЭ ГТ-МГР является турбомашина (ТМ), предназначенная для преобразования тепловой энергии теплоносителя в электроэнергию при работе по прямому газотурбинному циклу и обеспечения циркуляции гелия в первом контуре [1].

Работоспособность турбомшины для реакторной установки ГТ-МГР (рис. 2) во многом определяется надежностью системы электромагнитного подвеса вертикального гибкого ротора общей массой порядка 68 т, длиной порядка 25 м. Система электромагнитного подвеса ротора ТМ состоит из осевых и радиальных ЭМП, системы управления ЭМП и страховочных подшипников (СП).

Современные достижения в области разработки ЭМП позволили достаточно обоснованно подойти к выбору их в качестве опор для ротора ТМ. Несмотря на высокую надежность, нельзя полностью исключить вероятность выхода из строя ЭМП и их системы управления, например, при потере источника питания. В таких случаях в качестве резервных опор ротора используются страховочные подшипники, которые обеспечивают безаварийный «выбег» ротора до останова. Кроме того, страховочные подшипники используются:

- при плановом отключении ЭМП остановленного ротора ТМ;
- при динамических нагрузках, превышающих грузоподъемность ЭМП.

В процессе проектирования страховочных подшипников ТМ ГТ-МГР рассматривается конструктивная схема на подшипниках скольжения, в связи с ее большей надежностью по сравнению с конструктивной схемой, основанной на подшипниках качения [2].

В настоящее время в мире нет опыта создания подшипников, подобных страховочным подшипникам ТМ ГТ-МГР, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметральными размерами. Сложность и новизна задачи создания страховочных подшипников, которая определяется уникальностью ТМ, высокими требованиями по надежности, необходимостью верификации расчетных методов, требуют проведения всесторонних экспериментов на поэтапной основе, начиная от мало-размерных моделей до полномасштабных образцов страховочных подшипников [3]. С этой целью, в рамках проекта ГТ-МГР, запланировано проведение комплекса научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Комплекс работ включает в себя испытания материалов пар трения страховочных подшипников ТМ, определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника ТМ, испытания демпфирующего

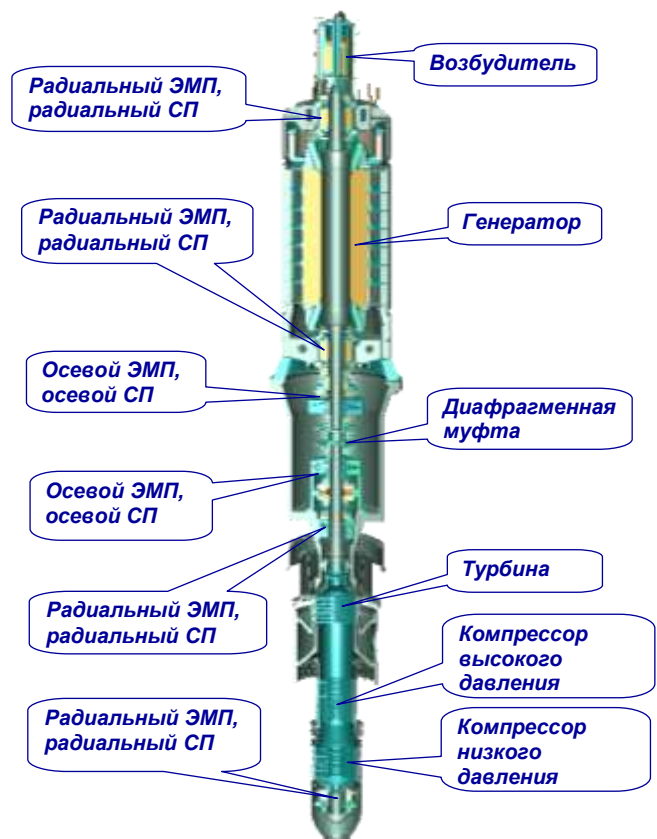


Рис. 2. Турбомашина ГТ-МГР

блока макета радиального страховочного подшипника, испытания макетов страховочных подшипников, испытания опытных образцов страховочных подшипников, испытания страховочных подшипников в рамках испытаний полномасштабного турбокомпрессора. Логическая диаграмма разработки страховочных ТМ ГТ-МГР представлена на рис. 3.

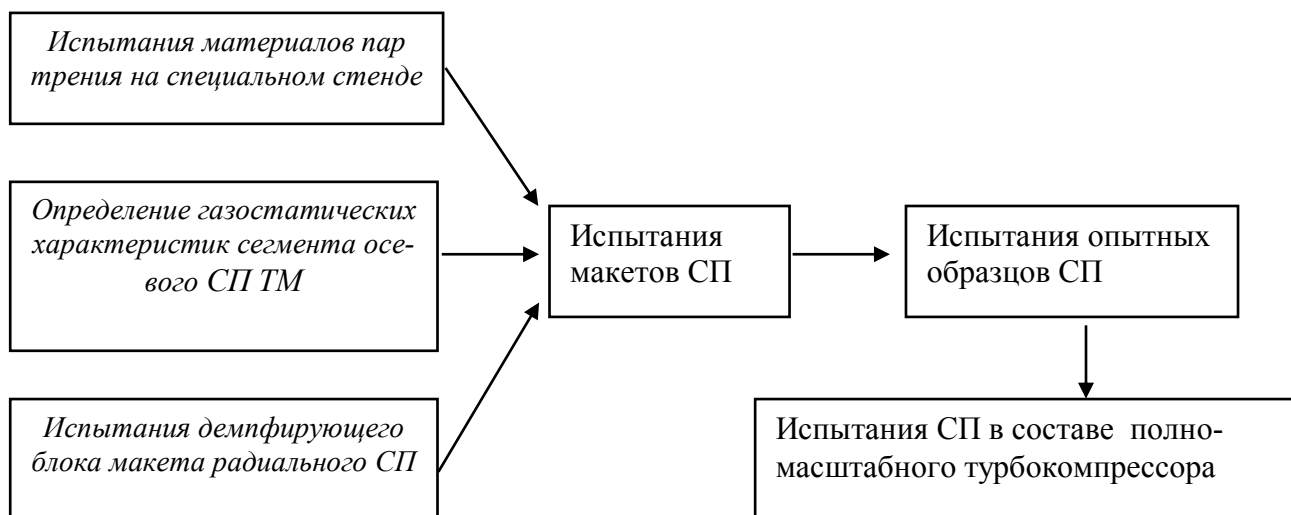


Рис. 3. Логическая диаграмма разработки страховочных подшипников

Некоторые итоги проведенных НИОКР

Предварительные испытания материалов пар трения

Предварительные испытания материалов пар трения проводились на специальном стенде предприятия (рис. 4), который предназначен для проведения сравнительных испытаний на износостойкость различных сочетаний материалов пар трения скольжения в среде гелия [3, 4].

Технические характеристики стенда (рис. 4):



Рис. 4. Стенд для испытаний материалов пар трения в среде гелия

- рабочая среда – гелий;
- температура – до 400 °С;
- давление – до 4,9 МПа;
- максимальная частота вращения рабочего вала – 3,16 с⁻¹;
- максимальная осевая нагрузка на образцы – до 3 кН;
- максимальная радиальная нагрузка на образцы – до 5 кН;
- максимальная линейная скорость скольжения:
 - в узле торцевого трения – 0,33 м/с;
 - в узле радиального трения – 0,14 м/с.

Исходя из условий эксплуатации и требований к материалам пар трения страховочных подшипников турбомашин ГТ-МГР, испытаниям подвергались различные антифрикционные покрытия и следующие классы материалов: металлы, керамические материалы, композиционные материалы.

В процессе испытаний определялись триботехнические характеристики: коэффициент трения, линейный износ, интенсивность изнашивания.

Схема взаимодействия образцов при испытаниях приведена на рис. 5.

Узел торцевого трения (рис. 5, а) состоит из вращающегося образца, выполненного в виде кольцевого диска толщиной 10 мм с рабочей поверхностью, ограниченной наружным

диаметром 118 мм, внутренним 65 мм, и трех неподвижных образцов, выполненных в виде цилиндров высотой 24 мм с торцевой поверхностью трения диаметром 10 мм. Вращающиеся и неподвижные образцы устанавливаются в обоймы.

Узел радиального трения (рис. 5, б) состоит из трех вращающихся и трех неподвижных образцов в виде втулок. Вращающиеся образцы установлены на вертикальный вал. Контакт осуществляется по диаметру 45 мм. Средние втулки имеют высоту в два раза большую, чем крайние. Высота крайних неподвижных втулок составляет 20 мм, средней неподвижной втулки 40 мм, вращающихся втулок – 24 и 44 мм соответственно.

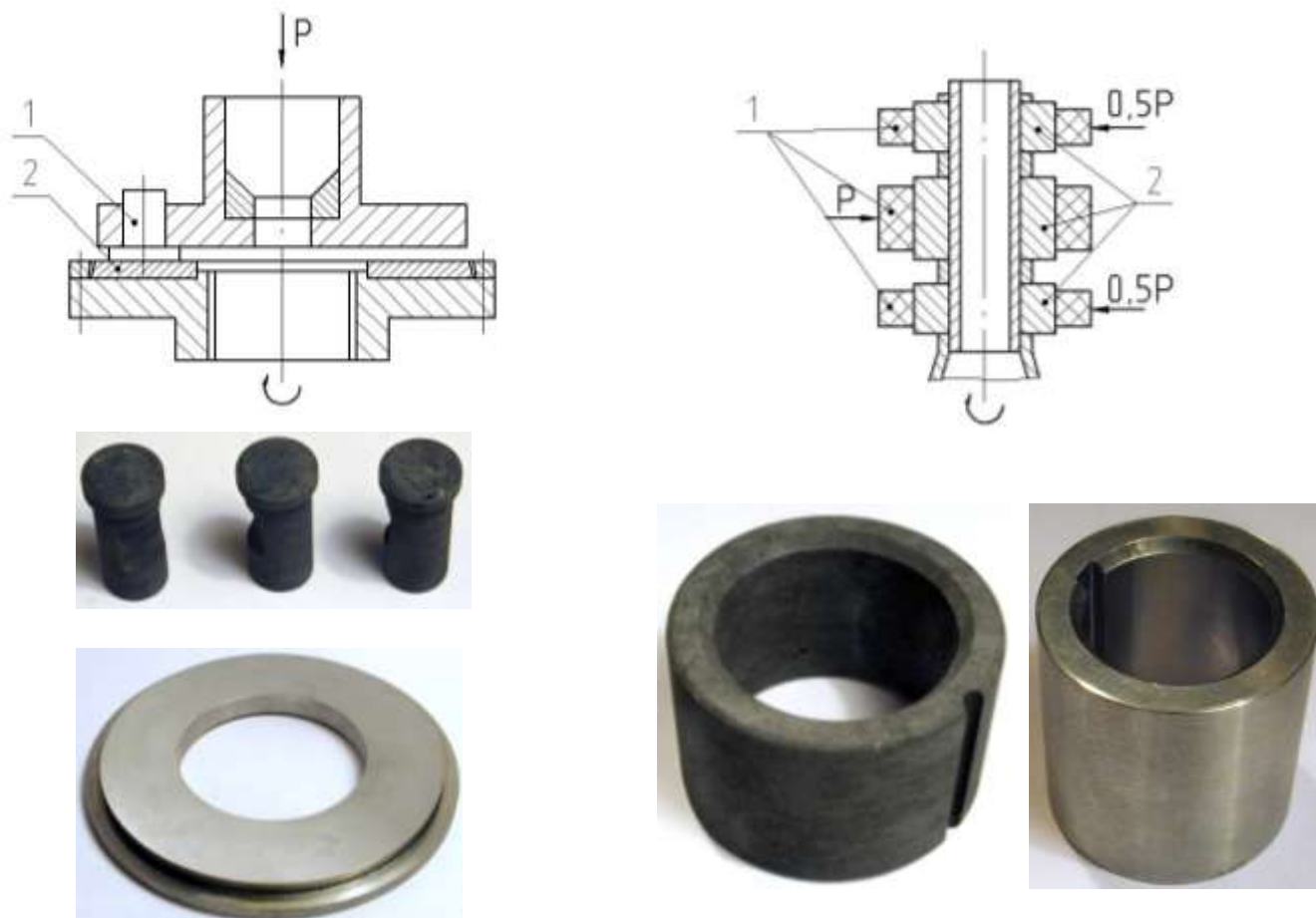


Рис. 5. Схема взаимодействия образцов при испытаниях и испытанные образцы:

a – узел торцевого трения; *б* – узел радиального трения;

P – нагрузка на образцы; *1* – вращающиеся образцы; *2* – неподвижные образцы

Результаты испытаний, завершившихся к 2009 году, показали, что наилучшие триботехнические характеристики имеет следующее сочетание материалов пар трения: металл (в том числе с антифрикционным покрытием) – композиционный материал.

По результатам предварительных испытаний были отобраны материалы и покрытия, показавшие наилучшие результаты, для продолжения исследований в рамках испытаний макетов страховочных подшипников.

Определение газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника

Осевой страховочный подшипник турбомшины ГТ-МГР представляет собой осевой подшипник скольжения сухого трения с газостатической разгрузкой, физический контакт в котором имеет место в течение одной - двух секунд, до подачи газа в подшипник. Для подтверждения возможности создания газостатического подвеса и верификации расчетных ме-

тодик были проведены испытания по определению газостатических характеристик одного сегмента осевого СП на специальном стенде (рис. 6) [4].



а)



б)

в) **Рис. 6. Стенд для определения газостатических характеристик сегмента осевого страховочного подшипника: а – дроссель; б – сегмент; в – общий вид стенда**

На стенде были проведены исследования (без относительного скольжения торцев пары трения) газостатических характеристик одного сегмента осевого страховочного подшипника ТМ ГТ-МГР, по результатам которых:

- определена несущая способность сегмента при различных рабочих зазорах в паре трения и при различных перепадах давления азота и гелия;
- определены оптимальные диаметр дросселей в сегменте, величины зазора в паре трения и рабочего давления;
- определено влияние качества поверхности рабочих торцев в паре трения на несущую способность сегмента и величины расходов азота и гелия в зазоре;
- подтверждена возможность создания системы газостатического подвеса осевого страховочного подшипника ТМ ГТ-МГР;
- выработаны рекомендации для оптимизации конструкции макета осевого страховочного подшипника.

Испытания демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

Демпфирующий блок устанавливается в радиальном направлении между каждой из восьми колодок радиального страховочного подшипника скольжения и его внешним корпусом (рис. 7). Основным элементом демпфирующего блока является кольцевая фрикционная пружина, которая предназначена для снижения динамических радиальных сил и ограничения радиальных смещений ротора, вращающегося в радиальном страховочном подшипнике. Снижение сил, действующих на колодку в радиальном страховочном подшипнике, существенно зависит от демпфирующих характеристик пружин.

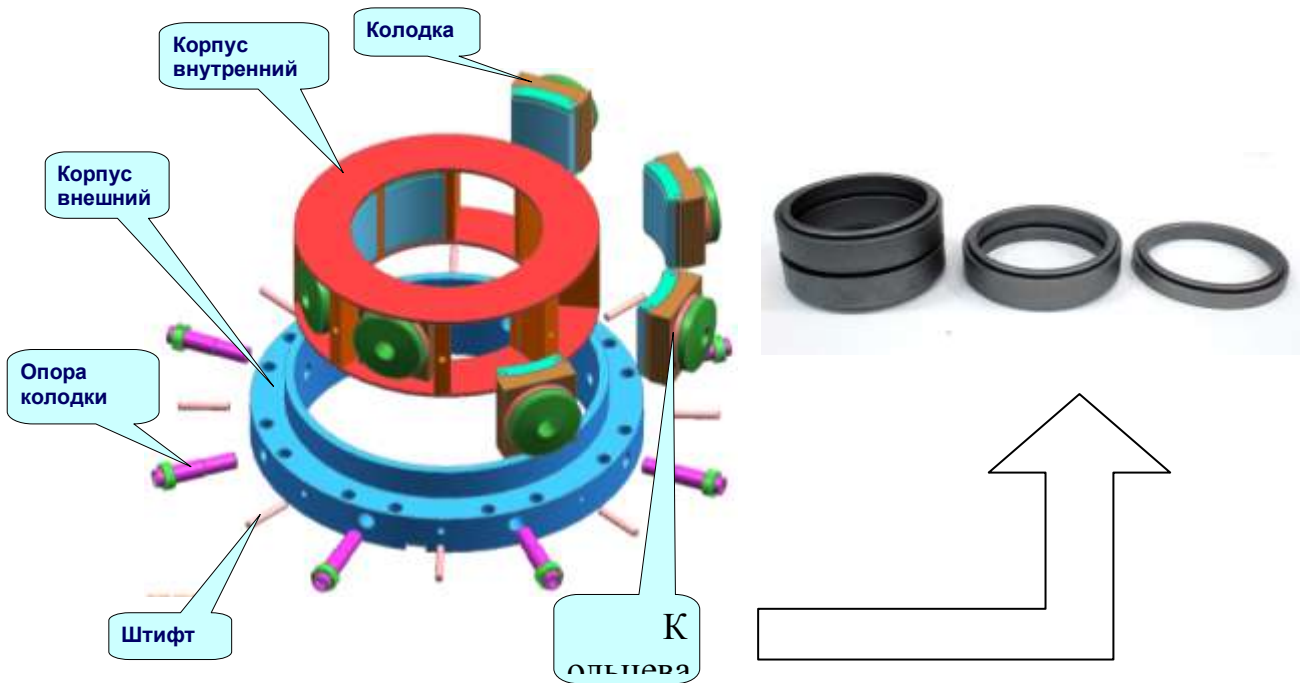


Рис. 7. Радиальный страховочный подшипник

На экспериментальных стендах (рис. 8) проводятся испытания, целью которых являются исследования упругих и демпфирующих характеристик пружин при осевом сжатии и последующем снижении нагрузки (*а*), подтверждения работоспособности пружин при циклических (*б*) и ударных (*в*) нагрузках. Также, по результатам испытаний будут определены динамические силы и коэффициент поглощения энергии фрикционной пружиной.

По результатам испытаний демпфирующих блоков выбирается оптимальный блок для установки в макет радиального страховочного подшипника.



а) *б)* *в)*
Рис. 8. Оборудование для испытаний демпфирующего блока макета радиального страховочного подшипника

Испытания макетов страховочных подшипников

Испытания макетов страховочных подшипников при натуральных скоростях скольжения и удельных нагрузках позволят экспериментально:

- обосновать работоспособность макетов страховочных подшипников;

- обосновать работоспособность системы подачи газостатического давления гелия в макет осевого страховочного подшипника;
- определить коэффициент трения материалов рабочих пар, его зависимость от удельных нагрузок и скорости скольжения;
- определить износостойкость материалов пар трения, ее зависимость от скорости скольжения и удельных нагрузок;
- определить расчетные температуры и их распределение в материале роторных и статорных элементов макетов страховочных подшипников;
- определить статическую и динамическую жесткости и коэффициент демпфирования макетов страховочных подшипников.

Стенд для испытаний макетов страховочных подшипников (рис. 9) состоит из следующих основных составных частей:

- ходовой части (см. рис. 10);
- электрооборудования;
- системы подачи гелия низкого давления;
- системы подачи гелия высокого давления;
- системы охлаждения;
- информационно измерительной системы;
- пульта управления.

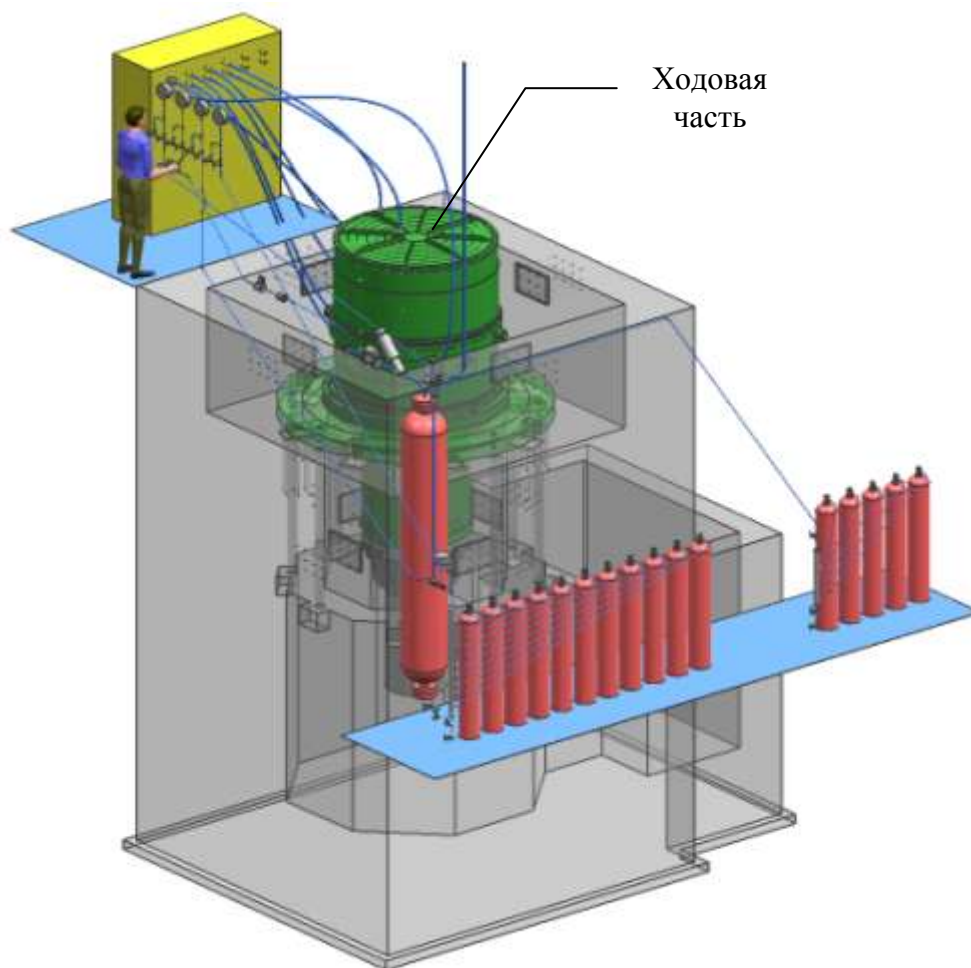


Рис. 9. Стенд для испытаний макетов страховочных подшипников

Основные технические характеристики стенда:

- рабочая среда – гелий;
- температура рабочей среды – до 60 °С;
- давление рабочей среды – до 0.11 МПа;
- частота вращения ротора – до 5400 об/мин;
- масса ротора – 9000 кг;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном/внутреннем диаметре макета осевого страховочного подшипника – 280/165 м/с;
- максимальная линейная скорость скольжения на наружном диаметре макета радиального страховочного подшипника - 140 м/с;
- расчетная удельная нагрузка на осевой страховочный подшипник – до 1,3 МПа;
- расчетная удельная нагрузка на радиальный страховочный подшипник – до 1,5 МПа.

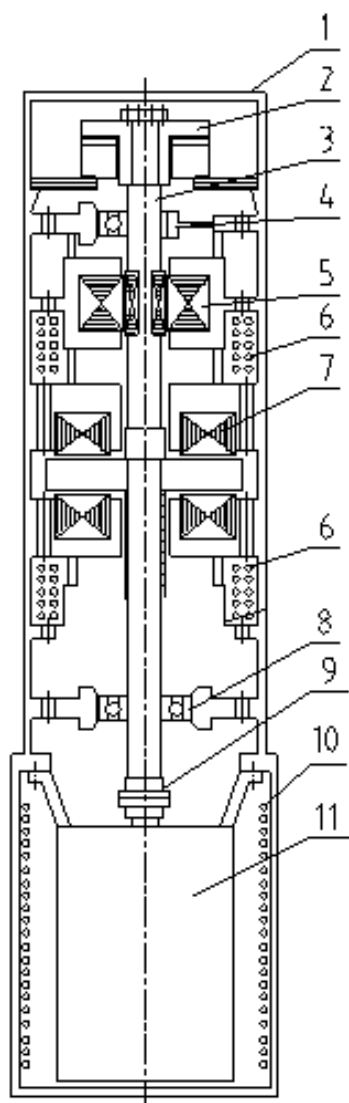


Рис. 10. Ходовая часть:

1 – корпус; 2 – макет осевого страховочного подшипника; 3 – ротор; 4 – макет радиального страховочного подшипника; 5 – радиальный ЭМП; 6 – холодильник; 7 – осевой ЭМП; 8 – шарикоподшипник; 9 – муфта; 10 – холодильник; 11 – электродвигатель

В конце 2010 года планируется завершить изготовление стенда, а в начале 2011 года получить первые результаты испытаний макетов страховочных подшипников, по итогам которых будут изготовлены опытные образцы.

Вывод

В настоящее время в мире нет опыта создания подшипников, подобных страховочным подшипникам турбомшины ГТ-МГР, в которых вращается гибкий вертикальный ротор с большой массой и диаметральными размерами. В ОКБМ проводится уникальная программа исследований по созданию страховочных подшипников. Данные исследования позволят поэтапно, начиная от маломасштабных моделей, отработать конструкцию страховочных подшипников, получить экспериментальные данные для ведения проектных работ и приобрести опыт эксплуатации страховочных подшипников, который будет использован при испытаниях полномасштабного турбокомпрессора и эксплуатации штатной ТМ. Опыт, полученный в результате реализации данной программы исследований, может быть использован и в других отраслях машиностроения, связанных с созданием динамических машин.

Библиографический список

1. **Костин, В.И.** Развитие проекта блока преобразования энергии ГТ-МГР / В.И. Костин [и др.] // Атомная энергия. 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 57-63.
2. **Белов, С.Е.** Подходы к проектированию страховочных подшипников для турбомашин газоохлаждаемых реакторов / С.Е. Белов [и др.] // Молодежь в науке: сб. докл. V научно-технической конференции / РФЯЦ-ВНИИЭФ. – Саров, 2007. С. 521.
3. **Kodochigov, N.G.** Development of the GT-MHR vertical turbomachine design / N.G. Kodochigov [et. al.] // Proceedings of the 4th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, HTR2008, September. October 1. 2008. Washington, DC USA. P. 18-21.
4. **Кодочигов, Н.Г.** Экспериментальные исследования материалов пар трения для резервных подшипников турбомшины модульного гелиевого реактора с газовой турбиной ГТ-МГР / Н.Г. Кодочигов [и др.] // Вопросы материаловедения. 2006. №2(46). С. 199-203.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

M.N. Borovkov, S.E. Belov, E.G. Novinskiy

DEVELOPMENT OF THE GT-MHR VERTICAL TURBOMACHINE CATCHER BEARINGS

The authors would like to present the R&D Program on development of catcher bearings for the GT-MHR turbomachine as well as some results of performed work. The experience that might be obtained as a result of this investigation program implemented might be useful for other engineering branches related to development of dynamic machines.

Key words: electromagnetic bearing, catcher bearing, power conversion unit, turbomachine, friction pair materials, segment, dumper unit.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК: 629.331

Ю.И. Молев¹, Д.Н. Прошин²

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАКСИМАЛЬНО-ДОПУСТИМОЙ РАЗНИЦЫ В ВЕЛИЧИНАХ КОЭФФИЦИЕНТОВ СЦЕПЛЕНИЯ КОЛЁС ПЕРЕДНЕЙ И ЗАДНЕЙ ОСЕЙ АВТОМОБИЛЯ С ДОРОГОЙ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩИХ УСТОЙЧИВОСТЬ АТОМОБИЛЯ ПРИ ТОРМОЖЕНИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Волжский государственный инженерно-педагогический университет²

Рассматриваются особенности торможения автомобиля, оснащённого разными типами шин на передней и задней осях, выработаны требования к максимально допустимой разнице в величинах коэффициентов сцепления передних и задних колес с дорогой, обеспечивающие безопасность выполнения данного манёвра.

Ключевые слова: торможение, устойчивость, коэффициент сцепления.

В ближайшее время одним из приоритетных направлений развития народного хозяйства будет являться повышение безопасности дорожного движения. Одним из путей снижения аварийности на наших дорогах является анализ действия водителей при возникновении опасности для движения и определение поведения автомобиля (управляемости) при контраварийных манёврах. Так, одним из средств, повышающих управляемость транспортных средств при экстренном торможении, является опережающее блокирование колёс передней оси по отношению к задней. Данное условие выполняется применением специальных устройств тормозной системы, наиболее распространёнными из которых являются регулятор тормозных сил или блок управления ABS. При этом данные устройства конструируются на заводах с учётом, что на передних и задних осях установлены одинаковые шины, которые имеют примерно одинаковый коэффициент сцепления колеса с дорогой. Именно в такой комплектации и покидают автомобили территорию завода. Однако в период эксплуатации действующими нормативными документами допускается устанавливать на разные оси автомобиля различные шины, коэффициент сцепления с дорогой которых может быть различным [6]. Покажем как влияет разница в данном параметре между колёсами задней и передней оси автомобиля на устойчивость транспортных средств при торможении. Общая схема торможения автомобиля представлена на рис. 1.

Величина сцепного веса для разных типов автомобиля, условий загрузки различна. Так, для нерегулируемой тормозной системы его значение может быть найдено из условия [10]

$$m(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{h}{b}(\varphi_0 - \varphi)}, & \text{где } \varphi < \varphi_0, \\ \frac{1}{1 + \frac{h}{b}(\varphi_0 + \varphi)}, & \text{где } \varphi > \varphi_0, \end{cases} \quad (1)$$

где φ_0 – коэффициент сцепления, при котором происходит одновременная блокировка колёс передней и задней оси, определяемый из уравнения

$$\varphi_0 = \frac{\frac{a}{L}(1+k) - k}{\frac{h}{L}(1+k)}, \quad (2)$$

где k – соотношение тормозных сил по осям автомобиля. Для регулируемой тормозной системы на начальном этапе происходит изменение сцепного веса по зависимости 1, а после срабатывания регулятора – по следующей зависимости:

$$m(\varphi) = \begin{cases} \frac{1}{1 + \frac{h}{b}(\varphi_0 - \varphi)}, & \text{где } \varphi < \varphi_0, \\ \frac{1 + \frac{\varphi_0 \varphi_1}{\varphi}}{1 + \frac{h}{b}|\varphi_1 + \varphi_0 - \varphi|} & \text{где } \varphi > \varphi_0, \end{cases} \quad (3)$$

где φ_1 – максимальный расчётный коэффициент сцепления, при котором происходит одновременная блокировка колёс передней и задней оси, согласно п. 3.1.2.1 прил. 10 ГОСТ Р 41.13-99 (по Правилам ЕЭК ООН № 13 для легковых автомобилей должно быть не более 0,15). Для автомобилей, оснащённых антиблокировочной тормозной системой, $m(\varphi) > 0,75$ [1, 2].

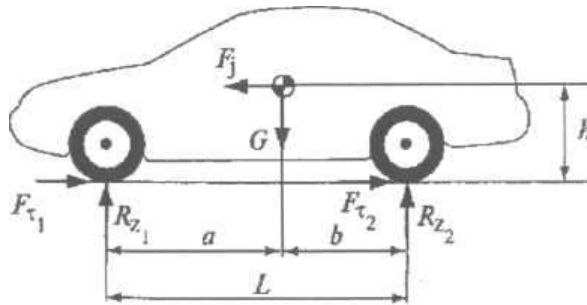


Рис. 1. Силы, действующие на автомобиль при торможении:

G – вес автомобиля, R_{z1} – нормальная реакция дороги на переднем мосту; R_{z2} – нормальная реакция дороги на заднем мосту; $F_{\tau 1}$ – тормозная сила, действующая на передний мост; $F_{\tau 2}$ – тормозная сила, действующая на задний мост; F_j – сила инерции автомобиля; L – база автомобиля; h – высота центра тяжести; a, b – расстояние от центра масс до передней и задней осей соответственно

Автором [10] были получены зависимости по определению времени достижения колёс грани блокирования:

$$\begin{cases} t_{11} = \frac{G_1 \varphi}{B_1 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k) K_0 \right]} \\ t_{12} = \frac{G_2 \varphi k}{B_2 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k) K_0 \right]} \end{cases} \text{ - для нерегулируемой тормозной системы} \quad (4)$$

$$\begin{cases} t_{11} = \frac{\frac{G_1 \varphi}{B_1} + \frac{h}{L} \varphi \left[k(1-W) \frac{M_{\alpha} g \varphi}{B_1 + B_2} \right]}{B_1 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k) K_0 \right]} \\ t_{12} = \frac{G_2 \varphi k}{B_2 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k) K_0 \right]} \end{cases} \text{ - для тормозной системы с регулятором тормозных сил} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} t_{11} = \frac{G_1 \varphi \xi_1}{B_1 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi \xi_1 (1+k) K_0 \right]} \\ t_{12} = \frac{M_{\alpha} g \varphi \xi_2}{B_2 K_0} - \frac{G_1 \varphi \xi_1}{B_2 K_0 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi \xi_1 (1+k) \right]} \end{array} \right. \quad \text{- для автомобилей с АБС.} \quad (6)$$

ξ_1 и ξ_2 – коэффициенты качества работы АБС соответственно для передней и задней осей автомобиля; B_1 и B_2 – коэффициенты преобразования давления в тормозной магистрали в величину развиваемого тормозного усилия соответственно.

В данных уравнениях под W – понимается коэффициент передачи РТС, определяемый из условия:

$$W = \frac{k - \frac{h}{L} \varphi_1 (1+k)}{k \left[1 + \frac{h}{L} \varphi_1 (1+k) \right]}. \quad (7)$$

Определить предельно допустимую разницу в коэффициентах сил сцепления колёс передней и задней осей можно, воспользовавшись уравнениями (5) и (6) (в связи с отсутствием актуальности расчёта параметров нерегулируемой тормозной системы как практически не применяемой в настоящее время) путём приравнивания времени достижения блокировки колёс передней и задней оси:

- для системы с регулятором тормозных сил:

$$\frac{\frac{G_1 \varphi}{B_1} + \frac{h}{L} \varphi \left[k(1-W) \frac{M_{\alpha} g \varphi}{B_1 + B_2} \right]}{B_1 K_0 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi_1 (1+k) \right]} = \frac{G_2 (\varphi + \Delta \varphi) k}{B_2 K_0 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k) \right]} \quad (8)$$

- для системы с АБС

$$\frac{G_1 \varphi \xi_1}{B_1 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi \xi_1 (1+k) K_0 \right]} = \frac{M_{\alpha} g \varphi \xi_2}{B_2 K_0} - \frac{G_1 \varphi \xi_1}{B_2 K_0 \left[1 - \frac{h}{L} \varphi \xi_1 (1+k) \right]}. \quad (9)$$

Тогда допустимая разница в величинах сцепления колёс передней и задней оси может быть найдена из уравнений (8) и (9) путём математических преобразований:

$$\Delta \varphi = \frac{\frac{G_1 \varphi}{B_1} + \frac{h}{L} \varphi \left[k(1-W) \frac{M_{\alpha} g \varphi}{B_1 + B_2} \right] B_2}{B_1 G_2 k} \left(\frac{1 - \frac{h}{L} \Delta \varphi (1+k)}{1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k)} + 1 \right) - \varphi \quad (10)$$

$$\Delta \varphi = \frac{\frac{G_1 \varphi}{B_1} + \frac{h}{L} \varphi \left[k(1-W) \frac{M_{\alpha} g \varphi}{B_1 + B_2} \right] B_2}{B_1 G_2 k} \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k)} + 1 \right) - \varphi; \quad (11)$$

$$1 + \frac{\frac{G_1 \varphi}{B_1} + \frac{h}{L} \varphi \left[k(1-W) \frac{M_{\alpha} g \varphi}{B_1 + B_2} \right] B_2}{B_1 G_2 k} \left(\frac{\frac{h}{L} (1+k)}{1 - \frac{h}{L} \varphi (1+k)} + 1 \right)$$

Учитывая, что $B_1 = W(B_1 + B_2)$, а $B_2 = (1-W)(B_1 + B_2)$, получим

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{G_1\varphi}{B_1} + \frac{h}{L}\varphi[k(1-W)^2G\varphi]}{B_1G_2k} \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right) - \varphi \quad (12)$$

$$1 + \frac{\frac{G_1\varphi}{B_1} + \frac{h}{L}\varphi[k(1-W)^2G\varphi]}{B_1G_2k} B_2 \left(\frac{\frac{h}{L}(1+k)}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right)$$

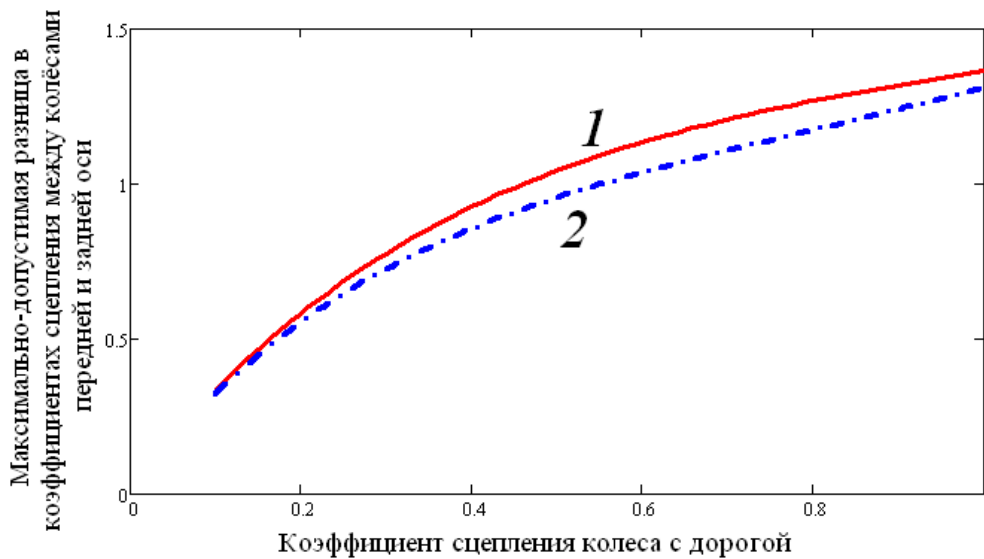


Рис. 2. Зависимость между максимально возможной разницей коэффициентов сцепления колёс передней и задней осей автомобиля от минимального значения величины сцепления: 1 – легковые автомобили; 2 – грузовые

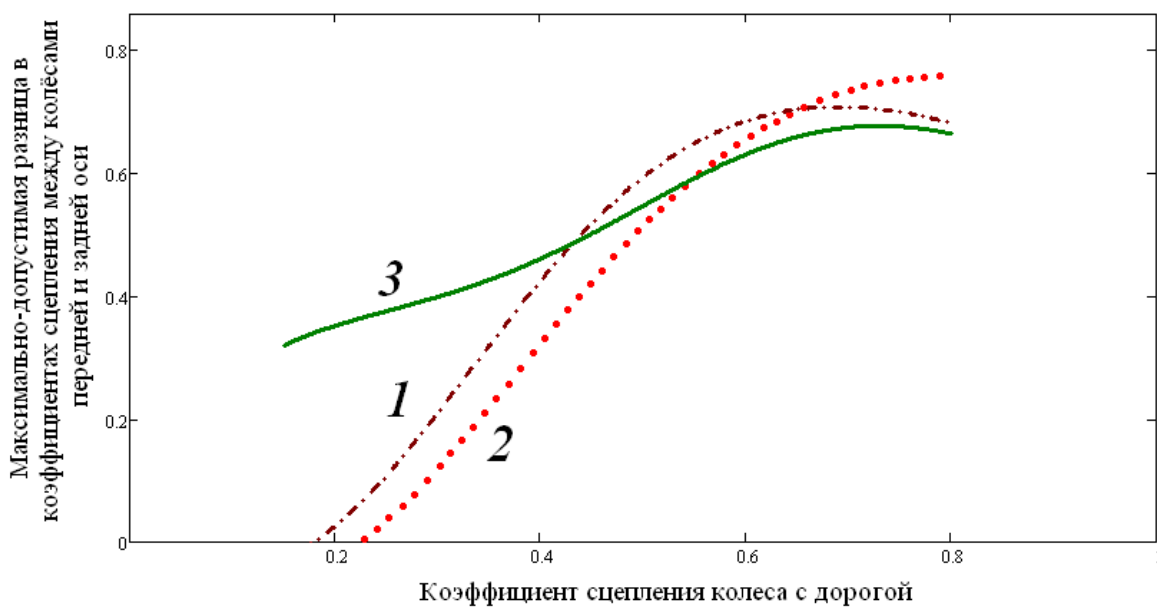


Рис. 3. Зависимость между максимально возможной разницей между коэффициентами сцепления колёс передней и задней осей автомобиля от минимального значения величины сцепления: 1 – легковые автомобили; 2 – грузовые автомобили; 3 – легковые автомобили, оснащённые АБС

С учётом того, что тормозное усилие на передней оси ограничивается только коэффициентом сцепления колеса с дорогой $B_1 P_0 = G_1 \varphi$, получим

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{P_0 + \frac{h}{L}\varphi [k(1-W)^2 G\varphi]}{B_1 G_2 k} \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right) - \varphi}{1 + \frac{P_0 + \frac{h}{L}\varphi [k(1-W)^2 G\varphi] B_2 \left(\frac{\frac{h}{L}(1+k)}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right)}{B_1 G_2 k}}. \quad (13)$$

$$\Delta\varphi = \frac{\frac{G\varphi W + \frac{h}{L}\varphi [k(1-W)^2 G\varphi]}{B_1 G_2 k} \left(\frac{1}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right) - \varphi}{1 + \frac{G\varphi W + \frac{h}{L}\varphi [k(1-W)^2 G\varphi] B_2 \left(\frac{\frac{h}{L}(1+k)}{1 - \frac{h}{L}\varphi(1+k)} + 1 \right)}{B_1 G_2 k}}. \quad (14)$$

Решение данного уравнения для ряда автомобилей показано на рис. 2 и рис. 3. Полученные данные свидетельствуют о том, что максимальную опасность представляют торможения на дорогах с невысоким коэффициентом сцепления. При этом максимальная разница в коэффициентах сцепления, обеспечивающая отсутствие заноса транспортных средств будет составлять 0,3 для автомобилей с АБС и 0 для автомобилей, оснащённых регуляторами тормозных сил.

Полученные данные позволят разработать новые требования к транспортным средствам, находящимся в эксплуатации, и сократить количество дорожно-транспортных происшествий, обусловленных заносом (потерей управляемости транспортных средств при торможении).

Библиографический список

1. **ГОСТ Р 41.13-99** (Правило ЕЭК ООН № 13) Введ. 2000-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 27 с.
2. **ГОСТ Р 41.13Н-99** (Правило ЕЭК ООН № 13Н) Введ. 2000-07-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 13 с.
3. **ГОСТ Р 51709-2001** Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки. Введ. 2002-01-01. – М.: Изд-во стандартов, 1999. – 42 с.
4. Динамика системы дорога – шина – автомобиль – водитель / под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
5. **Иларионов, В.А.** Экспертиза дорожно-транспортных происшествий / В.А. Иларионов. – М.: Транспорт, 1989.
6. Основные положения по допуску транспортных средств к эксплуатации и обязанности должностных лиц по обеспечению безопасности дорожного движения (Утверждены Постановлением Совета Министров Правительства РФ от 23.10.1993 г. № 1090 в редакции Постановлений Правительства РФ от 21.04.2000 № 370, от 24.01.2001 № 67, от 21.02.2002 № 127, от 07.05.2003 № 265, от 25.09.2003 № 595, от 14.12.2005 № 767, от 28.02.2006 № 109, от 16.02.2008 № 84, от 19.04.2008 № 287, от 27.01.2009 № 28).
7. **РД 37.001.109-89.** Инспекционные испытания автотранспортных средств. Программа и методы испытаний. – Дмитров: НИИЦАМТ, 1989. – 53 с.

8. **РД 37.001.118-89.** Типовая методика эксплуатационных испытаний автотранспортных средств в умеренной климатической зоне. – Дмитров: НИИЦАМТ, 1989.-10 с.
9. **Рябчинский, А.И.** Устойчивость и управляемость автомобиля и безопасность дорожного движения: учеб. пособие / А. И. Рябчинский, В. З. Русаков, В. В. Карпов. – Шахты: МАДИ ГТУ, 2003. – 176 с.
10. **Соцков Д.А.** Повышение активной безопасности автотранспортных средств при торможении. Дисс. ... д-ра техн. наук. 05.05.03. – Владимир, 1988. – 547с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

Y.I. Molev, D.N. Proshin

**DETERMINATION OF MAXIMUM ALLOWED DIFFERENCE BETWEEN GRIP
OF THE FRONT AND REAR CAR WHEELS, FOR ENSURE STABILITY
WHEN DRIVER IS BRAKING**

This article has devoted of problems traffic safety, namely - stability car when driver is braking when automobile has armed by different type of tire.

Key words: braking, stability, grip.

УДК 629.113

Л.Н Орлов, А.М. Грошев, А.В. Тумасов

**РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НЕСУЩИХ СИСТЕМ
АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ С ВНЕСЕННЫМИ
В ИХ КОНСТРУКЦИЮ ИЗМЕНЕНИЯМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты расчетной оценки прочности и пассивной безопасности несущих систем автотранспортных средств, в конструкцию которых были внесены изменения. Рассмотрены методы компьютерного моделирования аварийных ситуаций, имитирующих условия сертификационных испытаний, а также инженерный метод расчета кузовов и кабин, позволяющий проводить экспресс оценку их пассивной безопасности.

Ключевые слова: несущая конструкция, прочность, пассивная безопасность, расчетная оценка

Существующими законодательными документами предусмотрено внесение изменений в конструкцию транспортного средства при условии сохранения или улучшения его эксплуатационных свойств и обеспечения безопасности дорожного движения. Поэтому при изменении несущей системы автотранспортного средства необходимо обеспечить ее прочность, жесткость и пассивную безопасность. В этой связи при выдаче заключения о возможности внесения изменений в конструкцию автомобиля является актуальным проведение экспертной оценки модифицированной несущей системы на соответствие существующим требованиям. Наиболее эффективным в этом случае является применение расчетных методов оценки прочности и пассивной безопасности, которые в настоящее время получили широкое распространение на стадии проектирования и доводки кузовных конструкций автомобилей [1-3]. Они начинают широко внедряться и в процесс экспертной деятельности при проведении сертификации кузовов и кабин. Накопленный опыт работ, существующие возможности математического и программного обеспечений позволяют утверждать, что расчетные методы оценки пассивной безопасности кузовных конструкций автотранспортных средств должны быть неотъемлемой частью их сертификационной оценки.

Как правило, изменения, вносимые владельцами транспортных средств, представляют собой незавершенные решения, и часто требуют доводки или кардинальных изменений. Поэтому важное практическое значение имеют работы, проводимые на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева совместно с Центром безопасности дорожного движения и технической экспертизы (ЦБДДТЭ) и Некоммерческого партнерства «Институт сертификации автототехники» (НП ИНСАТ), в области расчетного анализа и компьютерного моделирования поведения измененных конструкций при действии на них аварийных и эксплуатационных нагрузок. Определенный практический интерес представляют результаты работы, выполненной по оценке прочности и пассивной безопасности измененной конструкции кузова автобуса, связанной с заменой заднего аварийного выхода на дополнительную служебную дверь в правой боковине кузова. Оценка пассивной безопасности автобуса была выполнена по результатам компьютерного моделирования динамического нагружения кузова в условиях, имитирующих опрокидывание автобуса с уступа высотой 0,8м, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 41.66-99 (Правил ЕЭК ООН №66).

Современные программные комплексы позволяют воспроизвести все условия, возникающие в процессе реального опрокидывания автобуса. Тем не менее, для уменьшения времени на подготовку расчетной модели и ее последующий расчет, допускается рассматривать эквивалентные условия нагружения кузова. Например, ударное воздействие на кузов при оп-

рокидывании автобуса на опорную поверхность можно представить в виде нагружения модели со стороны левой боковины жесткой плитой, имеющей определенные массу и начальную скорость (рис. 1, а). При этом компьютерное моделирование аварийного нагружения позволяет получить полный массив информации о процессе аварийного нагружения: график изменения скорости ударной плиты, график изменения нагрузки, напряженно-деформированное состояние модели. Для примера, на рис. 1, б показан деформированный вид поперечных сечений салона и контуры регламентированной зоны безопасности (остаточного жизненного пространства).



Рис. 1. Моделирование опрокидывания автобуса:

а – схема нагружения модели кузова автобуса;
б – деформации модели кузова и зона безопасности

Из рис. 1, б видно, что измененная конструкция кузова автобуса удовлетворяет существующим требованиям нормативных документов, поскольку элементы деформированной боковины не заходят в зону безопасности. Комплексное рассмотрение результатов статических и динамических расчетов позволило установить, что измененная конструкция кузова с дополнительной служебной дверью имеет необходимый уровень прочности и пассивной безопасности.

Не менее интересными являются результаты работы, выполненной по повышению безопасности измененной конструкции кабины грузового автомобиля с введенным спальным отсеком (рис. 2, а). На рис. 2, б показана схема расположения дополнительных силовых элементов каркаса кабины. Согласно ГОСТ Р 41.29-99 (Правилам ЕЭК ООН №29, условиям испытания типа В), крыша кабины должна выдерживать статическую нагрузку, соответствующую максимальной разрешенной массе транспортного средства, приходящейся на переднюю ось. В соответствии с испытаниями типа С, кабина должна выдерживать статическую нагрузку, равную 2кН на тонну разрешенной массы груза, прикладываемую к задней стенке. Расчетная оценка пассивной безопасности была выполнена по результатам анализа напряженно-деформированного состояния модели измененной конструкции кабины грузового автомобиля от действия нагрузок, имитирующих рассматриваемые условия испытаний.

Компьютерное моделирование условий аварийного нагружения кабины позволило получить необходимые для анализа графики изменения нагрузки в зависимости от линейного перемещения нагружающей плиты. Для примера на рис. 3 показаны результаты расчета кабины при вертикальном нагружении (имитация условий испытаний типа В). Из графика изменения нагрузки видно, что предельное значение разрушающей нагрузки превышает регламентируемое значение, показанное штриховой линией. При этом в кабине сохраняется необходимое остаточное пространство безопасности. Результаты расчета также показали, что и при нагружении задней стенки кабины ее конструкция имеет необходимый запас по несущей способности.

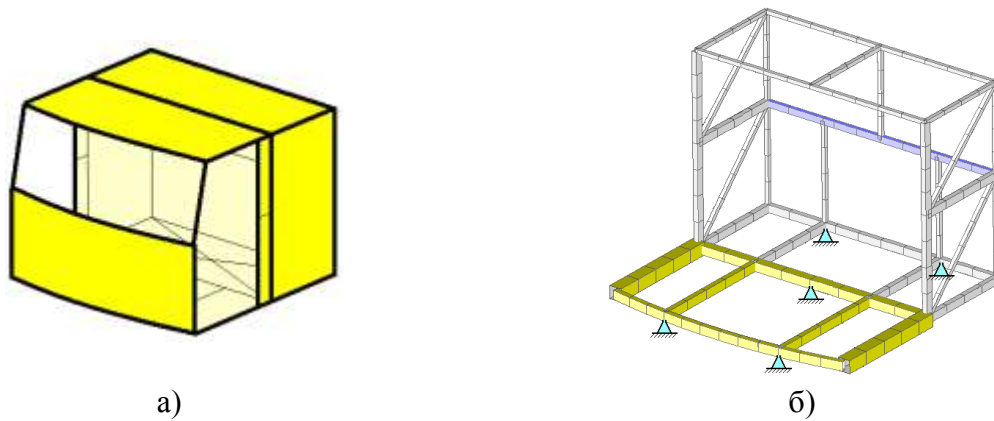


Рис. 2. Силовая схема модифицированной конструкции кабины:
a – схема измененной конструкции кабины грузового автомобиля;
б – схема расположения дополнительных силовых элементов каркаса кабины

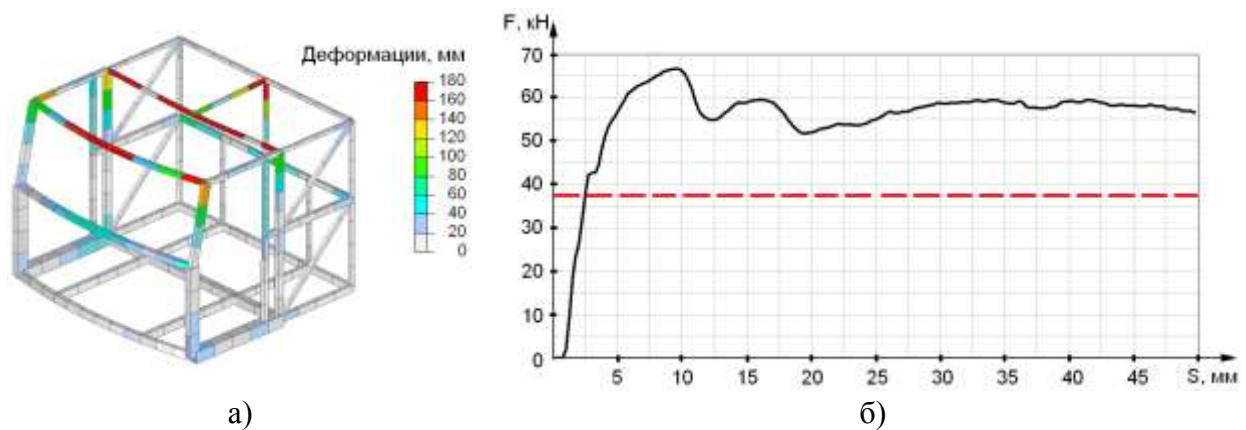


Рис. 3. Результаты компьютерного моделирования вертикального нагружения кабины:
a – деформированное состояние модели;
б – график изменения нагрузки F в зависимости от вертикального перемещения плиты S

Таким образом, было установлено, что измененная конструкция кабины удовлетворяет требованиям нормативных документов. Полученные результаты явились основанием для выдачи заключения о правомерности внесенных в конструкцию кабины изменений.

Не менее важными являются работы по расчетной оценке прочности и пассивной безопасности кузовов легковых автомобилей. С этой точки зрения интересными представляются результаты выполненной оценки пассивной безопасности трубчатого каркаса кузова легкового автомобиля со съемным верхом (см. рис. 4) в условиях возможного опрокидывания.

Условия испытания кузовов на безопасность при опрокидывании легковых автомобилей с открывающимся или съемным верхом регламентируются ОСТ 37.001.444-86. Условие опрокидывания автомобиля имитируется ударом плиты (рис. 5) в передний левый угол крыши ($M_{\text{плиты}} = 60\% M_{\text{сн}}$, $V_{\text{плиты}} = 2,4 \dots 2,5$ м/с).

По результатам компьютерного моделирования были выявлены зоны пластических деформаций (см. рис. 6, *a*), определен механизм разрушения каркаса, получен график зависимости перемещения ударной плиты от времени t (рис. 6, *б*). Анализ результатов показал, что деформации переднего угла крыши находятся в допустимых пределах ($S_{\text{max}} < 130$ мм). При этом силовые элементы каркаса полностью поглощают энергию удара.



Рис. 4. Общий вид измененной конструкции кузова

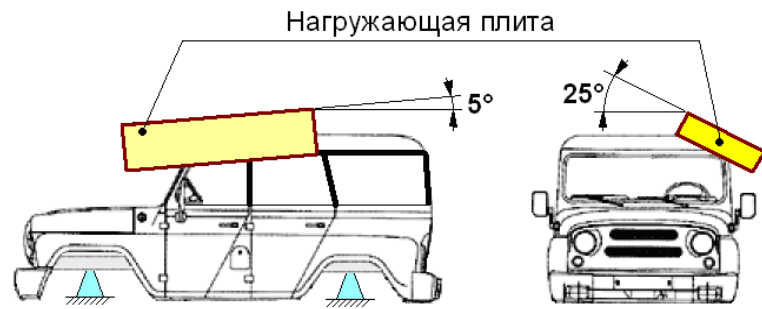


Рис. 5. Схема нагружения кузова автомобиля, имитирующего его опрокидывание

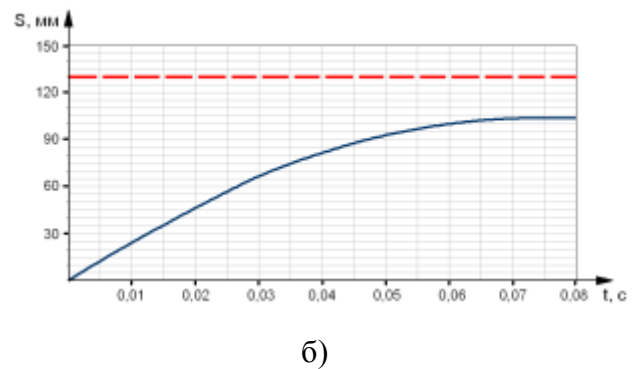
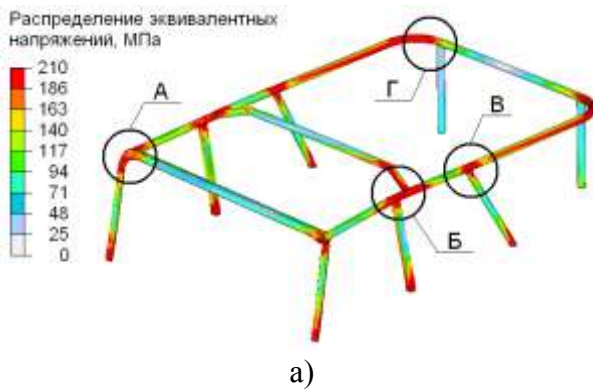


Рис. 6. Результаты компьютерного моделирования условий опрокидывания: а – деформации каркаса; б – зависимость перемещения плиты S от времени удара t

Полученные результаты расчетов явились основанием для выдачи заключения о возможности внесения соответствующих изменений в конструкцию кузова. Кроме того, были предложены практические рекомендации по надежному соединению каркаса с силовыми элементами кузова, позволяющие существенно усилить конструкцию, обеспечив достаточный запас прочности и пассивной безопасности на весь срок эксплуатации транспортного средства

Оценка пассивной безопасности конструкции может быть также выполнена на основе инженерного метода, разработанного учеными кафедры «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева [4, 5]. Метод используется для расчетов кузовных конструкций за пределами упругости с целью определения их несущей способности по разрушающим нагрузкам и оценки пассивной безопасности.

Основное уравнение инженерного метода расчета конструкций по предельному состоянию можно записать в виде равенства работ внешних сил δA и внутренних усилий δU на возможных вариациях перемещений

$$\delta A = \delta U, \quad \sum_{j=1}^K F_{pj} \delta S_j = \sum_{i=1}^m Q_i \delta \theta_i, \quad (1)$$

где S_j – деформация конструкции по направлению действия j -й внешней разрушающей силы F_{pj} ; θ_i – угол относительного поворота силовых элементов в i -м пластическом шарнире.

В случае учета действия в пластических шарнирах только изгибающих моментов при воздействии одной аварийной нагрузки, уравнение (1) запишется в виде

$$\int_0^S F_p dS = \sum_{i=1}^{n+1} M_{плш} \delta \theta_i, \quad (2)$$

где n – степень статической неопределимости конструкции.

Предельный пластический момент $M_{\text{пл}}$ вычисляется по формулам:

$$M_{\text{пл}} = \int_F \sigma y dF; \quad M_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^m A_i |y_i + \Delta| \sigma_T, \quad (3)$$

где A_i – элементарная площадка (стенка) тонкостенного сечения (рис. 7); y_i – расстояние от центра тяжести i -й площадки до нейтральной оси сечения н-н; Δ – смещение линии равных площадей $f-f$ сечения относительно нейтральной оси; σ_T – предел текучести материала. Следует отметить, что во второй формуле (3) первый множитель представляет собой пластический момент сопротивления сечения

$$W_{\text{пл}} = \sum_{i=1}^m A_i |y_i + \Delta|. \quad (4)$$

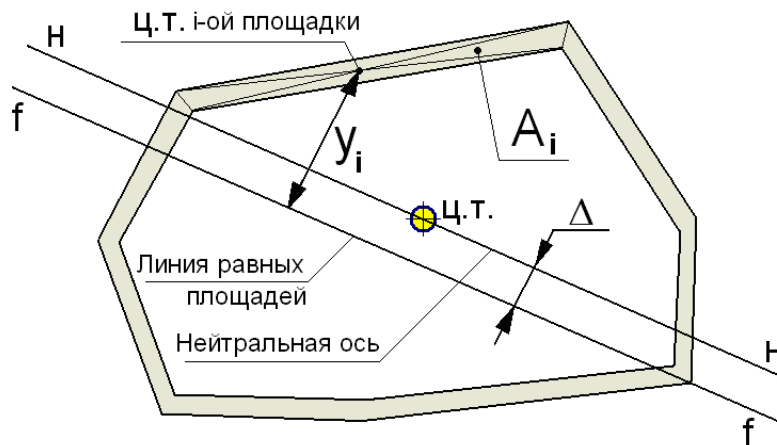


Рис. 7. Схема произвольного тонкостенного сечения

Для примера можно рассмотреть работу, выполненную специалистами кафедры «Автомобили и тракторы» и ЦБДДТЭ, целью которой являлась экспресс оценка пассивной безопасности кузова микроавтобуса в условиях опрокидывания на соответствие требованиям Правил ЕЭК ООН №66. На рис. 8 показаны зоны предполагаемого возникновения пластических шарниров в силовых элементах кузова в результате действия аварийной нагрузки, имитирующей воздействие, возникающее при опрокидывании автомобиля. На рис. 9 показаны механизмы разрушения силовых контуров заднего дверного проема и средней части кузова (рис. 9, а), вертикальных стоек, расположенных над колесными арками (рис. 9, б), и силового контура лобового окна (рис. 9, в).

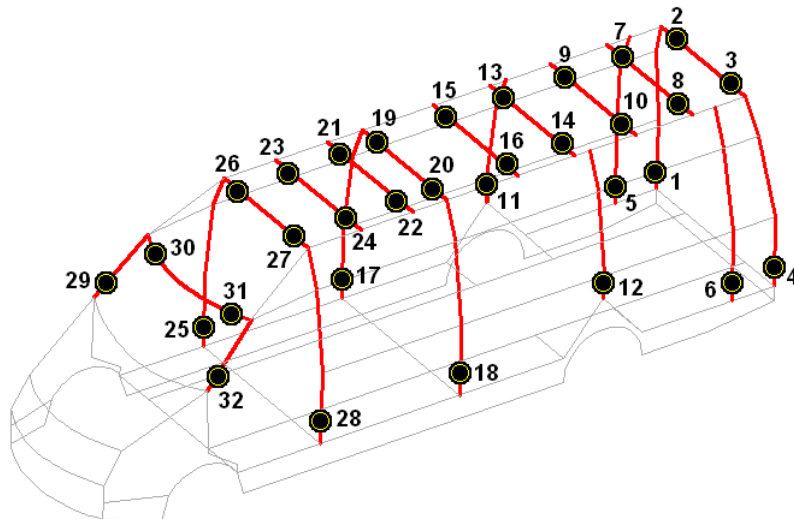


Рис. 8. Зоны предполагаемого возникновения пластических шарниров

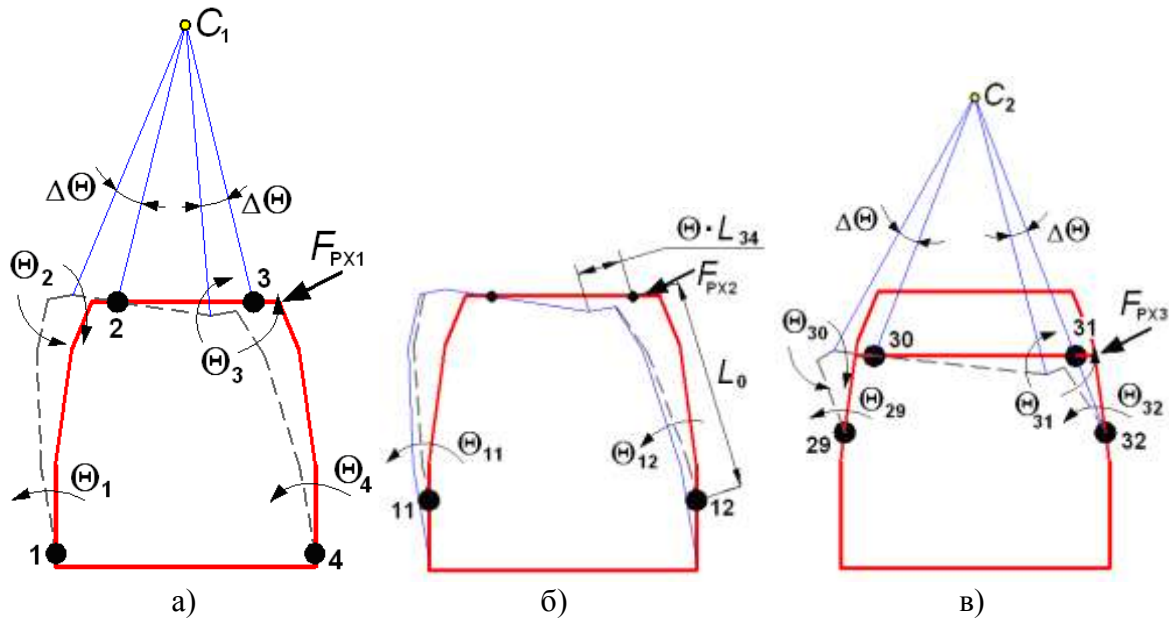


Рис. 9. Механизмы разрушения характерных силовых контуров

Выражение суммарной разрушающей нагрузки для рассматриваемой конструкции имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 F_{PX} = & 2 \left(\frac{\sigma_{T1} W_{ПЛ1} + \sigma_{T2} W_{ПЛ2} \left(1 + \frac{L_{3-4}}{L_{C1-3}}\right)}{L_{3-4}} \right) + \frac{8\sigma_{T2} W_{ПЛ7} \left(1 + \frac{L_{3-4}}{L_{C1-3}}\right)}{L_{3-4}} + \\
 & + 2\sigma_{T1} \frac{W_{ПЛ5} + W_{ПЛ7} + W_{ПЛ1} \frac{L_{3-4}}{L_0}}{L_{3-4}} + 2\sigma_{T2} \left(\frac{W_{ПЛ29} + W_{ПЛ30} \left(1 + \frac{L_{CT} \cdot \cos 45^\circ}{L_{C2-31}}\right)}{L_{CT} \cdot \cos 45^\circ} \right), \quad (5)
 \end{aligned}$$

где σ_{Ti} – предел текучести материала отдельных силовых участков; $W_{ПЛi}$ – пластические моменты сопротивлений сечений в предполагаемых зонах появления пластических шарниров; L_i – характерные длины конструкции.

Результаты расчета показали, что рассматриваемая кузовная конструкция имеет 10% запас по несущей способности с точки зрения восприятия аварийной разрушающей нагрузки и энергии удара в условиях опрокидывания. Это позволило сделать вывод о соответствии конструкции микроавтобуса требованиям Правил ЕЭК ООН №66.

Таким образом, выполняемые на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ, ЦБДДТЭ и НП ИНСАТ расчетные исследования предлагаемых измененных конструкций транспортных средств позволяют давать объективную оценку их работоспособности, повышать их прочность и пассивную безопасность. Правомерность и обоснованность использования результатов расчетов для оценки пассивной безопасности автомобилей подтверждены практикой их применения ведущими автомобильными заводами, фирмами, научно-исследовательскими организациями, учеными и специалистами, занимающимися вопросами исследования работоспособности кузовных конструкций в аварийных ситуациях.

Библиографический список

1. Тумасов, А.В. Сравнительная оценка жесткости и прочности удлиненного кузова легкового автомобиля с базовым вариантом / А.В. Тумасов, Л.Н. Орлов, А.М. Грошев [и др.] // Проекти-

- рование, испытания, эксплуатация транспортных машин и транспортно-технологических комплексов: сб. материалов международной научно-технической конференции / НГТУ. – Н.Новгород, 2005. С. 82-85.
2. **Тумасов, А.В.** Расчетная оценка прочности и пассивной безопасности измененной конструкции кабины грузового автомобиля ЗИЛ-43100 / А.В. Тумасов, Е.А. Наумов, Л.Н. Орлов, А.М. Грошев // Проблемы и достижения автотранспортного комплекса: сб. материалов V Всероссийской научно-технической конференции / УГТУ-УПИ. – Екатеринбург, 2006. С. 165-167.
 3. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.]; под. ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2009. – 153 с.
 4. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. Н. Новгород, 2005. – 230 с.
 5. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин, автотранспортных средств. Методы расчета и оценки: учеб. пособ. / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

L.N. Orlov, A.M. Groshev, A.V. Tumasov

CALCULATIVE ESTIMATION OF PASSIVE SAFETY OF VEHICLES BEARING STRUCTURES WHICH CONSTRUCTIONS WERE CHANGED OR MODIFIED

The article deals with the problem of calculative estimation of stiffness and passive safety of vehicles bearing structures that were changed or modified. Methodology of computer simulation of crash situations that are equal to the certification tests is shown in the paper. The engineering method of rapid estimation of cabs and automobiles body structures passive safety is also described in the article.

Key words: bearing structure, stiffness, passive safety, calculative estimation.

УДК 621.43

Н.А Кузьмин¹, В.В. Зеленцов¹, И.О. Донато²**ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ В АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЯХ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Управление автомагистрали “Москва - Н.Новгород”²

Одним из резервов повышения показателей эксплуатационной надежности ДВС является снижение отложений нагаров, лаков и осадков на поверхностях их деталей, контактирующих с моторным маслом. В основе их образования лежат процессы старения масел (окисление углеводов, входящих в состав масляной основы). Определяющее влияние на процессы окисления масла в двигателях, на образование отложений и эффективность работы ДВС в целом оказывает тепловой режим теплонагруженных деталей.

Ключевые слова: температура, поршень, цилиндр, моторное масло, отложения, нагар, лак, работоспособность, надежность.

Отложения на поверхностях деталей ДВС делятся на три основных вида – нагары, лаки и осадки (шламы) [1, 2].

Нагар – твердые углеродистые вещества, откладывающиеся во время работы двигателя на поверхностях камеры сгорания (КС). При этом отложения нагаров, главным образом, зависят от температурных условий даже при аналогичном составе смеси и одинаковой конструкции деталей двигателей. Нагар оказывает весьма существенное влияние на протекание процесса сгорания топливоздушнoй смеси в двигателе и на долговечность его работы. Почти все виды ненормального сгорания (детонационное сгорание, калильное воспламенение и прочие) сопровождаются тем или иным влиянием нагара на поверхностях деталей, образующих КС.

Лак – продукт изменения (окисления) тонких масляных пленок, растекающихся и покрывающих детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ) двигателя под действием высоких температур. Наибольший вред для ДВС наносит лакообразование в зоне поршневых колец, вызывая процессы их закоксовывания (залегания с потерей подвижности). Лаки, откладывающиеся на поверхностях поршня, контактирующих с маслом, нарушают должную теплопередачу через поршень, ухудшают теплоотвод от него.

На количество осадков (шлатов), образующихся в ДВС, решающее влияние оказывает качество моторного масла, температурный режим деталей, конструктивные особенности двигателя и условия эксплуатации. Отложения этого типа наиболее характерны для условий зимней эксплуатации, интенсифицируются при частых пусках и остановках двигателя.

Тепловое состояние ДВС оказывает определяющее влияние на процессы образования различных видов отложений, прочностные показатели материалов деталей, выходные эффективные показатели двигателей, процессы изнашивания поверхностей деталей. В этой связи необходимо знать пороговые значения температур деталей ЦПГ, по крайней мере, в характерных точках, превышение которых приводит к указанным ранее негативным последствиям.

Температурное состояние деталей ЦПГ ДВС целесообразно анализировать по значениям температур в характерных точках, расположение которых показано на рис. 1 [1].

Значения температур в данных точках следует учитывать при производстве, испытаниях и доводке двигателей для оптимизации конструкций деталей, при выборе моторных масел, при сравнении тепловых состояний различных двигателей, при решении целого ряда других технических проблем конструирования и эксплуатации ДВС.

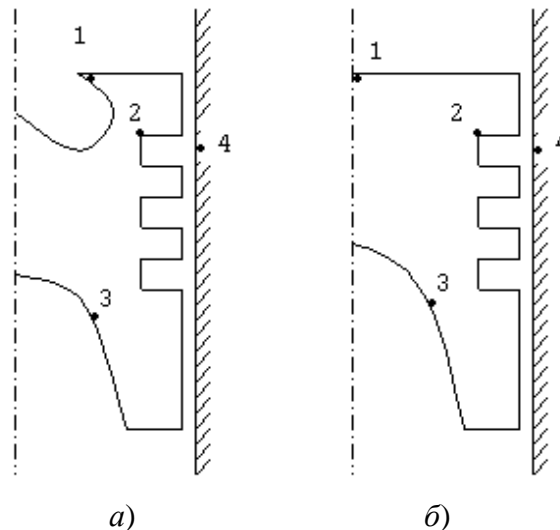


Рис. 1. Характерные точки цилиндра и поршня ДВС при анализе их температурного состояния для дизельных (а) и бензиновых (б) двигателей

Эти значения имеют критические уровни:

1. Максимальное значение температур в точке 1 (в дизельных двигателях – на кромке КС, в бензиновых – в центре доньшка поршня) не должно превышать 350°C (кратковременно, 380°C) для всех серийно применяемых в автомобильном двигателестроении алюминиевых сплавов, иначе происходит оплавление кромок КС в дизелях и, нередко, прогар поршней в бензиновых двигателях. Ко всему прочему высокие температуры огневой поверхности днища поршня вызывают образование нагаров высокой твердости на этой поверхности. В практике двигателестроения это критическое значение температуры удается повышать путем добавления в поршневой сплав кремния, бериллия, циркония, титана и других элементов. Недопущение превышения критических значений температур в этой точке, равно как и в объемах деталей ДВС, обеспечивается также путем оптимизации их форм и правильной организацией охлаждения. Превышение температурами деталей ЦПГ двигателей допустимых значений обычно является основным сдерживающим фактором для форсирования их по мощности. По температурным уровням следует иметь определенный запас с учетом возможных экстремальных условий эксплуатации.

2. Критическое значение температур в точке 2 поршня – над верхним компрессионным кольцом (ВКК) – $250\text{...}260^{\circ}\text{C}$ (кратковременно, до 290°C). При превышении этой величины все массовые моторные масла коксуются (происходит интенсивное лакообразование), что приводит к «залеганию» поршневых колец, то есть потере их подвижности, и в результате – к существенному уменьшению компрессии, увеличению расхода моторного масла и др. [2].

3. Предельное максимальное значение температур в точке 3 поршня (точка расположена симметрично по сечению головки поршня на внутренней его стороне) – 220°C . При более высоких температурах на внутренней поверхности поршня происходит интенсивное лакообразование. Лаковые отложения, в свою очередь, являются мощным тепловым барьером, препятствующим теплоотводу через масло. Это автоматически приводит к повышению температур во всем объеме поршня, а значит, и на поверхности зеркала цилиндра.

4. Максимально допустимое значение температур в точке 4 (расположена на поверхности цилиндра, напротив места остановки ВКК в ВМТ) – 200°C . При его превышении моторное масло разжижается, что приводит к потере стабильности образования масляной пленки на зеркале цилиндра и «сухому» трению колец по зеркалу. Это вызывает интенсификацию молекулярно-механического изнашивания деталей ЦПГ.

С другой стороны, известно, что пониженная температура стенок цилиндра (ниже точки росы отработавших газов) способствует ускорению их коррозионно-механического изна-

шивания [1,2]. Ухудшается также смесеобразование и уменьшается скорость сгорания топливоздушная смеси, что снижает эффективность и экономичность работы двигателя, вызывая повышение токсичности отработавших газов. Также следует отметить, что при существенно заниженных температурах поршня и цилиндра сконденсированные водяные пары, проникающие в картерное масло, вызывают интенсивную коагуляцию примесей и гидролиз присадок с образованием осадков – «шламов». Эти осадки, загрязняя масляные каналы, сетки маслоотстойников, масляные фильтры, существенно нарушают нормальную работу смазочной системы.

На интенсивность протекания процессов образования отложений нагаров, лаков и осадков на поверхностях деталей ДВС существенно влияет старение моторных масел при их работе. Старение масел состоит в накоплении примесей (в том числе воды), изменении их физико-химических свойств и окислении углеводородов.

Изменение фракционного состава чистого залитого масла по мере работы двигателя вызывается в основном причинами, изменяющими состав его масляной основы и процентное соотношение присадок по отдельным составляющим (парафиновым, ароматическим, нафтеновым). К ним относятся:

- процессы термического разложения масла в зонах перегрева (например, в клапанных втулках, зонах верхних поршневых колец, на поверхностях верхних поясов зеркала цилиндров). Такие процессы приводят к окислению наиболее легких фракций масляной основы или даже их частичному выкипанию;
- добавление к углеводородам основы неиспарившегося топлива, попадающего в начальные периоды пусков (или при резком увеличении подачи топлива в цилиндры для осуществления ускорения автомобиля) в маслосборник картера через зону поршневых уплотнений;
- попадание в поддон картера или маслосборник двигателя воды, образующейся при сгорании топлива в КС цилиндров.

Если система вентиляции картера действует достаточно эффективно, а стенки картера находятся в подогретом состоянии до 90-95°C, вода не конденсируется на них и удаляется в атмосферу системой вентиляции картера. Если температура стенок картера существенно понижена, то попавшая в масло вода будет принимать участие в процессах его окисления. Количество сконденсировавшейся воды при этом может быть весьма значительным [2]. Даже если считать, что только 2% газов могут прорваться через все компрессионные кольца цилиндра, то через картер двигателя с рабочим объемом 2-2,5 л за каждые 1000 км пробега будет прокачиваться по 2 кг воды. Допустим, что 95% воды удаляется системой вентиляции картера, то все равно после пробега в 5000 км на 4,0 л моторного масла будет приходиться около 0,5 л H₂O. Эта вода при работе двигателя преобразуется антиокислительной присадкой, содержащейся в моторном масле, в примеси – кокс и золу.

По указанным ранее причинам необходимо поддерживать при работе двигателя температуру стенок картера достаточно высокой, а в случае необходимости – применять системы смазки с сухим картером и отдельным масляным баком.

Следует отметить, что мероприятия, замедляющие процессы изменения состава масляной основы, существенно замедляют образование нагара, лака и осадков, а также снижают интенсивность изнашивания основных деталей автомобильных двигателей [2].

Фракционный и химический состав масел может изменяться в достаточно широких пределах под влиянием различных факторов:

- характера сырья, зависящего от месторождения, свойств нефтяной скважины;
- особенностей технологии изготовления моторных масел;
- особенностей транспортировки и длительности хранения масел.

Для предварительной оценки свойств нефтепродуктов применяют различные лабораторные методы: определение кривой разгонки, температур вспышки, помутнения и застывания, оценку окисляемости в средах с различной агрессивностью и т.п.

В основе старения автомобильного моторного масла лежат процессы окисления, разложения и полимеризации углеводородов, которые сопровождаются процессами загрязнения масла различными примесями (нагаром, пылью, металлическими частичками, водой, топливом и пр.). Процессы старения существенно изменяют физико-химические свойства масла, приводят к появлению в нём разнообразных продуктов окисления и износа, ухудшают его эксплуатационные качества. Различают следующие виды окисления масла в двигателях: в толстом слое – в поддоне картера или в масляном баке; в тонком слое – на поверхностях горячих металлических деталей; в туманообразном (капельном) состоянии – в картере, клапанной коробке и т.п. При этом окисление масла в толстом слое даёт осадки в виде шлама, а в тонком слое – в виде лака.

Окисление углеводородов подчиняется теории перекисей А.Н. Баха и К.О. Энглера, дополненной П.Н. Черножуковым и С.Э. Крейном. Окисление углеводородов, в частности, в моторных маслах ДВС, может идти по двум основным направлениям, представленным на рис. 2, результаты окисления по которым различны. При этом результатом окисления по первому направлению являются кислые продукты (кислоты, оксикислоты, эстолиды и асфальтогенные кислоты), образующие осадки при пониженных температурах; результатом окисления по второму направлению являются нейтральные продукты (карбены, карбоиды, асфальтены и смолы), из которых образуются в различных пропорциях при повышенных температурах или лаки, или нагары [2].

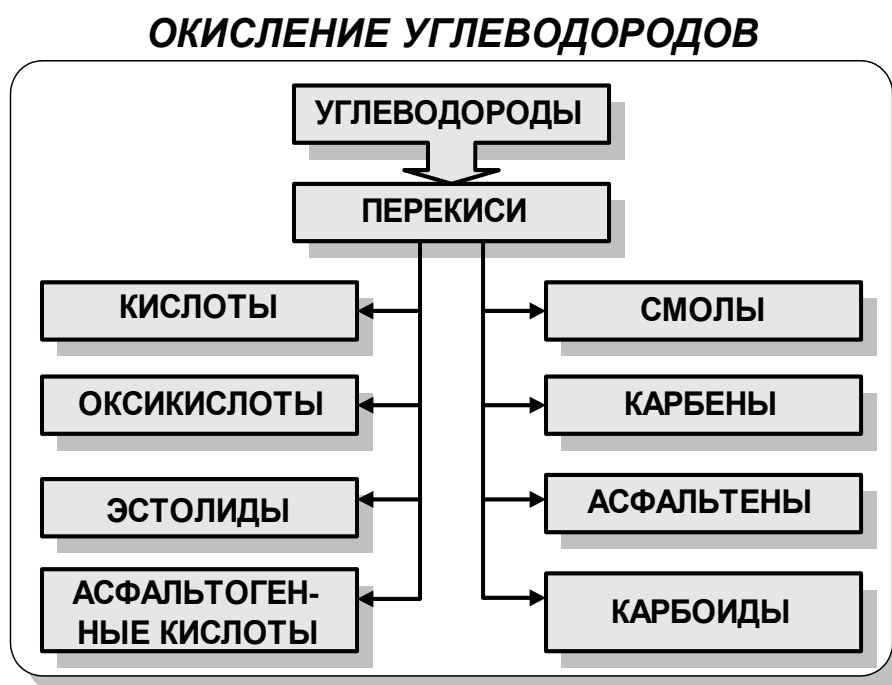


Рис. 2. Пути окисления углеводородов в нефтяном продукте (например, в моторном масле для ДВС)

В процессах старения масла весьма значительна роль воды, попадающей в масло при конденсации ее паров из картерных газов или другими путями. В результате этого образуются эмульсии, которые впоследствии усиливают окислительную полимеризацию молекул масла. Взаимодействие оксикислот и других продуктов окисления масла с водомасляными эмульсиями вызывает усиленное образование осадков (шламов) в двигателе.

В свою очередь, образовавшиеся частички шлама, если они не будут нейтрализованы присадкой, служат центрами катализации и ускоряют разложение еще не окислившейся части масла. Если при этом не произвести своевременную замену моторного масла, процесс окисления будет происходить по типу цепной реакции с увеличивающейся скоростью, со всеми вытекающими отсюда последствиями.

Решающее влияние на образование нагаров, лаков и осадков на поверхностях деталей ДВС, контактирующих с моторным маслом, оказывает их тепловое состояние. В свою очередь, конструкционные особенности двигателей, условия их эксплуатации, режимы работы и т.д. определяют тепловое состояние двигателей и влияют, таким образом, на процессы образования отложений.

Не менее важное влияние на образование отложений в ДВС оказывают и характеристики применяемого моторного масла. Для каждого конкретного двигателя важно соответствие рекомендованного заводом-изготовителем масла температуре поверхностей деталей, контактирующих с ним.

В данной работе произведен анализ взаимосвязи температур поверхностей поршней двигателей ЗМЗ-402.10 и ЗМЗ-5234.10 и процессов образования на них отложений нагаров и лаков, а также произведена оценка осадкообразования на поверхностях картера и клапанной крышки двигателей при использовании рекомендованного заводом изготовителем моторного масла М 6₃/12Г₁.

Для исследования зависимостей количественных характеристик отложений в двигателях от их теплового состояния и условий работы можно использовать различные методики, например, Л-4 (Англия), 344-Т (США), ПЗВ (СССР) и др. [2, 3]. В частности, по методике 344-Т, являющейся нормативным документом США, состояние «чистого» неизношенного двигателя оценивается в 0 баллов; состояние предельно изношенного и загрязненного двигателя в 10 баллов. Аналогичной методикой оценки лакообразования на поверхностях поршней является отечественная методика ПЗВ (авторы – К.К. Папок, А.П. Зарубин, А.В. Виппер), цветовая шкала которой имеет баллы от 0 (отсутствие лаковых отложений) до 6 (максимальные отложения лака). Для пересчета баллов шкалы ПЗВ в баллы методики 344-Т показания первой необходимо увеличить в полтора раза. Указанная методика аналогична отечественной методике отрицательной оценки отложений ВНИИ НП (10 балльная шкала).

Для экспериментальных исследований использовались по 10 двигателей ЗМЗ-402.10 и ЗМЗ-5234.10 [2]. Эксперименты по исследованию процессов образования отложений проводились совместно с лабораториями испытаний легковых и грузовых автомобилей УКЭР ГАЗ на моторных стендах. В процессе испытаний, кроме прочего, контролировались расходы воздуха и топлива, давление и температура отработавших газов, температура масла и охлаждающей жидкости. При этом на стендах выдерживались режимы: частота вращения коленчатого вала, соответствующая максимальной мощности (100% нагрузки), и, поочередно, в течение 3,5 часов – 70% нагрузки, 50% нагрузки, 40% нагрузки, 25% нагрузки и без нагрузки (при закрытых дроссельных заслонках), т.е. эксперименты проведены по нагрузочным характеристикам двигателей. При этом температура охлаждающей жидкости выдерживалась в интервале 90...92°C, температура масла в главной масляной магистрали – 90...95 °С. После этого двигатели разбирались и производились необходимые замеры.

Предварительно были проведены исследования по изменению физико-химических параметров моторных масел при испытаниях двигателей ЗМЗ-402.10 в составе автомобилей ГАЗ-3110 на автополигоне УКЭР ГАЗ. При этом выдержаны условия: средняя техническая скорость 30...32 км/ч, температура окружающего воздуха 18...26°C, пробег до 5000 км. В результате испытаний получено – при увеличении пробегов автомобилей (времени работы двигателей) увеличивалось количество механических примесей и воды в моторных маслах, его коксовое число и зольность, происходили прочие изменения, что представлено в табл. 1

Нагарообразование на поверхностях днищ поршней двигателей ЗМЗ-5234.10 характеризовалось данными, представленными на рис. 3 (для двигателей ЗМЗ-402.10 результаты подобны). Из анализа рисунка следует, что при повышении температур днищ поршней от 100 до 300°C толщина (зона существования) нагара уменьшалась с 0,45...0,50 до 0,10...0,15 мм, что объясняется выжиганием нагара при повышении температуры поверхностей двигателей. Твердость же нагара повышалась с 0,5 до 4,0...4,5 баллов по причине спекания нагара при высоких температурах.

Таблица 1

Изменение физико-химических параметров моторного масла при пробеговых испытаниях двигателей ЗМЗ-402.10

№ п/п	Параметр	Пробег, тыс. км.		
		3,0	3,8	5,0
1	Механические примеси, %	0,090	0,091	0,94
2	Кокс, %	0,49	0,64	0,87
3	Зола, %	0,011	0,016	0,022
4	Бензин, %	1,9	2,0	2,0
5	Кислотность, мг/л	0,53	0,45	0,38

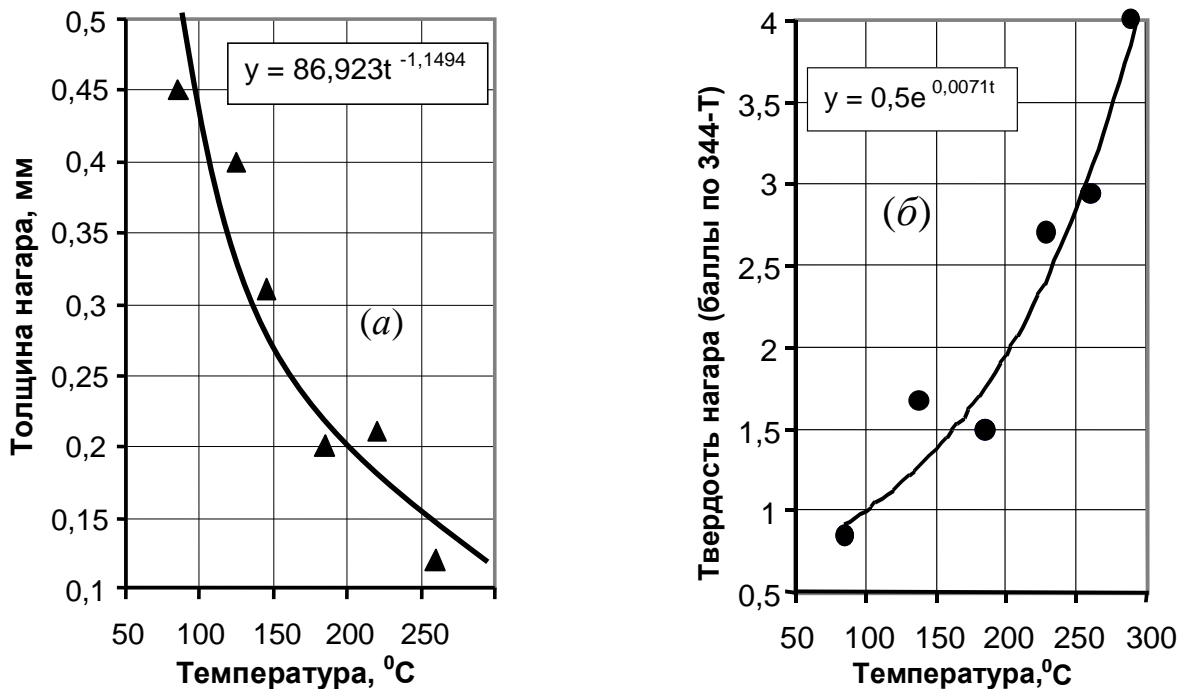


Рис. 3. Зависимости нагарообразования на поверхностях днищ поршней двигателей ЗМЗ-5234.10 от их температур:

а – толщина нагара; б – твердость нагара;

символами нанесены усредненные экспериментальные значения

Оценка величин отложений лаков на боковых поверхностях поршней и их внутренних (нерабочих) поверхностях производилась также по десятибалльной шкале, согласно методике 344-Т, используемой во всех ведущих научно-исследовательских учреждениях страны [3].

Данные по лакообразованию на поверхностях поршней двигателей представлены на рис. 4 (результаты по исследуемым маркам двигателей совпадают). Режимы испытаний указаны ранее и соответствуют режимам при исследованиях нагарообразования на деталях.

Из анализа рисунка следует, что лакообразование на поверхностях поршней двигателей однозначно увеличивается с увеличением температур их поверхностей. На интенсивность лакообразования влияет не только повышение температур поверхностей деталей, но и длительность ее действия, т.е. продолжительность работы двигателей [3]. При этом, однако, процессы лакообразования на рабочих (трущихся) поверхностях поршней существенно замедляются по сравнению с внутренними (нерабочими) поверхностями, вследствие стирания слоя лака в результате трения.

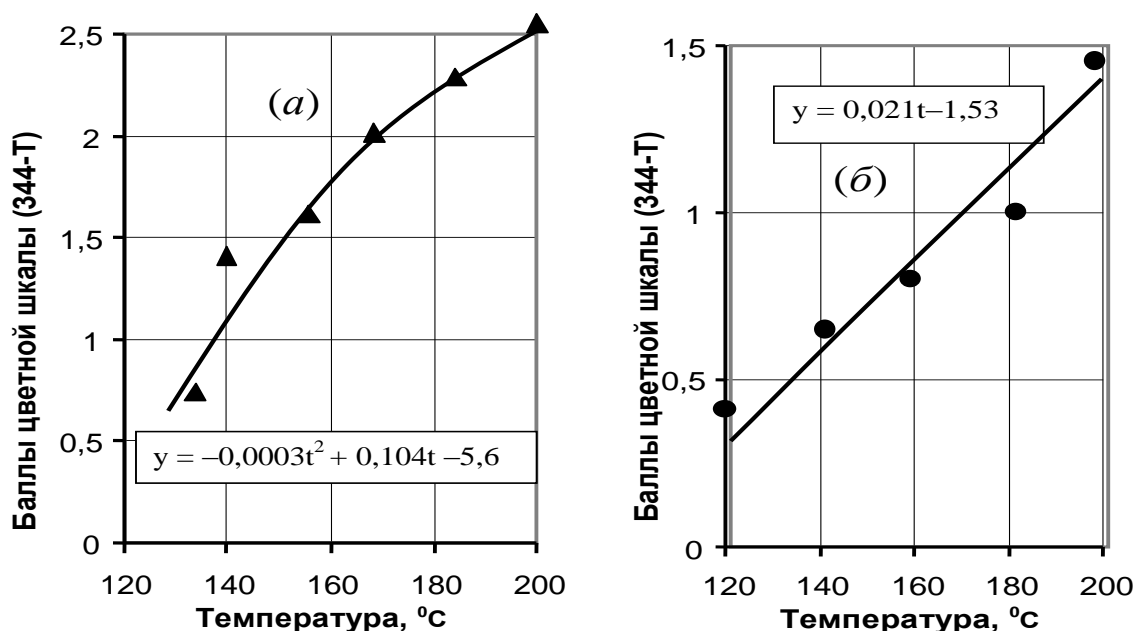


Рис. 4. Зависимости отложений лака на поверхностях поршней двигателей ЗМЗ-5234.10 от их температур:
a – внутренние поверхности; *б* – боковые поверхности;
 символами нанесены усредненные экспериментальные значения

Нагаро- и лакообразование на поверхностях деталей существенно интенсифицируется при применении масел групп «Б» и «В», что подтверждено рядом исследований, проведенных авторами на подобных и других типах автомобильных двигателей [3].

Планомерное увеличение отложений лаков на внутренних (нерабочих) поверхностях поршней вызывает уменьшение теплоотвода в картерное масло при увеличении наработки двигателей. Это вызывает, например, постепенное увеличение уровня теплового состояния двигателей по мере приближения наработки к смене масла при очередном ТО-2 автомобиля.

Образование осадков (шламов) из моторных масел происходит в наибольшей степени на поверхностях картера и клапанной крышки. Результаты исследований осадкообразования в двигателях ЗМЗ-5234.10 представлены на рис. 5 (для двигателей ЗМЗ-402.10 результаты подобны). Осадкообразование на поверхностях указанных ранее деталей оценивалось в зависимости от их температур, для измерения которых были смонтированы термодары (приварены конденсаторной сваркой): на поверхностях картера по 5 штук у каждого двигателя, на поверхностях клапанных крышек – по 3 штуки.

Как следует из рис. 5, при повышении температур поверхностей деталей двигателей осадкообразование на них уменьшается вследствие уменьшения содержания воды в картерном масле, что не противоречит результатам ранее проведенных экспериментов другими исследователями [3]. Во всех двигателях осадкообразование на поверхностях деталей картера оказались больше, чем на поверхностях клапанных крышек.

На моторных маслах групп форсирования «Б» и «В» осадкообразование на деталях ДВС, контактирующих с моторным маслом, происходит интенсивнее, чем на маслах групп форсирования «Г», что подтверждено рядом исследований [1, 2, 3 и др.].

По сравнению с поверхностями поршней, отложения на зеркалах цилиндров следует считать незначительными. Далее, на рис. 6 приводятся данные по лакообразованию на зеркале цилиндра двигателей ЗМЗ-5234.10 при работе на маслах М-8В («автол») и М6_з/12Г₁, полученные также по методике 344-Т (для двигателей ЗМЗ-402.10 результаты подобны).

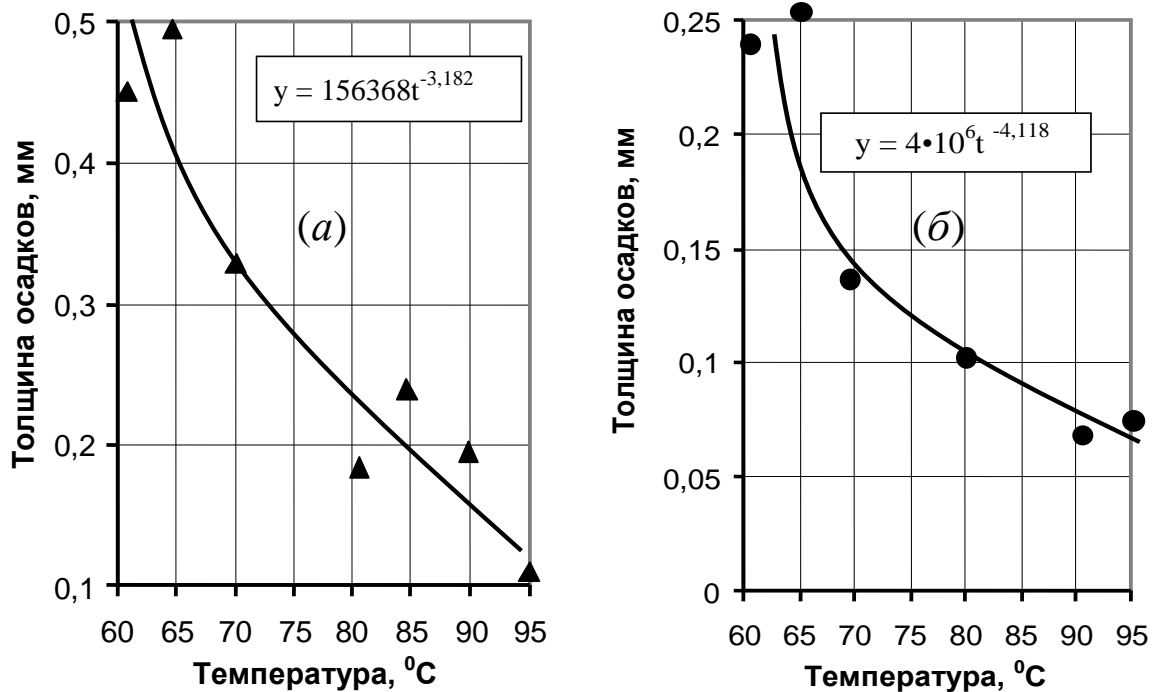


Рис. 5. Зависимость отложений осадков на поверхностях двигателя ЗМЗ-5234.10 от их температур:
a – картер; *б* – клапанная крышка;
 символами нанесены усредненные экспериментальные значения

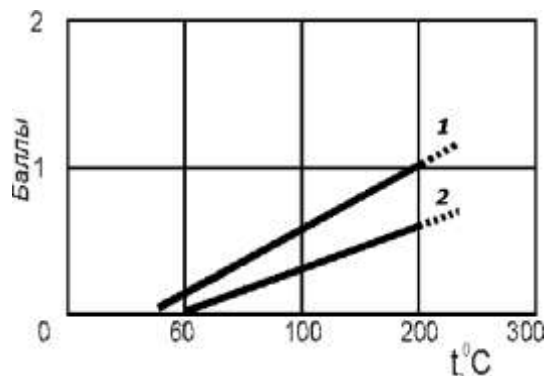


Рис. 6. Зависимости отложений на поверхностях зеркал цилиндров двигателей ЗМЗ-402.10 и ЗМЗ-5234.10 от их температуры:
 1 – масло М-8В; 2 – масло М6/12Г₁

В данной работе исследования отложений на зеркалах цилиндров при эксплуатации двигателей на самых современных маслах не проводилось, однако, можно уверенно предположить, что для исследуемых двигателей они будут не больше, чем при их работе на менее качественных маслах.

Полученные результаты по взаимосвязи изменения температур основных деталей двигателей ЗМЗ-402.10 и ЗМЗ-5234.10 (поршней, цилиндров, клапанных крышек и масляных картеров) и количества отложений позволили выявить закономерности процессов образования нагаров, лаков и осадков на поверхностях указанных деталей. Для этого результаты аппроксимированы функциональными зависимостями методом наименьших квадратов и представлены на рис. 3-5. Полученные закономерности процессов образования отложений на поверхностях деталей автомобильных карбюраторных двигателей должны учитываться и использоваться конструкторами и инженерно-техническими работниками, занимающимися доводкой и эксплуатацией ДВС.

Двигатель автомобиля работает с наибольшей эффективностью лишь при определенных условиях. Оптимальный температурный режим теплонагруженных деталей является одним из таких условий и обеспечивает высокие технические характеристики двигателя с одновременным снижением износов, отложений и, следовательно, повышением показателей его надежности.

Оптимальное тепловое состояние ДВС характеризуется оптимальными температурами поверхностей их теплонагруженных деталей. Анализируя проведенные исследования процессов образования отложений на деталях исследуемых карбюраторных двигателей ЗМЗ и подобные исследования по бензиновым двигателям [1, 2, 3 и др.], можно с достаточной степенью точности определить интервалы оптимальных и опасных температур поверхностей деталей данного класса двигателей. Полученная информация представлена в табл. 2.

Таблица 2

**Оптимальные и опасные интервалы температур поверхностей деталей
бензиновых автомобильных двигателей**

№ п/п	Наименование деталей и узлов двигателя	Опасная низкотемпературная зона, °С	Интервал оптимальных температур, °С	Опасная высокотемпературная зона, °С
1	Днище поршня, головка цилиндра	до 130	140 – 300	более 310
2	Зона поршневых колец	до 70	80 – 220	более 230
3	Юбка поршня, зеркало цилиндра	до 60	70 – 190	более 200
4	Картер, клапанная коробка	до 40	50 – 140	более 150

При температурах деталей двигателей в опасной высокотемпературной зоне существенно увеличивается твердость нагара на деталях КС цилиндра, что вызывает процессы калильного зажигания топливовоздушных смесей, количество лаковых отложений на поверхностях поршней и цилиндров, а значит, нарушается нормальный тепловой баланс.

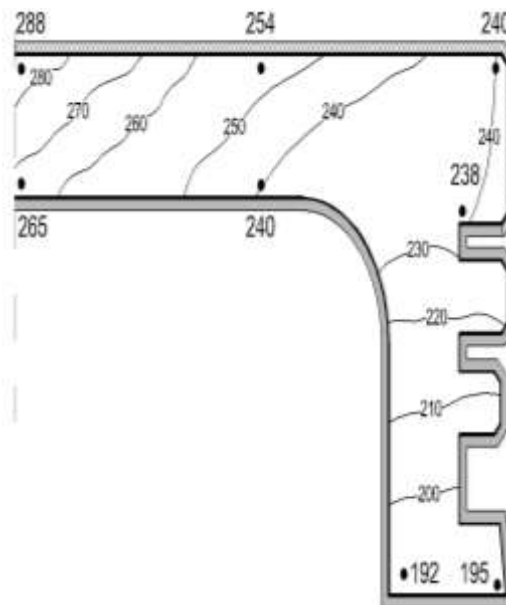


Рис. 7. Поле температур поршня двигателя ЗМЗ-5234.10 с нагарами и лаками

При температурах деталей двигателей в опасной низкотемпературной зоне увеличивается толщина нагара на поверхностях деталей, образующих КС, что приводит к возникнове-

нию детонационного сгорания топливовоздушных смесей, а также при низких температурах поверхностей деталей двигателей на них увеличивается количество осадков из моторных масел. Все это нарушает нормальную работу двигателей.

В свою очередь отложения приводят к перераспределению тепловых потоков, проходящих через поршни, и повышению температур поршней в критических точках – в центре огневой поверхности днища поршня и в канавке ВКК. Температурное поле поршня двигателя ЗМЗ-5234.10 с учетом отложений нагаров и лаков на его поверхностях представлено на рис. 7 [4].

Задача теплопроводности методом конечных элементов решалась с ГУ 1-рода, полученными при термометрировании поршня на режиме номинальной мощности при стендовых испытаниях двигателя [4]. Термоэлектрические эксперименты проводились с тем же поршнем, для которого предварительно выполнены исследования температурного состояния без учета отложений. Эксперименты осуществлялись при идентичных условиях. Предварительно двигатель работал на стенде более 80 часов, после чего наступает стабилизация нагаров и лаков [2]. В результате, температура в центре днища поршня повысилась на 24°C, в зоне канавки ВКК – на 26°C в сравнении с моделью поршня без учета отложений. Значение температуры поверхности поршня над ВКК 238°C входит в опасную высокотемпературную зону (табл. 2). Близко к опасной высокотемпературной зоне и значение температуры в центре днища поршня.

На этапе проектирования и доводки двигателей влияние отложений нагаров на теплопринимающих поверхностях поршней и лаков на их поверхностях, контактирующих с моторным маслом, учитывается крайне редко. Это обстоятельство в совокупности с эксплуатацией двигателей в составе АТС при повышенных тепловых нагрузках увеличивает вероятность отказов – прогары поршней, закоксовывание поршневых колец и т.д.

Библиографический список

1. **Кузьмин, Н.А.** Процессы и закономерности изменения технического состояния автомобилей в эксплуатации: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин; НГТУ. – Н. Новгород, 2002. – 142 с.
2. **Зеленцов, В.В.** Эксплуатационные свойства и тепловые режимы поршневых автомобильных двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие / В.В. Зеленцов, В.В. Крупа; НГТУ. – Н.Новгород, 2002. – 72 с.
3. **Григорьев, М.А.** Качество моторного масла и надежность двигателей / М.А. Григорьев, Б.М. Бурнаков, В.А. Далецкий. – М.: Изд-во стандартов, 1981. – 231 с.
4. **Кузьмин, Н.А.** Профилирование головок поршней ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. 2006. №12. С. 41-46.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

N.A. Kuzmin, V.V. Zelentsov, I.O. Donato

RESEARCH OF ADJOURNMENT IN AUTOMOBILE ENGINES

One of reserves of increasing of internal-combustion engine indicators of operational reliability is decreasing of adjournment deposits, varnishes and deposits on surfaces of engine oil contacting details. The process of oil ageing is the reason of their formation (oxidation of the hydrocarbons which are parts of an oil basis). The thermal mode of thermostressed details is the reason of processes of oil oxidation in engines and formation of adjournment and overall engines performance.

Key words: temperature, the piston, the cylinder, engine oil, adjournment, deposit, varnish, working capacity, reliability.

УДК 629.01

Ю.И. Палутин

КРИТЕРИИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОДОБИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЕЙ

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Проведена оценка критериев подобия необходимых для использования при анализе вентиляционных систем автомобиля. Показано, что основными критериями являются *число Рейнольдса* и *число Эйлера*, а также их комбинации. Доказано, что основным критерием подобия в случае поворота струи при ее входе в вентиляционный проем движущегося автомобиля является *число Эйлера*.

Ключевые слова: автомобиль, вентиляция салона, гидравлические сопротивления, число Рейнольдса, число Эйлера.

Правильный подбор безразмерных комбинаций в качестве критериев динамического подобия зависит, как известно, от полноты подбора физических величин, являющихся определяющими в рассматриваемом процессе. Определяющими величинами при движении воздуха через вентиляционные проемы, расположенные на поверхности кузова автомобиля, будут в первую очередь продольные и поперечные размеры проемов, перепады давлений по обе стороны проемов, плотность и динамическая вязкость воздуха и величина скорости невозмущенного потока. Кроме того, к ним следует отнести характерный размер автомобиля, в качестве которого выберем длину автомобиля, координаты вентиляционных проемов и угол натекания воздушных потоков.

Для линейных определяющих величин безразмерными комбинациями следует рассматривать следующие отношения:

$$b/l; x/L_a; y/L_a; z/L_a, \quad (1)$$

где b, l – линейные размеры вентиляционного проема; x, y, z – текущие координаты; L_a – продольные размеры автомобиля.

Эти безразмерные величины для каждого конкретного автомобиля являются строго определенными и фиксированными. К фиксированным величинам отнесем и угол натекания потока.

Следующие безразмерные комбинации будем искать, исходя из оставшихся шести определяющих величин:

$$V_\infty; \Delta P; \rho; \mu_0; L_a; I. \quad (2)$$

где V_∞ – скорость невозмущенного потока; ΔP – перепад между наружным и внутренним давлением; ρ – плотность воздуха; μ_0 – динамическая вязкость воздуха.

Воспользуемся для решения задачи поиска безразмерных комбинаций π -теоремой [1] теории размерностей. Перебрав с ее помощью все возможные сочетания из определяющих величин, выберем и рассмотрим следующие комбинации безразмерных величин:

$$\frac{V_\infty \rho_\infty L_a}{\mu_{0(\infty)}}; \quad (3)$$

$$\frac{V_\infty \rho_\infty I}{\mu_{0(\infty)}}; \quad (4)$$

$$\frac{\Delta P \rho_{\infty} l^2}{\mu_{0(\infty)}^2}; \quad (5)$$

$$\frac{\Delta P \rho_{\infty} L_a^2}{\mu_{0(\infty)}^2}; \quad (6)$$

$$\frac{\Delta P}{V_{\infty}^2 \rho_{\infty}}; \quad (7)$$

$$\frac{\Delta P l}{V_{\infty} \mu_{0(\infty)}}; \quad (8)$$

$$\frac{\Delta P L_a}{V_{\infty} \mu_{0(\infty)}}. \quad (9)$$

Проанализируем полученные комбинации.

Безразмерная группа (3):

$$\frac{V_{\infty} \rho_{\infty} L_a}{\mu_{0(\infty)}} = R_{e(L_a)}, \quad (10)$$

представляет собой не что иное, как *число Рейнольдса*, определяемое по параметрам внешнего воздушного потока и длине автомобиля. Данный широко известный критерий, позволяет оценить характер обтекания автомобиля внешними воздушными потоками. Поэтому его явно целесообразно использовать при проведении аэродинамических расчетов вентиляционных систем автомобилей.

Безразмерная комбинация (4) также представляет собой *число Рейнольдса*, только определенное по длине вентиляционного проема и по параметрам внешнего воздушного потока. Данная комбинация не несет необходимой информации и поэтому ее использование нецелесообразно.

Если в безразмерной комбинации величин (5) выразить величину перепада давления по обе стороны вентиляционного проема через теоретически возможную скорость движения через него воздуха при данном перепаде давления, то есть ту скорость, которая возникла бы при отсутствии гидравлических сопротивлений в данном проеме, и осуществить следующие преобразования:

$$\frac{\Delta P \rho_{\infty} l^2}{\mu_{0(\infty)}^2} = \frac{V_T^2 \rho_{\infty}^2 l^2}{2 \mu_{0(\infty)}^2} = \frac{1}{2} R_{e(l;T)}^2, \quad (11)$$

то становится видно, что она представляет собой *число Рейнольдса* во второй степени, определенное по теоретически возможной, при отсутствии гидравлических сопротивлений, скорости движения воздуха через проем под действием перепада давления, равного ΔP , и длине вентиляционного проема. То есть безразмерная комбинация величин (5) характеризует процесс протекания воздуха через вентиляционные проемы автомобиля и потому ее использование целесообразно.

По поводу «числа Рейнольдса», определяемого по теоретически возможной скорости движения воздуха через отверстие, необходимо отметить следующее. В практической гидродинамике и гидравлике принято рассматривать изменение коэффициентов гидравлических сопротивлений в функции изменения *чисел Рейнольдса*, определяемых по средней фактической скорости движения вязкого потока через сопротивление. Это вполне объяснимо, так как в большинстве решаемых практических задач задаются обычно или расходы, или сопротивления и по ним уже высчитываются те перепады давления, которые необходимо создать, чтобы обеспечить преодоление данного сопротивления при данном расходе. То есть определяющими величинами во всех этих задачах выступает величина расхода, требуемый же перепад давления, а значит, и теоретически возможная величина скорости движения являются определяемыми параметрами.

В случае расчета воздухообмена через вентиляционные проемы автомобиля задаваемой, а значит, и определяющей величиной, является перепад давлений по обе их стороны, то есть в этом случае теоретически возможная скорость движения воздуха становится величиной определяющей. Величина же расхода воздуха, а значит, и средняя по расходу скорость являются определяемыми величинами. Поэтому при решении задач движения воздуха через вентиляционные проемы изменения величин коэффициентов расхода воздуха и коэффициентов гидравлических сопротивлений следует рассматривать именно в функции изменения безразмерной комбинации (5).

В связи с изложенным хотелось бы пожелать, чтобы во всей справочной литературе, в которой приводятся графики изменения коэффициентов гидравлических сопротивлений и коэффициентов расхода воздуха, они приводились бы одновременно и в функции изменения числа Рейнольдса, определяемого по средней скорости расхода и в функции изменения числа Рейнольдса, определяемого по теоретически возможной скорости движения жидкости или газа. Такие графики можно приводить двух видов. Например, в виде одного графика, в этом случае должны приводиться две параллельные координатные оси - одна для числа Рейнольдса, определяемого через среднюю по расходу скорости, другая - для числа Рейнольдса, вычисляемого по теоретически возможной скорости движения. Другим видом зависимости может быть изображение в виде двух графиков при одинаковых координатных осях.

В любом случае зависимость между числом Рейнольдса, определяемым через теоретически возможную скорость движения воздуха и числом Рейнольдса, определяемым через среднюю по расходу скорость движения, находится с помощью следующего аналитического выражения:

$$R_{e(T)} = \zeta^{0.5} R_e ; \quad (12)$$

или через выражение:

$$R_{e(T)} = \mu^{-1} R_e . \quad (13)$$

Если с безразмерной комбинацией величин (6) провести преобразования, подобные тем, которые были проведены с комбинацией величин (5), то выяснится, что она представляет собой число Рейнольдса во второй степени, определяемое по теоретически возможной скорости движения воздуха через проем и по длине автомобиля. Такая комбинация видимой практической ценности не имеет и поэтому ее применение нецелесообразно.

Безразмерная комбинация величин (7)

$$\frac{\Delta P}{V_\infty^2 \rho_\infty} = E_u , \quad (14)$$

представляет собой широко известный критерий подобия, имеющий название *число Эйлера*. Для более полного представления о комбинации величин (7) выразим ее в другом виде. Раскроем для этого в ней величину перепада давлений и осуществим с ней следующие преобразования:

$$\frac{\Delta P}{V_\infty^2 \rho_\infty} = \frac{(P_i - P_{вн.})}{V_\infty^2 \rho_\infty} = \frac{2[(P_i - P_\infty) - (P_{вн.} - P_\infty)]}{2V_\infty^2 \rho_\infty} = \frac{1}{2} \Delta \bar{P} . \quad (15)$$

Из полученного выражения видно, что критерий подобия *число Эйлера* можно представить в виде разности величин аэродинамических коэффициентов давлений по обе стороны вентиляционного проема. В работах [2, 3, 4] показано, что использование разности аэродинамических коэффициентов давления очень удобно при описании изменений коэффициентов гидравлических сопротивлений движению воздуха через вентиляционные проемы, расположенные на поверхности кузова автомобиля.

Безразмерную комбинацию величин (7) можно также представить и в другом виде. Выразим для этого величину разности давления по обе стороны вентиляционного проема че-

рез величину теоретически возможной скорости движения воздуха через этот вентиляционный проем под действием данного перепада давления и проведем следующие преобразования:

$$E_u = \frac{\Delta P}{V_\infty^2 \rho_\infty} = \frac{\rho_\infty V_{ex(T)}^2}{2 \rho_\infty v_\infty^2} = \frac{1}{2} \left(\frac{V_{ex(T)}}{V_\infty} \right)^2. \quad (16)$$

Из полученного выражения видно, что безразмерную комбинацию (7), представляющей собой *число Эйлера*, можно выразить и через отношение величин теоретически возможной скорости движения воздуха через отверстие к скорости невозмущенного потока. Эффективность использования отношения величин скорости невозмущенного потока к скорости движения воздуха через отверстие показано в работе [5], в которой рассматривается характер движение воздуха через различные отверстия в тонкой стенке, при наличии с одной ее стороны внешнего воздушного потока.

В общей аэродинамике считается, что гидродинамический критерий подобия *число Эйлера* является значимым только при скоростях движения воздуха, близких к скорости звука, когда воздух становится сжимаемым [6]. Настоящая работа доказывает, что при оценке поворота струи, когда на движущийся поток воздействует перепад давления, изменяющий его траекторию движения, критерий подобия *число Эйлера* становится определяющим и в несжимаемой жидкости при малых скоростях ее движения.

Таким образом, выражение (7) в виде выражений (15) и (16) нашло уже практическое применение при решении вопросов вентиляции, поэтому будем считать его использование целесообразным.

Для того чтобы разобраться, что представляет собой безразмерная комбинация (8), проведем с ней следующие преобразования:

$$\frac{\Delta P l}{V_\infty^0 \mu_{0(\infty)}} = \left(\frac{\rho_\infty \Delta P^2 l^2}{\rho_\infty V_\infty^2 (\mu_{0(\infty)})^2} \right)^{0.5} = \left[E_u \frac{1}{2} R_{e(l;T)}^2 \right]^{0.5} = \left(\frac{1}{2} E_u \right)^{0.5} R_{e(l;T)}. \quad (17)$$

Из полученного выражения видно, что выражение (8) представляет собой комбинацию известных критериев подобия: *числа Рейнольдса* и *числа Эйлера*. Таким образом, выражение (17) показывает, что безразмерная комбинация величин (8) оценивает процессы протекания воздуха сквозь вентиляционные проемы и через *число Рейнольдса*, и одновременно оценивает влияние внешнего воздушного потока на внутренний поток через соотношение их скоростей или *число Эйлера*. Поэтому ясно, что данный критерий должен быть использован при оценке гидравлических сопротивлений протеканию через них воздуха в присутствии внешнего воздушного потока, движущегося снаружи кузова автомобиля.

Если с безразмерной комбинацией (9) проделать те же преобразования, что и с безразмерной комбинацией (8), то будет выявлено, что она представляет собой произведение безразмерных комбинаций (6) и (7). Однако, как уже показано ранее, безразмерная комбинация (6) не несет важной смысловой информации, поэтому применение комбинации (9) можно считать нецелесообразным.

Таким образом, для описания изменений гидравлических сопротивлений движению через них воздуха имеет смысл использовать четыре безразмерные комбинации - (3), (5), (7) и (8):

$$\frac{V_\infty \rho_\infty L_a}{\mu_{0(\infty)}}; \frac{\Delta P \rho_\infty l^2}{\mu_{0(\infty)}^2}; \frac{\Delta P}{V_\infty^2 \rho_\infty}; \frac{\Delta P l}{V_\infty \mu_{0(\infty)}}. \quad (18)$$

Данные комбинации величин полностью характеризуют движение воздуха через любые отверстия, в том числе и в присутствии с одной из сторон внешнего воздушного потока, и поэтому их использование позволит значительно облегчить решение задач, связанных с проблемами вентиляции салонов автомобилей.

Библиографический список

1. **Альштуль, А.Д.** Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альштуль, П. Г. Киселёв. – М.: Стройиздат, 1965. – 414 с.
2. **Иванусь, Е. М.** Исследование естественной вентиляции салонов автобусов: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – Минск, 1971. – 35 с.
3. **Палутин, Ю. И.** Метод расчёта воздухообмена в салоне автобуса // Автомобильная промышленность. 1976. № 11. С. 26-27.
4. **Парфёнов, В.Н.** Разработка методов расчёта аэродинамического сопротивления движению и воздухообмена в салоне автобуса с кузовом вагонного типа: автореферат дисс. ... канд. техн. наук. – М., 1984. – 32 с.
5. **Ханжонков, В. И.** Сопротивление истечению через отверстие в стенке в присутствии проходящего потока // Промышленная аэродинамика. 1959. Вып. 15. С. 5-12.
6. **Абрамович, Г.Н.** Прикладная газовая динамика / Г.Н. Абрамович. – М.: Наука, 1969. – 824 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

Yu.I. Palutin

CRITERIA OF HYDRODYNAMIC SIMILARITY IN THE ESTIMATION OF VENT AUTOMOBILE SYSTEMS

The estimation of similarity criteria that are necessary for ventilator automobile systems analysis is carried out. It is shown that the main criteria are “number Euler” and “number Reynolds” and their combination. It is proved that the main criterion in the case of stream turn by its entrance in the ventilator embrasure of the moving automobile is “the number Euler”.

Key words: automobile, salon ventilation, hydraulic resistance, “number Euler”, “number Reynolds”.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 624.042: 629.5.024

В.И. Сутырин

МЕТОДОЛОГИЯ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОГО АНАЛИЗА СУДОВЫХ КОРПУСНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИИ

Российский государственный университет им. И. Канта

Представленная работа посвящена методологическим вопросам, связанным с разработкой программных средств расчетного проектирования (инженерного анализа) корпусных конструкций. За рубежом программные комплексы подобного назначения относят к категории САЕ (Computer Aided Engineering). В отечественном справочнике по системному анализу аналогичные программные средства представлены как «системы интегрированной информационной поддержки принятия решений и обеспечения жизненного цикла конструкций». Широкое распространение в литературных источниках получил также термин «подсистема инженерного анализа».

Ключевые слова: программная система, вычислительные средства, адаптивный анализ, корпуса судов, системный анализ, САЕ- комплекс, эффективность МКЭ

Современный САЕ- комплекс [1, 2] представляет собой сложную программную систему. Он должен учитывать специфику анализируемого объекта, обладать высокой эффективностью и ориентироваться на применение самых современных (в последние годы - мультипроцессорных) вычислительных средств. Их активное совершенствование обуславливает необходимость адаптивного анализа всей предметной области, пересмотра с новых позиций объединяемых ею фактов, проблематики, задач, онтологии, моделей и прикладных методик.

Проблемы, связанные с расчетным проектированием корпусов судов, можно отнести к категории слабоструктурированных (качественных) проблем. Поэтому для построения САЕ- комплекса, отвечающего всем современным требованиям, необходимо обращаться к теории систем и системного анализа, методологическим аспектом которой выступает комплексное исследование (изучение) объекта как единого целого - так называемый системный подход.

Как показал анализ автора, большинство существующих САЕ- комплексов как подсистем, предназначенных для инженерного анализа корпусов судов в рамках процесса автоматизированного проектирования, ориентировано на применение конечно-элементной вычислительной процедуры. МКЭ реализует основные этапы системного подхода к расчетным исследованиям, поскольку предполагает разбиение сложной системы на элементы, определение их свойств, объединение элементов, согласно модельным представлениям, расчет разрешающей системы уравнений, фрагментарное вычленение элементов и конкретизацию выходных характеристик. Однако, стремясь к целостности анализа системы корпуса, разработчики выстраивают глобальную систему уравнений большого порядка. Нарастает тупиковая ситуация: возрастающий порядок систем разрешающих уравнений модели судна становится

серьезным сдерживающим фактором к применению многовариантных, пошагово- итерационных и иных вычислительных процедур, составляющих алгоритмическую основу методов оптимизации, расчета устойчивости, пластических деформаций и др. Трудности многократно возрастают в расчетах корпусов со случайными нагрузками и характеристиками материала. Поэтому усилия многих исследователей направлены на повышение эффективности МКЭ. Методы подконструкций [3], суперэлементов [4], модуль-элементов [5] и редуцированных элементов [6] представляют собой варианты решения существующих проблем вычислительного характера.

По мнению автора, эффективные подходы к формированию программных средств САЕ-класса следует искать на пути объединения междисциплинарных решений. Так, надежную алгоритмическую основу комплекса могут обеспечить современные методы матричной алгебры [7] с поддержкой распараллеливания операций современными компиляторами, ориентированными на мультипроцессорные вычисления [8]. Существенного повышения эффективности расчетных исследований корпусных конструкций следует ожидать от переосмотра (с новых технологических позиций) классических методов строительной механики. Далее предлагаются базовые концептуальные подходы к построению САЕ-комплекса, объединенные автором в методе фронтальной конденсации и апробированные при расчетном анализе корпусов судов и плавучих сооружений.

Понижение размерности задачи и построение преобразованных расчетных схем

Формирование матрицы жесткости (массы) модели конструкции корпуса представляет собой подпроцесс наложения связей между многочисленными его элементами (создание структуры). Связи целесообразно обобщить в подструктурах, объединяющих контурные (-o-) и расчетные (-●-) узлы приведения различного назначения [9, 10] (см. табл. 1).

Обобщенные массивы данных обладают исключительной информативностью, поскольку они заменяют в расчете влияние исключенных фрагментов расчетной модели конструкции. Высокая степень обобщения расчетных параметров обеспечивает построение эффективных преобразованных расчетных схем (ПРС). По существу, речь идет о глубоком редуцировании системы и получении в итоге функциональных страт объекта, обеспечивающих простоту описания, полноту и целостность расчетного исследования. Важнейшими требованиями к алгебраической процедуре преобразования расчетной схемы становятся требования унификации расчетного алгоритма и минимизации расчетного времени, что достигается применением следующих матрично-векторных равенств [10]:

$$\|R_{np}\| = \|R_{ss}\| + \|R_{sn}\| \cdot \|L\|; \quad (1)$$

$$\|M_{np}\| = \|M_{ss}\| + \|Q\| + \|Q\|^T + \|G\| \cdot \|G\|^T, \quad (2)$$

где

$$\|Q\| = \|L\|^T \cdot \|M_{ns}\|; \|G\| = \|L\|^T \cdot \|M_{nn}\|^{1/2};$$

$$\{P_{np}\} = \|L\|^T \cdot \{P_n\}; \quad (3)$$

$$\|L\| = -\|R_{nn}\|^{-1} \cdot \|R_{ns}\|;$$

s - узлы приведения; n - исключаемые узлы системы; $\|R_{np}\|$ и $\|M_{np}\|$ – матрицы обобщенных коэффициентов жесткости и массы узлов приведения; $\{P_{np}\}$ - вектор внешних нагрузок, приведенных к сохраняемым узлам s ; $\|R_{sn}\|$ и $\|M_{ns}\|$ - блок – матрицы взаимного влияния; T - признак транспонирования.

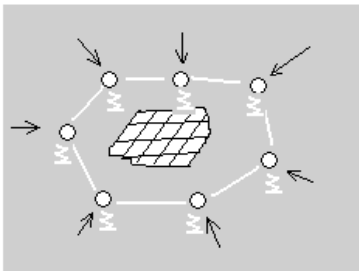
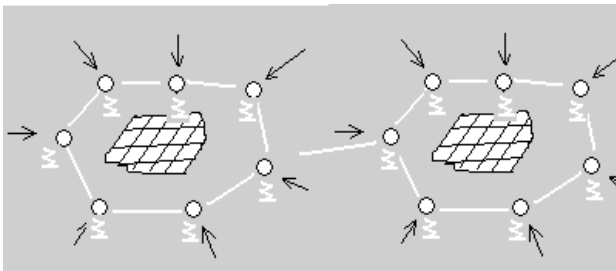
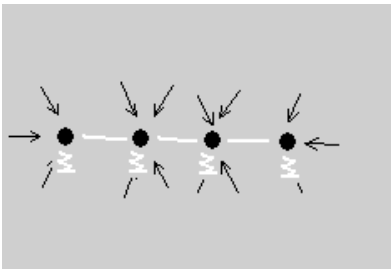
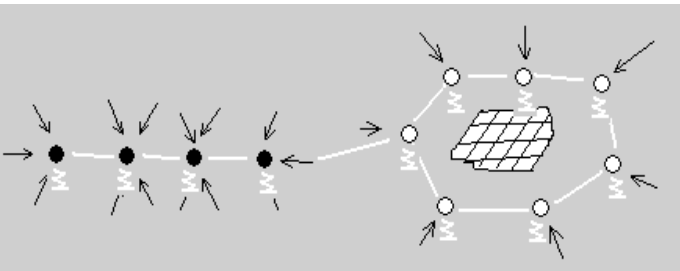
Если исходная матрица масс конструкции диагональная, то получаем упрощенное равенство:

$$\|M_{np}\| = \|M_{ss}\| + \|G\| \cdot \|G\|^T. \quad (4)$$

При построчном редуцировании блок- матрицы $\|M_m\|$ и $\|R_m\|$ становятся коэффициентами, что исключает операции их обращения и возведения в дробную степень.

Таблица 1

Подструктуры узлов приведения конструкции корпуса и характер решаемых прикладных задач

 <p>Анализ концентраций напряжений, локальных упруго- пластических деформаций, прочности, устойчивости и колебаний фрагментов корпуса с учетом обобщенных граничных условий</p>	 <p>То же с учетом взаимного влияния фрагментов (подструктур)</p>
 <p>Анализ собственных частот и форм колебаний и устойчивости корпусной конструкции</p>	 <p>Взаимосвязь общей и местной вибрации. Организация кратчайшего взаимодействия между сосредоточенными силами, областями контроля НДС или потери устойчивости конструкции (построение передаточных функций)</p>

Применение рекуррентных (вихревых) вычислительных процедур

Существенным моментом редукиции должен стать отказ от совокупно формирования матриц жесткости и массы судна в целом. Связи элементов системы корпуса целесообразно обобщать путем поэтапной структуризации и понижения размерности задачи. Рациональным, по мнению автора, решением здесь является комбинированное применение (сочетание) алгебраических преобразований (1)-(3) и фронтального метода решения системы уравнений (рис. 1).

На любом (*i*-м) этапе поузлового редуцирования обобщенные матрицы жесткости $\|C^{i}_{XY}\|$ и массы $\|M^{i}_{XY}\|$, а также нагрузки $\|D^{i}_{XY}\|$, характеризующие расширяющийся фронт узлов приведения, определяются в соответствии с обобщенными равенствами следующего вида [11]:

$$\begin{aligned} \|C^{i}_{XY}G^{i}_{XY}Q^{i}_{XY}D^{i}_{XY}\| &= \|R^{i}_{XY}00P^{i}_{Xf}\| - \\ &- \|R^{i}_{XN}\| \cdot \|R^{i}_{MN}\|^{-1} \|R^{i}_{NY} (B^{i}_{NY})^{1/2} B^{i}_{NY} P^{i}_{Nf}\|; \\ \|M^{i}_{XY}\| &= \|B^{i}_{XY}\| + \|Q^{i}_{XY}\| + \|Q^{i}_{XY}\|^T + \|G^{i}_{XY}\| \cdot \|G^{i}_{XY}\|^T; X = P, S; Y = P, S \end{aligned} \tag{5}$$

где $\|G^{i}_{XY}\|$ и $\|Q^{i}_{XY}\|$ - подматрицы промежуточных преобразований; *N*, *P* - обозначают ис-

ключаемые и сохраняемые степени свободы узлов конденсации; T - признак транспонирования; $\|R^i_{XY}\|, \|B^i_{XY}\|, \|P^i_{Xf}\|$ - подматрицы коэффициентов жесткости, массы и нагрузки исходных подструктур, получаемые путем поэлементного сложения соответствующих обобщенных коэффициентов предыдущего ($i-1$ -го) фронта и коэффициентов матриц указанного типа вновь вводимого фрагмента расчетной модели (помечены*).

$$\|R^i_{XY} B^i_{XY} P^i_{Xf}\| = \|C^{i-1}_{XY} M^{i-1}_{XY} D^{i-1}_{XY}\| + \|R^i_{XY} B^i_{XY} P^i_{Xf}\|^T; \quad (6)$$

$X = P, N; Y = P, N$; здесь S принадлежит P .

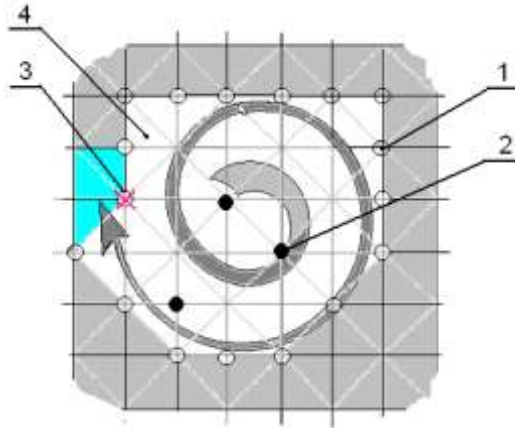


Рис. 1. Фронтальная (вихревая) схема узлового построения расчетной модели и исключения неизвестных систем:

1 – узлы фронта исключения; 2 – сохраняемые расчетные узлы; 3 – исключаемый узел, в котором фрагментарно стыкуются элементы модели; 4 – исключенная (обработанная) область системы

Можно сформулировать по крайней мере шесть существенных преимуществ фронтальной редукции: 1. Фронтальная схема позволяет удерживать в памяти компьютера лишь те коэффициенты, на которые непосредственно распространяется влияние исключаемых степеней свободы глобальной системы. Положительный эффект связывается здесь с независимостью объемов задействованной памяти от общего порядка решаемой системы. Расчет выполняется в основной памяти и не требует продолжительной по времени зонной обработки массивов коэффициентов. 2. В процессе фронтальной обработки появляется возможность сохранения шлейфа произвольно расположенных узлов приведения, составляющих подструктуры ПРС конструкции. Процесс редукции становится управляемым. 3. Достигается минимизация ширины ленты обрабатываемой блок-матрицы коэффициентов и соответственно минимизация общего времени анализа модели. 4. Фронтальная схема исключает построение глобальной модели и оптимизирует вычислительную процедуру редукции. 5. Указанная схема сравнительно легко и эффективно программируется, поскольку рабочие матрицы оказываются в расчете ограниченными по порядку, симметричными и плотно упакованными. 6. Фронтальная схема образует вихревую вычислительную процедуру, инвариантную по отношению к внешней (не пройденной) части модели. Появляется возможность мультифронтальной обработки системы с применением современных многопроцессорных вычислительных средств.

Инвариантные фронтальные процедуры как средство мультипроцессорных вычислений

Особенность предлагаемого подхода состоит в инициализации и контроле взаимодействия сразу нескольких вихревых фронтов исключения узловых перемещений, поддерживаемых собственными процессорами. Контроль сводится к фиксации попыток исключения любых узлов расчетной модели, входящих в любые другие смежные фронты. Указанные узлы в совокупности образуют в итоге сетку суперэлементов 2-го иерархического уровня, на

которой при необходимости назначаются новые центры исключения узлов и т.д. Таким образом, вычислительная процедура распространяется на несколько уровней и обеспечивает требуемое сокращение порядка исходной системы уравнений.

Важное преимущество предлагаемой схемы состоит в том, что при ее применении отпадает необходимость в предварительном описании границ многочисленных подструктур. Они формируются и обрабатываются автоматически [10]. При этом обеспечивается возможность перехода в расчете к многофункциональной подструктуре узлов конденсации, предварительно назначаемой специализированным графическим интерфейсом.

Генератор граничных условий как инструмент для получения новых знаний об объекте исследования

Объединение перечисленных ранее подходов позволяет сформировать специализированное многопользовательское программное средство для инженерного анализа корпусов судов, названное *генератором граничных условий* (ГГУ). Программа формирует граничные условия и ПРС, структурирует и сохраняет массивы обобщенных коэффициентов для последующего многовариантного исследования подблоков глобальной системы, например, в целях оптимизации.

Полный расчет судового корпуса весьма длителен. Определение оптимальных его параметров возможно сегодня лишь для заданных компоновочно- конструктивных схем фрагментов корпусной конструкции. Вопрос об оптимальности самих этих схем остается, как правило, нерешенным. Задача частично решается путем разработки ряда альтернативных вариантов. Оптимизационные решения по каждому из них позволяют выбрать наилучший вариант. Задача окончательного выбора в данном случае – более широкая и важная, чем определение оптимальных параметров для конкретной схемы. Ее успешное решение во многом зависит от инженерной изобретательности, опыта специалистов. Важная роль в решении указанной задачи принадлежит базовому методологическому подходу исследований и реализующему его инструментарию. Поэтому предлагаемая вычислительная система дополняется средствами расчетного проектирования, предназначенными для оптимизационного проектирования в рамках многочисленных компоновочно- конструктивных схем; эффективного коллективного взаимодействия субъектов и выбора окончательного проектного решения. Задачи управления вычислительными процессами сводятся здесь к выбору (для вариантного анализа) подструктур, к корректировке их граничных условий, с учетом ранее проведенной оптимизации (организация «петель обратной связи»), к обеспечению возможностей для применения в рамках ПРС различных расчетных подходов, методов формализованного и вербального описания.

Отказ от многократного анализа корпуса судна в целом при выборе расчетных блоков для многовариантного анализа становится возможным в результате применения методики встречного редуцирования (прогонки) системы корпуса с сохранением данных по ряду поперечных сечений конструкции во внешней памяти компьютера, в том числе на основе пространственных схем (траекторий, графов) встречного редуцирования [11, 12]. Так, в результате встречной пространственно ориентированной прогонки формируется база данных расчетных исследований, благодаря которой реализуется принцип от «общего к частному» - переход от разового расчета сложной конструкции к многократному выборочному расчету ее конструктивных блоков, имеющих произвольное расположение и размеры. В указанных вариантах расчетных исследований дополнительная функция ГГУ сводится к учету изменений, вносимых предыдущими решениями, к корректировке граничных условий (функция согласования решений). Учет взаимовлияния компонентов системы необходим в связи с тем, что корпусная конструкция (объект, система в целом) обнаруживает некие иные оптимальные характеристики, нежели составляющие ее блоки. Возникает потребность в учете взаимовлияния предельных состояний и в последовательном приближении оптимальных решений. Задача автоматизации операций по корректировке граничных условий фрагментов в услови-

ях выборочной оптимизации оказывается весьма сложной. Пересчет граничных условий должен выполняться по кратчайшему пути, что требует программного анализа уровня вносимых корректировок [9]. Обновленные граничные условия дают возможности сделать следующее уточнение оптимальных решений и т.д.

Используемый концептуальный подход позволяет реализовать эффективный графический интерфейс для назначения подсистем узлов приведения путем привязки курсора к узлам («Snap to Node»), а также -СП-технологии (технологии «светового пятна»), которая сводится к «высвечиванию» на экране компьютера фрагментов расчетной модели конструкции при помощи светового пятна, управляемого манипулятором. Элементы (узлы), попавшие в область пятна, интерпретируются как расчетные и по завершении анализа раскрашиваются по уровням напряжений. В результате возникает динамичный, информационно насыщенный визуальный образ моделируемой реальности, корректируемый в реальном режиме времени и способствующий творческому мышлению проектировщика.

Предложенные подходы апробированы нами при решении задач различной сложности [9,13-18]. Обоснования точности и сходимости предложенного алгоритма редукции получены при расчетах многочисленных тестовых задач. Рассматривались системы, состоящие из стержневых, пластинчатых и объемных конечных элементов, а также комбинированные системы. В расчетах варьировались графовые модели редукции, количество и расположение узлов приведения. Расчетные данные сопоставлены с результатами тензометрирования, полученными при испытаниях жестяных конструктивно-подобных моделей корпусов судов, а также в экспериментах с реальными судовыми перекрытиями в лабораторных условиях [13, 15, 18].

Библиографический список

1. **Кунву, Ли.** Основы САПР (CAD/CAM/CAE) / Ли Кунву. – СПб.: Питер, 2004. – 560 с.
2. Системный анализ и принятие решений: словарь-справочник / под ред. В.Н. Волковой, В.Н.Козлова.- М.: Высшая школа, 2004. – 616 с.
3. **Przemienitcki, J.S.** Matrix Analysis of Substructures // AIAA. V.1. N 1. S. 138-147.
4. Метод суперэлементов в расчетах инженерных сооружений / В.А. Постнов [и др.]. – Л.: Судостроение, 1979. – 287 с.
5. **Постнов, В.А.** Метод модуль-элементов в расчетах судовых конструкций / В.А. Постнов, Н.А. Тарануха. – Л.: Судостроение, 1990. – 320 с.
6. **Вороненок, Е.Я.** Метод редуцированных элементов для расчета конструкций / Е.Я. Вороненок, О.М. Палий, С.В. Сочинский. – Л.: Судостроение, 1990. – 224 с.
7. **Голуб, Дж.** Матричные вычисления: [пер. с англ.] / Дж. Голуб, Ван Лоун Ч. – М.: Мир, 1999.– 548 с.
8. **Воеводин, В.В.** Параллельные вычисления / В.В. Воеводин, Вл. В. Воеводин. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 608 с.
9. **Сапожников, А.И.** Программный комплекс для вариантного прочностного анализа трехмерных систем "Парус" / А.И. Сапожников [и др.] // Проблемы численного моделирования и автоматизации проектирования инженерных конструкций: сб. научн. тр. / ЛИИЖТ. – Л., 1987. С. 19-28.
10. **Сутырин, В.И.** Возможности повышения эффективности метода конечных элементов при проектировании корпусных конструкций // Судостроение. 2003. №6. С. 9-13.
11. **Сутырин, В.И.** Метод приведения в практике расчетов корпусных конструкций // Судостроение. 2008. №4. С. 17-22.
12. **Сутырин, В.И.** Метод матричной прогонки как эффективное средство накопления базы данных прочностных расчетов // Тез. докл. на Всесоюзной НТК по проблемам обеспечения прочности транспортных судов и плавучих сооружений. Л.: Судостроение, 1986. С.84-86.
13. **Сутырин, В.И.** Численные методы решения прочностных задач судоремонта // Судостроение. 1988. №11. С. 29-34.
14. **Сутырин, В.И.** Исследование напряженно-деформированного состояния протяженного валопровода с деформируемым основанием // Известия вузов. Машиностроение. 1988. №11. С. 29-34.

15. **Шапошников, В.М.** Расчетная конечно-элементная модель для оценки общего напряженного состояния корпуса судна с малой площадью ватерлинии / В.М. Шапошников, С.Ф. Дмитриев, В.И. Сутырин // Судостроительная промышленность. Сер.: Проектирование судов. 1989. Вып. 10. С. 64-69.
16. **Сутырин, В.И.** Расчет деталей машин по методу конечных элементов с применением рекуррентной схемы конденсации жесткостных параметров / В.И. Сутырин, Д.Г. Горянский // Известия вузов. Машиностроение. 1990. №1. С. 44-49.
17. **Сутырин, В.И.** Применение способа фронтальной конденсации в расчетах динамики судовых корпусных конструкций // Судостроение. 1996. №7. С. 10-14.
18. **Бураковский, Е.П.** Complex Analysis of Strength For Semi- Submersible Water Drilling Platform Structures / Е.П. Бураковский, В.П. Прохнич, В.И. Сутырин // Zeszyty naukowe NR10(82): EX-PLO-SHIP 2006.-Wyzsza Szkoła Morska. - Szczecin. 2006. P. 117-129.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

V.I. Sutyryn

METHODOLOGY OF THE FINITE ELEMENT ANALYSIS OF SHIP'S HULL CONSTRUCTIONS IN THEIR DESIGN

This work is devoted to methodological issues related to the development the software for ship's hull design. Abroad program packages such appointments were classified as CAE (Computer Aided Engineering). The Russian handbook on system analysis similar tools are presented as «a system of integrated information support for decision-making and life-cycle designs». Widespread in the literature was also the term «subsystem engineering analysis».

Key words: software system, computational tools, adaptive analysis, ship's hull, system analysis, CAE, effectiveness of the finite element method.

УДК 621.43

Л.А. Захаров, И.Л. Захаров, С.Н. Хрунков

МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ И ГОРЕНИЯ В РАБОЧЕЙ КАМЕРЕ ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены проблемы моделирования рабочих процессов в современных быстроходных поршневых двигателях внутреннего сгорания с принудительным зажиганием. Использована трехзонная модель процесса горения, предложены уточненные методы определения характеристики тепловыделения. Получены расчетные и экспериментальные результаты, подтверждающие область применимости разработанной модели.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, принудительное зажигание, теплообмен, газообмен, камера сгорания, процесс сгорания, математическое моделирование, характеристика тепловыделения, индцирование.

Основой транспортной и стационарной энергетики на ближайшие 50 лет останутся поршневые двигатели внутреннего сгорания (ПДВС). За период более столетия непрерывного совершенствования ПДВС достигли высоких КПД. Теория и практика показывает, что резервы их дальнейшего развития далеко не исчерпаны [1...5]. Это подтверждают последние достижения и перспективные направления в совершенствовании рабочих циклов ПДВС с применением новейших методов исследования и проектирования.

Глубокое физическое и математическое понимание принципов работы ПДВС - главные требования проблемы получения высокого КПД рядного четырехцилиндрового двигателя рабочим объемом 2,445 л. Из всего комплекса проблем оптимизации теплообмена выделим, на наш взгляд, главные:

- улучшение энергетических, динамических, экономических и экологических показателей за счет совершенствования рабочих процессов в цилиндре двигателя;
- совершенствование подсистемы газообмена (органов впуска и выпуска);
- выбор характеристик топливоподачи, зажигания и теплообмена;
- компьютерное проектирование теоретических и экспериментальных характеристик ПДВС;
- повышение технического уровня и жизненного цикла за счет оптимизации показателей качества и др.

Задача оптимизации теплообмена в цилиндре ПДВС решается с помощью совокупности программ, предназначенных для расчета процессов в цилиндре, а также в системах, сопряженных с цилиндром. Эта совокупность содержит следующие программы:

- моделирование процессов газообмена;
- расчет теплообмена газов со стенками цилиндра;
- расчет диссоциации CO_2 и H_2O ;
- расчет образования NO и CO ;
- расчет общих показателей цикла;
- расчет механических потерь и эффективных показателей.

В основной программе осуществляется моделирование цикла. Здесь производятся расчеты по углу поворота коленчатого вала (ПКВ) следующих величин: тепловыделения, потерь теплоты в стенки и на диссоциацию, текущих значений T , P , i , ΔU , Q , S , χ_i , χ_w , χ и других. При проведении тепловых расчетов ПДВС по традиционному методу процессы сжатия и расширения аппроксимируют адиабатическими или политропическими процессами.

Эти процессы ни по одному из своих признаков не совпадают с реальными и не могут служить моделью для расчета сжатия и расширения. Для повышения степени приближения расчетных теоретических показателей к реальным для описания процессов цикла применим систему дифференциальных уравнений. Данная система позволяет учесть влияние основных факторов, имеющих место в реальном двигателе. Основу модели теплообмена составляет структура деления процесса сгорания в цилиндре двигателя с искровым зажиганием на три фазы, которым соответствуют следующие периоды: образование начального очага горения, видимого горения и догорания. Каждая фаза отличается специфическими для нее физическими или химическими процессами, которые описываются дифференциальными уравнениями газовой динамики или физической кинетики. Система таких уравнений в совокупности с дифференциальными уравнениями первого закона термодинамики и теплообмена составляют математическую модель процесса сгорания.

Теория горения в ее современном состоянии дает только качественную картину совершенствования теплообмена. Вместе с тем, проведен ряд новых исследований самого рабочего процесса и указаны новые пути его совершенствования. Процесс горения в двигателе с зажиганием от искры по мере его развития меняется качественно и деление его на отдельные фазы отражает реальную картину превращения топливной смеси в конечные продукты реакции.

Термодинамическую основу такой модели составляют уравнения скорости изменения параметров состояния газа в цилиндре;

$$\begin{aligned} \frac{dp}{d\varphi} &= \frac{k}{V} \cdot \left(\frac{k-1}{k} \cdot \frac{dQ}{d\varphi} - p \cdot \frac{dV}{d\varphi} - p_k \cdot \frac{dV_k}{d\varphi} \right); \\ \frac{dT}{d\varphi} &= \frac{1}{c_v \cdot M} \cdot \left(\frac{dQ}{d\varphi} - c_v \cdot T \cdot \frac{dM}{d\varphi} - p \cdot \frac{dV}{d\varphi} - p_k \cdot \frac{dV_k}{d\varphi} \right). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь $dQ / d\varphi$ учитывает выделение теплоты при сгорании, теплоотдачу в стенки и затраты энергии на диссоциацию, а $dV_k / d\varphi$ - изменение объема заряда вследствие процессов газообмена и утечки через неплотности кольцевого уплотнения.

После определения составляющих уравнений (1) производится их интегрирование методом Рунге-Кутты, находятся текущие приращения ΔP и ΔT в течение расчетного шага $\Delta\varphi$ и значения P и T . Эти уравнения пригодны для определения параметров состояния рабочего тела во всех процессах действительного цикла, включая процессы наполнения и выпуска, поэтому они являются универсальными дифференциальными уравнениями цикла.

Наиболее сложным является аналитическое построение характеристики тепловыделения. Традиционный тепловой расчет ПДВС учитывает закономерности протекания процесса сгорания, но не учитывает физико-химический смысл. Предлагается метод синтеза характеристик тепловыделения, который базируется на современных представлениях о механизме процесса сгорания в двигателях с искровым зажиганием. Рассчитывают последовательно: в первой фазе сгорания скорости мелкомасштабного турбулентного пламени и задержку воспламенения (рис.1), во второй фазе - скорость течения газа в камере сгорания и скорости крупномасштабного турбулентного пламени, глубину зоны горения, геометрию камеры сгорания в сферических сечениях фронта и задней границе пламени, объемную и массовую долю выгоревшего заряда (рис. 2), в третьей - скорость и продолжительность догорания. Расчет ведется на малых интервалах времени, соответствующих $0,1^\circ$ ПКВ, при этом учитываются потери теплоты в стенки и на диссоциацию. При этом применен уточненный метод расчета потерь теплоты от газов в стенки Q_w . В уравнении коэффициента конвективной теплоотдачи

$$d_k = k \cdot D^{0,2} p^{0,8} T^{-0,336} W^{0,8}. \quad (2)$$

Для участка цикла «сжатие-расширение» скорость газа определяется:

$$W = k_2 \cdot \frac{n \cdot \left(\varepsilon - \frac{p_z \cdot T_a}{p_a \cdot T_z} \right) \cdot \{k_3 + \cos(2 \cdot \varphi)\}}{30 \cdot \frac{f_{\text{в.о.ср}}}{V_{\text{п}}} \cdot (\varepsilon - 1)}. \quad (3)$$

Утечки газов через неплотности поршневых колец вычислялись по уравнению:

$$\frac{dM}{d\varphi} = \varphi_k \xi_k f_k \psi \cdot \frac{p}{\sqrt{R \cdot T}} \frac{1}{6 \cdot n}. \quad (4)$$

Цикл моделируется с учетом основных факторов, влияющих на процессы, поэтому получаем закономерности, близкие к аналогичным закономерностям действительных циклов. После определения общих показателей цикла производим его оптимизацию по $\eta_{i \max}$ и $P_{i \max}$ путем выбора наивыгоднейших состава смеси и угла момента опережения зажигания. По окончании моделирования цикла определяем механические потери с использованием гидродинамической теории трения и анализа динамики двигателя. При этом учитываются размеры поверхностей трения, режимы работы двигателя, вязкость масла. Моделирование работы двигателя заканчивается определением эффективных показателей.

Далее моделируется процесс сгорания. После подачи искры около электродов свечи зажигания образуется начальный очаг горения, который можно представить в виде расширяющейся полусферы. До тех пор, пока размеры полусферы меньше масштаба крупных турбулентных пульсаций, сгорание происходит по законам мелкомасштабного турбулентного горения. При этом скорость пламени, согласно теории К.И. Щекина:

$$U_{T.M} = U_H \left(1 - W \cdot \frac{l}{\varnothing} \right). \quad (5)$$

В первой фазе сгорания температура пламени определяется из уравнения:

$$\frac{Q_n - \Delta Q_{\text{хим}} - \Delta Q_{\text{дисс}}}{\alpha l_0 (1 + \gamma)} + \mu c_{vi} T_c = \beta \mu c_{vi} T_z. \quad (6)$$

Продолжительность первой фазы сгорания определится по количеству выгоревшего топлива $\Delta \chi_{i1}$ по зависимости:

$$\Theta_I = \frac{3,72 \cdot n}{U_{T.M}} \cdot \sqrt{\frac{\Delta \chi_i \cdot \left\{ \left[1 + \cos \Theta_{\text{зак}} + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos \Theta_{\text{зак}}) \right] \cdot (\varepsilon - 1) + 1 \right\} \cdot \left(\frac{T_z}{T_c} \right)^{\frac{n_1}{n_1 - 1}}}{\left[\left(\frac{T_z}{T_c} \right)^{\frac{n_1}{n_1 - 1}} - 1 \right] \cdot \Delta \chi_i + 1}}. \quad (7)$$

При этом принято, что во фронте пламени происходят лишь первичные реакции окисления, в результате которых углерод топлива сгорает только до CO , а половина водорода остается не окислившейся. Последующее догорание CO и H_2 происходит затем в глубине зоны горения. Расчеты показали, что за время этого догорания фронт пламени успевает продвинуться от источника зажигания на 15...20 мм. Такой величине соответствует начальная зона горения, в дальнейшем она прогрессивно увеличивается за счет влияния диффузионных факторов.

В основной фазе расчет процессов ведется последовательно по трем зонам камеры сгорания - зоне горючей смеси, зоне сгорания и зоне продуктов сгорания. Скорость сгорания в этой фазе определяется скоростью вращательного турбулентного движения заряда, а химические факторы влияют лишь на ширину зоны горения. Температура горючей смеси перед фронтом пламени определяется с учетом влияния ее сжатия продуктами сгорания.

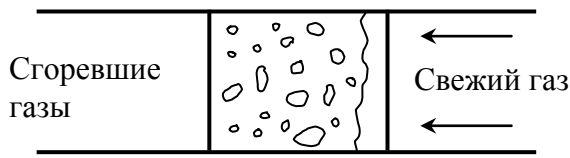


Рис. 1. Структура турбулентного пламени

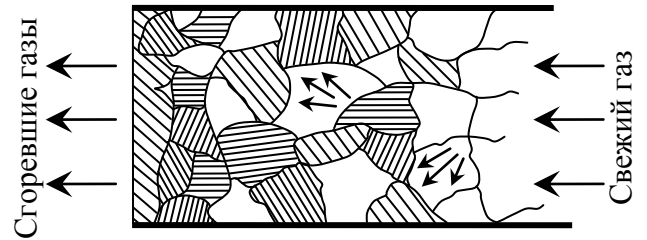


Рис. 2. Модель турбулентного горения

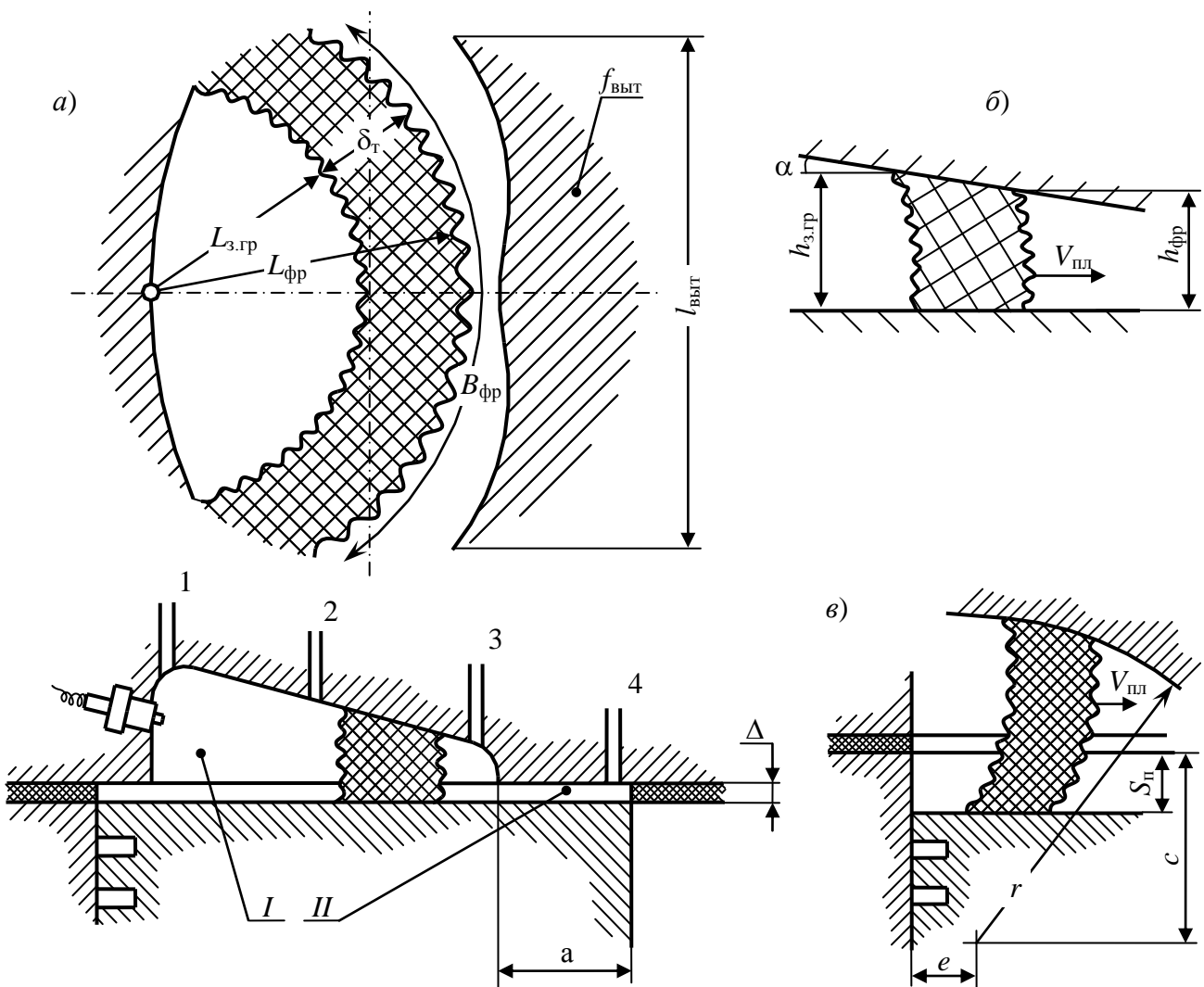


Рис. 3. Расчетные схемы распространения пламени в камере сгорания:

a – в объеме камеры сгорания; b – вдоль свода камеры сгорания; c – при опускании поршня;
 $L_{з.гр}$ – путь задней границы пламени; $L_{фр}$ – путь фронта пламени; $B_{фр}$ – ширина фронта пламени;
 δ_T – глубина пламени; $f_{выт}$ – площадь вытеснителя; $l_{выт}$ – длина вытеснителя; a – размер вытеснителя;
 Δ – зазор между поршнем в верхней мертвой точке и крышкой цилиндра; I – объем камеры сгорания;
 II – объем щели вытеснителя; α – угол свода камеры; $S_{пл}$ – ход поршня; 1, 2, 3, 4 – ионизационные датчики;
 $h_{з.гр}$ – высота камеры сгорания в зоне задней границы пламени; $h_{фр}$ – высота камеры сгорания в зоне фронта пламени;
 $V_{пл}$ – скорость распространения пламени; c, e – координаты центра сферы, образующей свод камеры сгорания;
 r – радиус сферы, образующей свод камеры сгорания

Температура пламени в основной фазе рассчитывается с учетом тепловыделения, теплоотдачи, перемещения поршня и расширения газов при сгорании:

$$T_{пл} = \left[T_c = \frac{1}{M \cdot c_p} \cdot \int_{\varphi_0}^{\varphi_i} (dQ - p \cdot dV) \right] \cdot \left(1 + \frac{\Delta p}{p} \right), \quad (8)$$

где
$$dQ = (Q_H - \Delta Q_{хим} - \Delta Q_{дис}) \cdot M_{ТЦ} \cdot d_{i-1} - \alpha_k \cdot F_{ст} \cdot (T - T_{ст}) \cdot d\tau \quad (9)$$

Когда размер очага горения увеличится до такой величины, что станет соизмеримым с масштабом крупных турбулентных пульсаций, то скорость сгорания будет определяться скоростью этих пульсаций. Крупномасштабные турбулентные пульсации генерируются струйными течениями газа в камере сгорания, которые, в свою очередь, возникают вследствие больших скоростей втекания заряда через впускное отверстие цилиндра при впуске и за счет вытеснения газа из щели над поршнем при перемещении его около ВМТ в конце такта сжатия.

Расчет скоростей струйных течений газа ведется по двум объемам камеры сгорания (см. рис. 3): первый - от свечи зажигания до порожка вытеснителя, второй - в щели вытеснителя. В первом объеме струйные течения генерируются при впуске, в ходе сжатия их интенсивность снижается, но около ВМТ снова несколько возрастает благодаря частичному перераспределению энергии крупных вихрей на пульсации высоких частот при уменьшении объема камеры. Во втором объеме - движение газа создается поршнем при его перемещении около ВМТ. Решением дифференциальных уравнений скорости изменения массы газа в этом объеме получено следующее выражение для скорости течения газа в сечении щели вытеснителя и у его порожка:

$$W = 0,1047 \cdot \frac{f_{вып}}{l_{вып}} \cdot n \cdot \left(\frac{1}{\frac{2}{\varepsilon - 1} + \sigma} - \frac{1}{\frac{\Delta}{R_{кр}} + \sigma} \right) \cdot \sigma', \quad (10)$$

где $f_{вып}$, $l_{вып}$, Δ - размеры вытеснителя, рис. 3,

$$\sigma = 1 - \cos \varphi + \frac{\lambda}{4} \cdot (1 - \cos 2 \cdot \varphi); \quad \sigma' = \sin \varphi + \frac{\lambda}{2} \cdot (\sin 2 \cdot \varphi). \quad (11)$$

Из условия, что среднеквадратичная скорость крупномасштабных турбулентных пульсаций в каком-либо сечении камеры сгорания пропорциональна текущему значению числа Рейнольдса, получаем

$$W' = k_T \text{Re} = k_T \frac{Whl}{\nu(h+l)}, \quad (12)$$

где h и l - текущие значения высоты и ширины камеры сгорания в сечении фронта пламени.

Зависимость турбулентной скорости горения от скорости пульсаций выражается уравнением

$$U_T = aW' + b_0. \quad (13)$$

По данным А.Н. Войнова, $a \approx e^{-\frac{E}{RT}}$; $U_T \approx p^n$; $b_0 = U_H$. С учетом этого уравнение (13) запишется так:

$$U_T = kp^n e^{-\frac{E}{RT}} W' + U_H. \quad (14)$$

Если газовый поток движется со средней скоростью W , то абсолютная скорость перемещения турбулентного пламени равна

$$W_{пл} = W + U_T. \quad (15)$$

Таким образом, исследование по предлагаемому методу позволяет анализировать влияние состава смеси, конструкции камеры сгорания, угла опережения зажигания на такие параметры,

как скорость сгорания, тепловыделение, потери теплоты в стенки, индикаторный КПД и др. Применение САПР ПДВС для анализа индикаторных диаграмм по разработанному методу позволило определить в ходе вычислительных экспериментов все параметры процессов цикла. На рис. 4 представлены в качестве примера действительные и синтезированные по предлагаемому методу индикаторные диаграммы нового четырехцилиндрового двигателя рабочим объемом 2,445 л мод.210.10. Расхождение в пересчете на среднее индикаторное давление при разных режимах составляет от 4 до 8%.

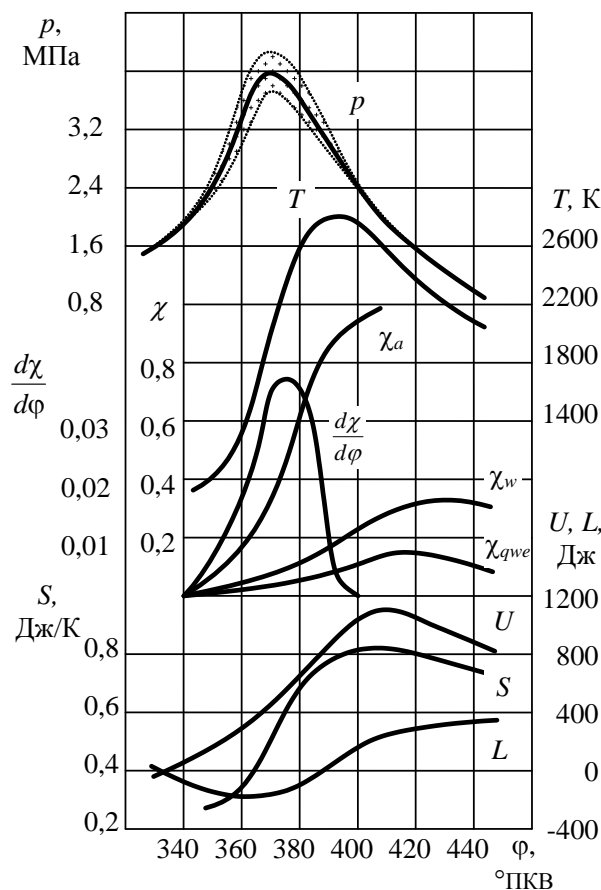
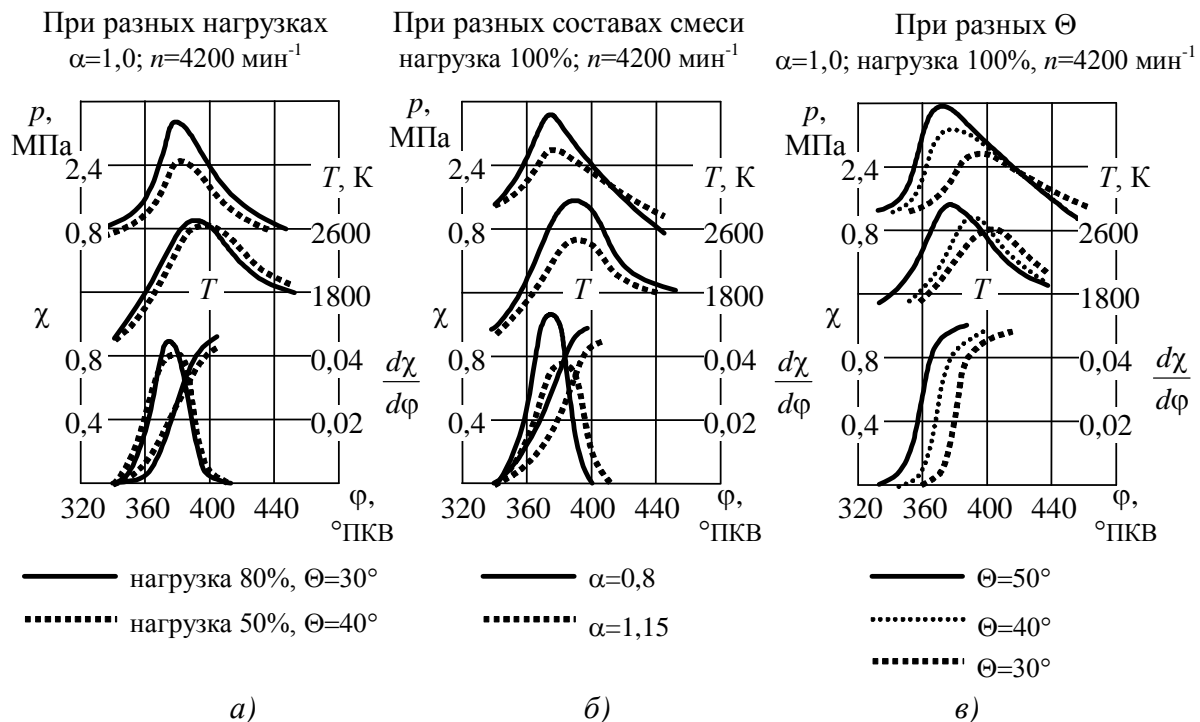


Рис. 4. Графики индикаторного процесса двигателя P4 $V_h=2,445$ л, нагрузка 100%, $n=3600$ мин.⁻¹, $\alpha=1,1$:

— моделирование;
 эксперимент

На рис. 5 представлены характеристики тепловыделения, полученные вычислительным экспериментом в САПР ПДВС для разных составов смеси, нагрузок и углов опережения зажигания, а также циклы, синтезированные на основе этих характеристик. На рис. 6 приведены расчетные графики скорости перемещения турбулентного пламени. Там же показаны действительные графики скоростей распространения фронта пламени, полученные на двигателе с помощью ионизационных датчиков.

Протекание синтезированных характеристик тепловыделения определяется формой камеры сгорания, углом опережения момента зажигания, составом горючей смеси, степенью турбулизации заряда, нагрузкой и частотой вращения, т.е. теми же факторами, которые определяют протекание действительных характеристик тепловыделения. Таким образом, применение математического моделирования процесса сгорания в цилиндре ПДВС с искровым зажиганием дает возможность прогнозирования протекания сгорания при изменении конструктивных, регулировочных и режимных факторов путем проведения вычислительного эксперимента в САПР ПДВС.

Рис. 5. Расчетные циклы двигателя P4 $V_h=2,445 \text{ л}$.

Разработанные математические модели опробованы соответствующими экспериментальными исследованиями процессов на моторных стендах и безмоторных установках. В частности:

- исследования процессов газообмена проводились путем снятия диаграмм давлений современным индикатором фирмы Бош на моторном и безмоторном стендах;
- волновые явления в трубопроводах анализировались по осциллограммам пульсаций давлений, снятым с помощью мембранного датчика пьезокварцевым преобразователем;
- проведение анализа влияния различных факторов на теплообмен ПДВС и теплонапряженность его деталей выполнялось на специализированном стенде теплобалансовых испытаний двигателя и термометрирования деталей;
- исследование процесса сгорания в цилиндре ПДВС проводилось на стенде, оборудованном аппаратурой с ионизационными датчиками, а также газоанализаторами на CO , CH , NO_x , CO_2 , O_2 . Все стенды и измерительная аппаратура аттестованы в соответствии с ГОСТ 14846-90.

Предложен комплекс методов математического моделирования основных процессов в цилиндре ПДВС, учитывающий закономерности тепловыделения, теплоотдачи и других явлений и обладающий максимальной детализацией в учете факторов, влияющих на оптимизацию теплообмена и повышение КПД двигателя. Названные методы обладают универсальностью и отличаются следующими особенностями:

- характеристики тепловыделения получаются в результате моделирования процесса сгорания по методу, учитывающему основные явления, имеющие место при сгорании в цилиндре двигателя, а не с помощью эмпирических уравнений, как это обычно принято;
- потери теплоты в стенки определяются с учетом влияния переменных скоростей течений газов в цилиндре на конвективную составляющую и степени черноты различных стенок на лучистую составляющую теплоотдачи;
- процессы газообмена рассчитываются с учетом заданных фаз газораспределения, законов движения клапанов, тепловых и инерционных явлений в трубопроводах, гидравлических сопротивлений.

Влияние состава смеси на общие показатели расчетных циклов двигателя $P4 V_{ii}=2,445$ л показано на рис. 7. Моделирование циклов вычислительными экспериментами с учетом таких факторов, как закономерность сгорания, теплообмен газов со стенками и диссоциация, закономерности изменения среднего индикаторного давления и индикаторного КПД по составу смеси показало сходимость с действительными результатами, получаемыми в результате индицирования при регулировочных испытаниях двигателя. Впервые численным моделированием получены четкие максимумы в протекании зависимостей индикаторного КПД от состава смеси за счет оптимизации теплообмена.

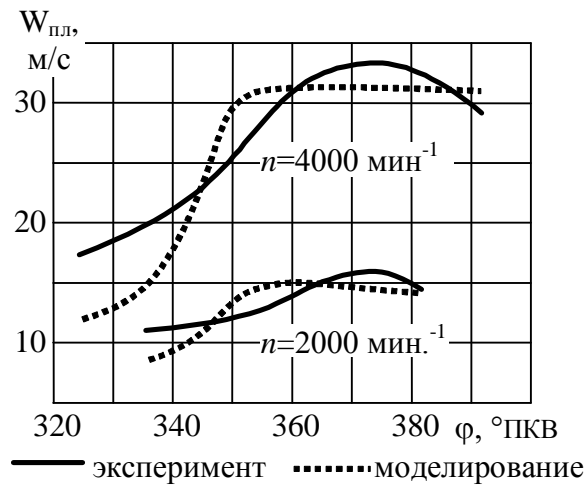


Рис. 6. Скорости пламени

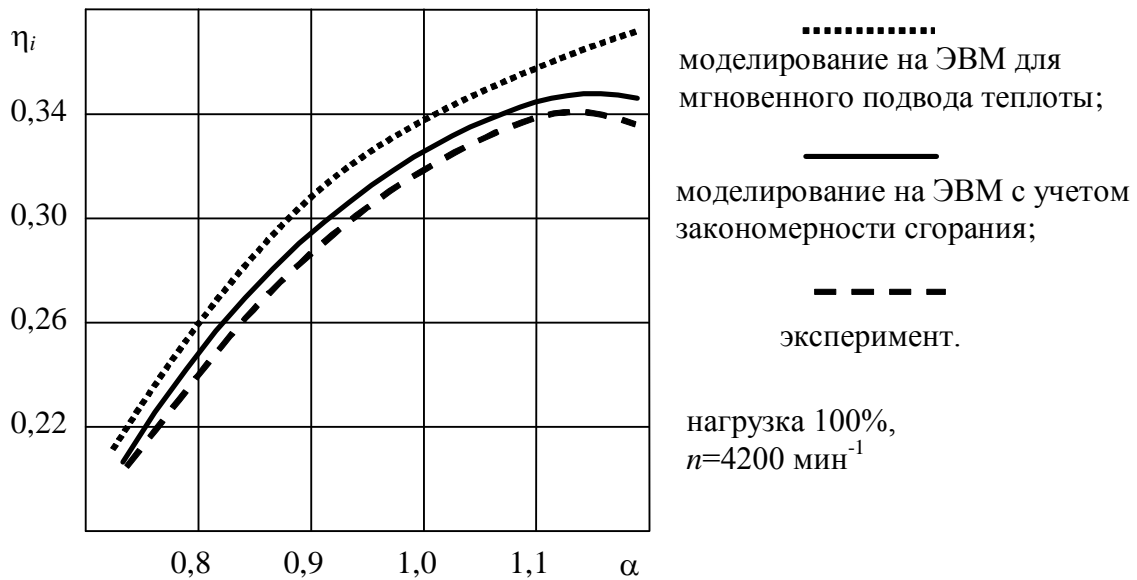


Рис. 7. Влияние состава горючей смеси на индикаторный КПД двигателя $P4$

Результаты аналитических и экспериментальных исследований основных процессов в цилиндре ПДВС, полученные в виде зависимостей различных показателей от угла ПКВ, позволяют сделать следующие выводы: разработанный метод математического моделирования процесса сгорания в двигателях с принудительным зажиганием учитывает особенности физико-химических процессов в различных фазах сгорания, форму камеры сгорания, теплообмен и другие факторы. Поэтому создается возможность аналитически исследовать влияние на закон тепловыделения таких факторов, как угол опережения зажигания, состав горючей

смеси, частота вращения, нагрузка, настройка органов впуска и выпуска подсистемы газообмена. По этой методике разработана модернизация двигателя ЗМЗ 4021.10. Практика подтвердила, что за счет оптимизации теплообмена на модернизированном четырехцилиндровом двигателе рабочим объемом 2,445 л были улучшены технико-экономические характеристики на 10...12% по сравнению с серийным.

Библиографический список

1. **Кавторадзе, Р.З.** Локальный теплообмен в поршневых двигателях / Р.З. Кавторадзе. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 592 с.
2. **Лыков, А.В.** Тепломассобмен / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1978. – 480 с.
3. **Лернер, М.О.** Регулирование процесса горения в двигателях с искровым зажиганием / М.О. Лернер. – М.: Наука, 1972. – 295 с.
4. **Орлин, А.С.** Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин. - М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
5. **Луканин, В.Н.** Двигатели внутреннего сгорания. Т. 1 Теория рабочих процессов / В.Н. Луканин. – М.: Высшая школа, 1995. – 368 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

L.A. Zakharov, I.L. Zakharov, S.N. Khrunkov

SIMULATION OF MIXING AND COMBUSTION IN THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE.

The problems simulation of mixing and combustion in the modern high-speed internal combustion engines are considered. We proposed three band model of combustion process and refined methods of determining the characteristics of heat. Calculated and experimental results confirm the applicability of the model.

Key words: Internal combustion engine, ignition, heat and gas transfer, combustion chamber, the combustion process, simulation, characteristics of heat, indexing.

УДК 629.123

М.П. Петров, В.Н. Лубенко, Д.А. Пичугин

**ЗАДАЧА ВНЕШНЕГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ФЛОТА,
ОБСЛУЖИВАЮЩЕГО УГЛЕВОДОРОДНЫЕ МЕСТОРОЖДЕНИЯ
СЕВЕРНОГО КАСПИЯ**

Астраханский государственный технический университет

Для решения задачи выбора оптимального транспортировочного состава морской техники для обслуживания углеводородных месторождений российского шельфа северного Каспия производится построение расчётной математической модели, представляющей собой программу численного эксперимента, производящую расчёт по трём направлениям: танкерному, баржевому и трубопроводному. Выбор оптимального варианта транспортных средств производится по экономическому критерию приведённых затрат.

Ключевые слова: оптимальный транспорт, морская техника, углеводородные месторождения, шельф Каспия, танкеры, баржи, трубопроводы.

Исходными данными для выбора оптимального варианта транспортных средств при обслуживании углеводородных месторождений российского шельфа северного Каспия являются средняя удалённость месторождений от портов приёма нефти, длительность навигационного периода - 260 дней для Северного Каспия, интенсивность нефтедобычи - 2,3 млн т нефти в год [1].

Российские месторождения Каспийского моря расположены в пределах двух блоков: северного с центром в точке 44°30' с.ш., 48° в.д. и центрального в районе 43° с.ш., 49° в.д. Соответствующей морской транспортно-добывающей инфраструктурой необходимо обеспечить каждый из этих блоков. Специфика месторождений северного блока заключается в расположении в зоне зимнего ледообразования и в зоне северной мелководной части шельфа [2].

Для каждого из месторождений северного блока возможно применение одного из пяти вариантов транспортировки добываемых углеводородов (рис. 1), а именно транспортировка в Астрахань или Махачкалу танкерами или баржевыми составами, либо прокладка подводного трубопровода с продолжением на суше и подключением его к существующим магистральным нефтепроводам.

Для месторождений центрального блока Российского шельфа приемлемыми являются три варианта транспортировки углеводородов, а именно - в порт Махачкала танкерами, баржевыми составами или посредством подводного трубопровода.

Варианты транспортировки наливным флотом требуют установки в районе нефтедобычи плавучего нефтехранилища и точечного рейдового причала. При рассмотрении варианта транспортировки нефти с северных месторождений в Махачкалу возможна установка нефтехранилища и точечного причала за границей зимнего ледообразования с их подключением к месту добычи посредством подводного трубопровода для осуществления круглогодичной навигации.

Разработанная математическая модель, блок-схема которой показана на рис. 2, производит расчёт стоимости приведённых затрат постройки и эксплуатации требуемой морской техники по каждому из обозначенных ранее вариантов и выбирает оптимальный из них для северного и центрального блоков углеводородных месторождений Российского шельфа Каспия. В случае признания оптимальным варианты транспортировки с помощью танкеров или наливного флота, программа осуществляет расчёт основных характеристик требуемых плавучего нефтехранилища и точечного рейдового причала.

Подпрограмма расчёта танкеров рассчитывает множество вариантов судов, определяя

стоимость приведённых затрат каждого из вариантов, в качестве результата получая требуемый состав челночных танкеров и их основные параметры. В качестве переменных варьируемых величин выступали эксплуатационная скорость и дедвейт. Расчёт основывается на статистическом анализе характеристик современных танкеров, подходящих по своим параметрам для эксплуатации на севере Каспия. Исходя из проведённого анализа на основании метода наименьших квадратов было произведено построение графиков функциональных зависимостей главных размерений танкеров от дедвейта вида:

$$X = f(DW), \quad (1)$$

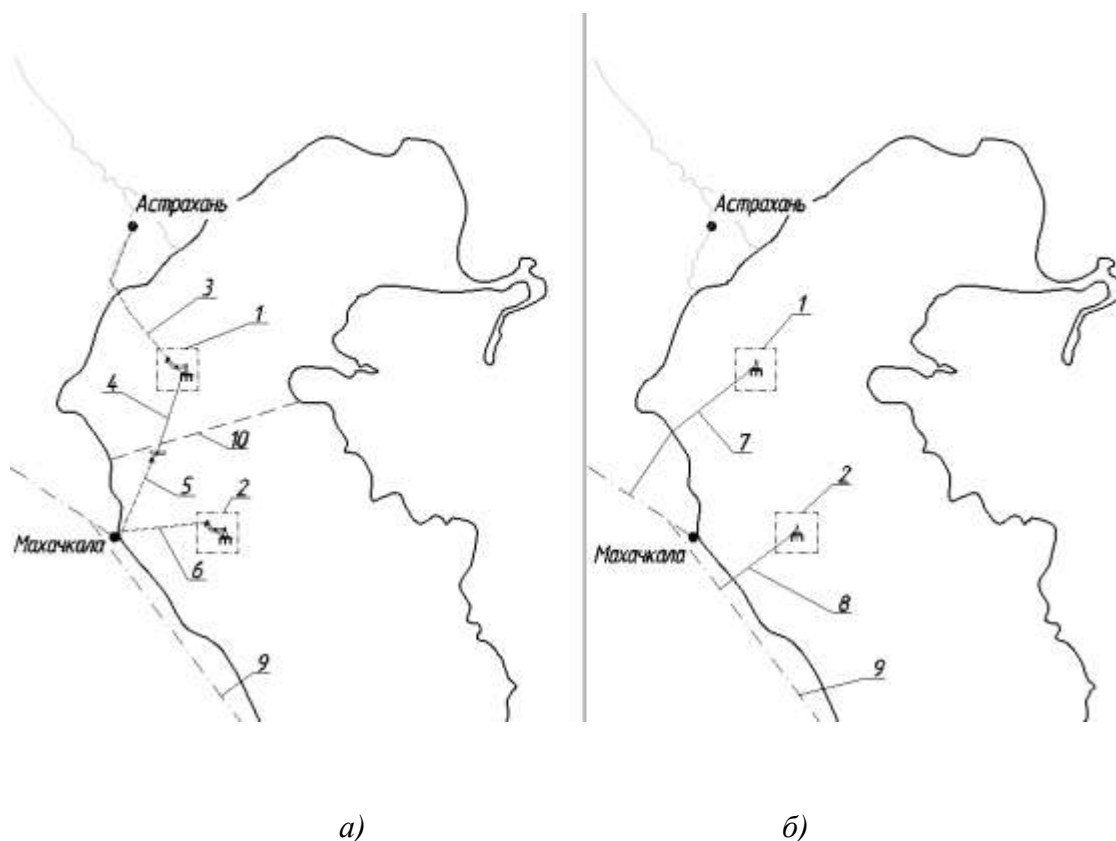


Рис. 1. Варианты транспортировочных схем для вывоза углеводородов Российского шельфа Каспия:

a – варианты транспортировки танкерами и баржами; *б* – вариант транспортировки по трубопроводам;
 1 – северный блок месторождений; 2 – центральный блок месторождений; 3 – транспортировка в Астрахань танкерами или баржами; 4 – подводный нефтепровод для доставки нефти за границу зимнего оледенения; 5, 6 – транспортировка наливным флотом в Махачкалу; 7, 8 – прокладка подводных магистральных трубопроводов; 9 – нефтепровод Баку-Новороссийск;
 10 – граница зимнего ледообразования

Далее на основании уравнений теории проектирования судов [3, 4], в том числе уравнения плавучести, и по исходным данным варьируемых величин производится расчёт основных характеристик каждого из вариантов танкеров.

Требуемое количество танкеров рассчитывается из годового объёма добываемой нефти с месторождения, грузместимости и времени полного рейса одного танкера.

Стоимость нового судна определяется по формуле:

$$Ц_i = C_i / (1 + P_c) K_{вр}, \quad (2)$$

где C_i – себестоимость i -го серийно освоенного судна;

P_c – норматив рентабельности к себестоимости судна;

$K_{вр}$ – коэффициент, учитывающий повышение стоимости строительства судов в перспективный период.

Индивидуальная себестоимость любого судна до серийно освоенного определяется комбинированным методом:

$$C_i = [20C_{mi} + 20C_{ki} + T_i K_n t(1 + K_{кр})] K_{спец}, \quad (3)$$

где C_{mi} – затраты на материалы, покупные комплектующие изделия, полуфабрикаты и услуги предприятий, тыс. руб.;

C_{ki} – затраты на контрагентские поставки и работы, тыс. руб.;

T_i – трудоёмкость постройки судна, тыс. чел.ч.;

K_n – коэффициент выполнения норм выработки;

Эксплуатационные расходы C вычисляются как:

$$C = C_1 + (C_2 + C_3) \cdot n_p, \quad (4)$$

где n_p – количество рейсов за навигацию.

Эксплуатационные расходы складываются из трех основных составляющих: так называемых постоянных расходов C_1 , подсчитываемых сразу за весь навигационный период, и расходов на топливо и смазочные материалы на ходу C_2 и на стоянке в портах C_3 , определяемых за каждый круговой рейс.

Суммарные приведенные затраты по танкерам для обслуживания месторождений рассчитываются следующим образом:

$$З = n_t \cdot (C + E_1 Ц), \quad (5)$$

где n_t – необходимое число танкеров для обслуживания месторождений;

$Ц$ – строительная стоимость танкера.

E_1 – отраслевой нормативный коэффициент. В судостроительной области $E_1 = 0,15$ [5].

Подпрограмма расчёта характеристик и состава самоходного наливного флота выполняет аналогичный расчёт, получая на выходе значения приведённых затрат для различных вариантов баржевых составов. В качестве исходных данных подпрограммы приняты: гидромеханический тип судна; форма счала состава с полным грузом; форма счепа порожнего состава; тип серийного толкача и его характеристики (мощность, строительная стоимость и т.д.); характеристики линии эксплуатации. В качестве варьируемых величин принимаются L , B отдельно взятой баржи в составе и количество барж в составе.

Программа последовательно выполняет расчёт осадки и высоты борта баржи, её водоизмещения порожнем и полного водоизмещения на основе уравнения плавучести и эмпирических формул расчёта отдельных составляющих нагрузок масс по соответствующим измерителям. Далее производится расчёт скорости состава порожнем и в грузу, времени рейса, а также экономический расчёт приведённых затрат постройки и эксплуатации баржевого состава аналогично расчёту в подпрограмме расчёта танкеров [6].

Подпрограмма расчёта магистрального трубопровода определяет его основные характеристики – суточную пропускную способность и диаметр трубы на основании интенсивности нефтедобычи с нетяного месторождения. Диаметр и толщина стенок магистрального трубопровода выбирается в соответствии с рекомендациями [7], отраслевыми и государственными стандартами. Скорость движения нефти в трубе рассчитывается на основании пропускной способности и внутреннего диаметра нефтепровода.

Программа производит расчёт количества требуемых для нефтепровода насосных станций n в зависимости от величины расчётной потери напора [8]:

$$n = \frac{i \cdot L + \Delta h}{H_{расч} - \Delta h_{доп}}, \quad (6)$$

где I – величина гидравлического уклона, т.е. потери напора на трение;

L – длина трубопровода или его рассматриваемого участка, м;

Δh – разность геодезических отметок, м;

$H_{\text{расч}}$ – расчётный напор насосной станции, тыс.м/час;

$\Delta h_{\text{расч}}$ –дополнительный напор.

Экономический расчёт трубопровода основывается на определении расходов на его постройку и эксплуатацию. Расходы на постройку нефтепроводов включают в себя следующие статьи затрат:

- приобретение труб;
- укладку труб;
- строительство инфраструктуры (насосных перекачивающих станций, резервуаров, внешнего энергоснабжения, систем канализации, теплоснабжения, пожаротушения, подсобных и обслуживающих объектов, пунктов налива нефти);

Расходы на эксплуатацию рассчитываются по средним показателям транспортировки 1 т. нефти на 1 км. Приведённые затраты для нефтепроводов для обслуживания месторождения рассчитываются на основании строительных и эксплуатационных затрат по аналогии с (5).

В случае определения программой танкерного или баржевого вариантов транспортировки в качестве оптимальных, происходит переход к подпрограмме расчёта характеристик требуемых точечного рейдового причала и плавучего нефтехранилища.

Подпрограмма расчёта точечного причала производит расчёт калибра и длины фиксирующих цепей, массу якоря и габариты буя плавучего многоякорного точечного причала. Расчёт параметров цепей и якоря производится на основании нагрузок от ветра и течения в месте установки причала. Габариты буя определяются на основании измерителей, полученных с помощью статистической обработки характеристик существующих точечных причалов подобного типа.

Расчёт плавучего нефтехранилища основывается в принятии к качеству нефтехранилища существующего танкера, срок эксплуатации которого подходит к концу, поэтому полное водоизмещение танкера D^{xp} , переоборудованного в нефтехранилище, определяется как:

$$D^{\text{xp}} = D_0^{\text{T}} + P_{\text{уст.об}} - P_{\text{сн.об}} + P_{\text{сн}} + W_{\text{xp}} \cdot \rho_{\text{н}}, \quad (7)$$

где D_0^{T} – водоизмещение порожнем танкера-претендента, т;

$P_{\text{уст.об}}$ –масса дополнительно устанавливаемого оборудования и конструкций, т;

$P_{\text{сн.об}}$ –масса снимаемого оборудования, т.

$P_{\text{сн}}$ – масса снабжения;

W_{xp} – ёмкость нефтехранилища, м³;

$\rho_{\text{н}}$ – плотность нефти, т/м³;

Нагрузки P_i определяются через измерители с судов-прототипов. Расчёт осадки порожнем и в полном грузу нефтехранилища выполняется с помощью уравнения плавучести. Требуемая ёмкость нефтехранилища рассчитывается на основании суточной интенсивности нефтедобычи и составляет 4-6 суточных объёмов извлекаемой нефти.

Если прокладка магистрального трубопровода определяется, как оптимальный вариант транспортировки, то программа выполняет переход к подпрограмме расчёта оптимальных характеристик трубоукладочного судна водоизмещающего типа. Данный расчёт параметров основан на анализе аналогичных существующих судов-трубоукладчиков и составлении функциональных зависимостей основных элементов этих судов от дедвейта. Варьируемыми величинами при расчёте множества вариантов являются грузоподъёмность трубоукладчика и эксплуатационная скорость. Уточнённый расчёт характеристик искомого судна-трубоукладчика основан на решении системы основных уравнений теории проектирования судов: плавучести, масс и остойчивости. Водоизмещение в первом приближении определяется с помощью коэффициента использования полной массы по грузоподъёмности. Уточнённый расчёт водоизмещения ведётся с помощью суммирования всех статей нагрузок, входящих в состав масс трубоукладчика. Расчёт каждой из нагрузок производится с помощью формул, опирающихся на измерители, полученные опытным путём.

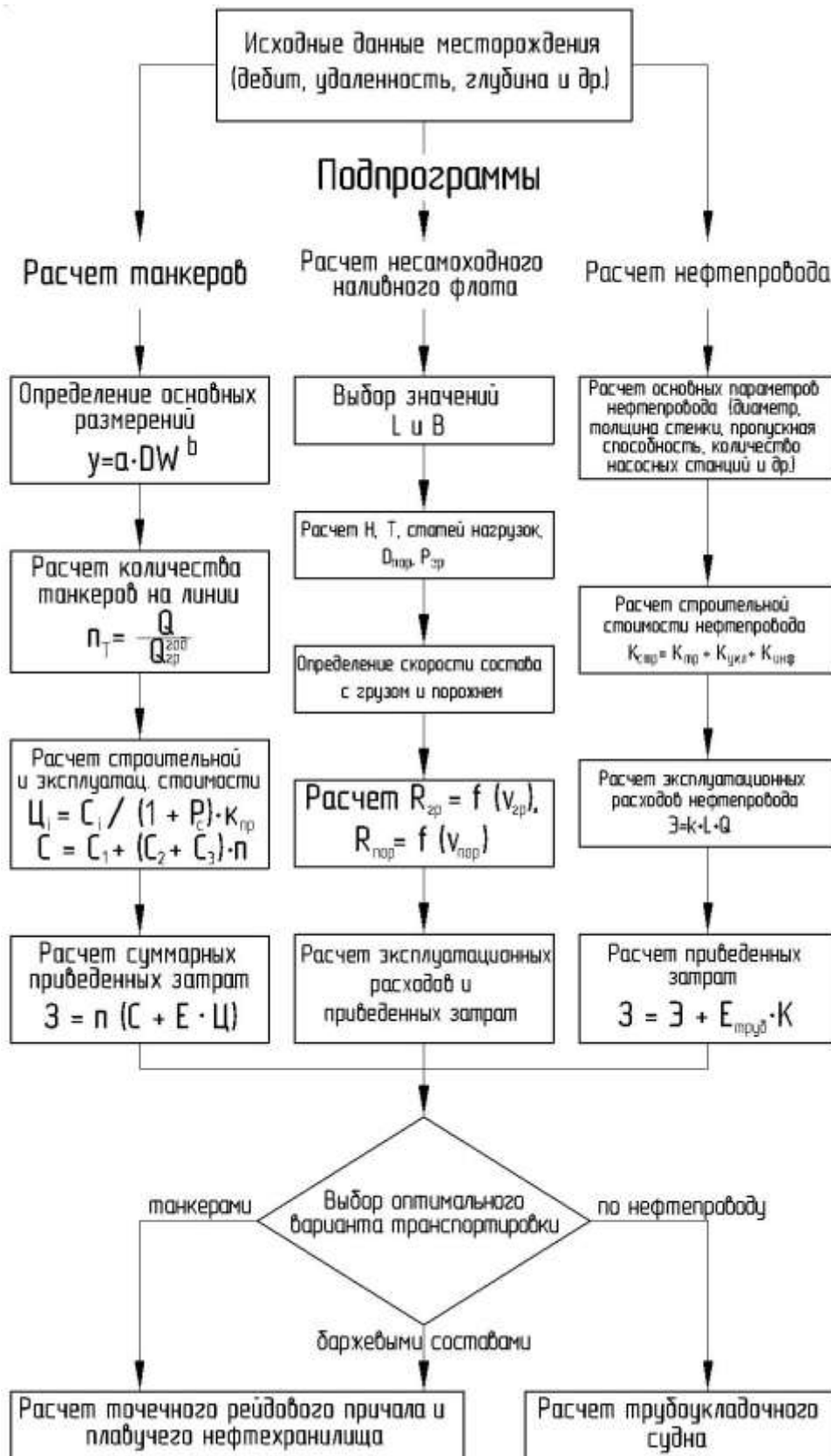


Рис. 2. Блок-схема алгоритма проектирования оптимальных технических средств для транспортировки нефти с морских месторождений Северного Каспия

На основании расчётов, выполненных программой, оптимальными для блока Северных месторождений признан вариант транспортировки нефти по смешанному трубопроводно-

танкерному варианту с прокладкой подводного трубопровода от района добычи за границу зимнего оледенения длиной около 100 км с подключением за границей льдов к комплексу, состоящему из плавучего нефтехранилища и точечного рейдового причала. В дальнейшем нефть доставляется танкерами в порт Махачкала. Диаметр подводного трубопровода 400 мм, толщина стенки 16 мм, приведённые затраты на ветвь подводного трубопровода около 1,5 млрд руб. Параметры плавучего нефтехранилища: дедвейт 30000 т, $L=140$ м, $B=32$ м, $H=15,7$ м. Для осуществления транспортировки нефти по маршруту от точечного причала до Махачкалы оптимальным является использование двух челночных танкеров со следующими характеристиками: $L=121,7$ м, $B=18,3$ м, $H=9,4$ м, $T=6,3$ м, дедвейт 8000 т, с эксплуатационной скоростью 11,2 уз.

Для центрального блока месторождений оптимальным является использование танкерной схемы транспортировки с морской техникой, аналогичной по составу и характеристикам блоку северных месторождений, но без необходимости прокладки ветки подводного нефтепровода в связи с отсутствием ледообразования в центральной части Каспийского моря. В этом случае точечный рейдовый причал и плавучее нефтехранилище устанавливаются непосредственно в районе нефтедобычи.

Библиографический список

1. Лукойл представляет результаты геологоразведки в акватории Северного Каспия // Пресс-релиз ОАО «ЛУКОЙЛ», 2004.
2. **Петров, М.П.** Факторы, влияющие на выбор оптимальной схемы транспортировки углеводородов шельфа Каспийского моря / М.П. Петров, В.Н. Лубенко // Вестник АГТУ. 2009. №1. С. 222-227.
3. **Ашик, В.В.** Проектирование судов / В.В. Ашик. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
4. **Бронников, А.В.** Проектирование судов / А.В. Бронников. – Л.: Судостроение, 1991. – 321 с.
5. **Гинзбург, А.И.** Экономическое обоснование проекта судна / А.И. Гинзбург. – Л.: ЛКИ, 1982. – 54 с.
6. **Богданов, Б.В.** Проектирование толкаемых составов и составных судов / Б.В. Богданов. – Л.: Судостроение, 1981. – 364 с.
7. Нормы технологического проектирования магистральных нефтепроводов РД 153-39.4-113-01. – М., 2001.
8. **Горяинов, Ю.А.** Морские трубопроводы / Ю.А. Горяинов. – М.: Недра, 2001. – 242 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

M.P. Petrov, V.N. Lubenko, D.A. Pichugin

PROBLEM OF EXTERNAL DESIGN OF THE FLEET FOR NORTH CASPIAN OIL FIELDS SERVICE

Mathematical model for solving the problem of choosing the best shipping of marine equipment to service the oil fields of the Russian shelf of the northern Caspian are produced. This model is a program of numerical experiment produces the calculation in three ways: tanker, barge and pipeline. Selection of optimal variants of vehicles made under the economic criteria contained costs.

Key words: optimal transportation, marine engineering, hydrocarbon deposits, the Caspian shelf, tankers, barges and pipelines.

УДК 532.013

Ю.П. Кузнецов

СОГЛАСОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПНЕВМАТИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ГИДРАВЛИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ ВОЗДУХОПОДВОДЯЩЕГО РУКАВА ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ РУЧНЫХ ПНЕВМАТИЧЕСКИХ МАШИН

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Аналитически решена задача определения приведенной длины воздухоподводящего рукава, при которой заданная мощность ручной пневматической машины является максимально достижимой, а внутренний диаметр рукава минимально возможным.

Ключевые слова: приведенная длина, воздухоподводящий рукав, ручная пневматическая машина, внутренний диаметр.

Ручные пневматические машины различного назначения используются во многих отраслях промышленности, парк машин в РФ исчисляется сотнями тысяч штук, поэтому совершенствование методов их проектирования является актуальной задачей. На рис. 1 приведена принципиальная схема системы подвода сжатого воздуха к машине.

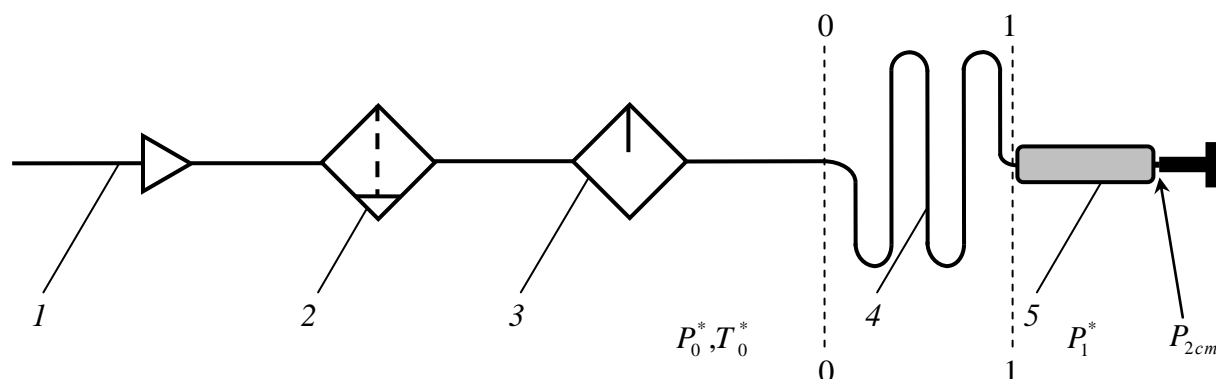


Рис. 1. Схема системы подвода сжатого воздуха к машине:

1 – трубопровод; 2 – фильтр – влагодетелитель; 3 – масленка; 4 – рукав; 5 – машина

Сжатый воздух из трубопровода 1, пройдя через фильтр 2, масленку 3 и воздухоподводящий рукав 4 поступает к машине 5. В соответствии с ГОСТ 12633-90 «Машины ручные пневматические вращательного действия» основные параметры машин определяются при следующих условиях: давление в сети 0,63 МПа, атмосферное давление от 0,088 до 0,108 МПа, температура воздуха 20°C.

Вследствие падения напора в рукаве 4 давление воздуха перед машиной 5 может существенно отличаться от номинального давления в цеховой системе сжатого воздуха 1. Поэтому для расчета пневматического двигателя требуется определить гидравлические характеристики рукава, при которых может быть достигнута заданная мощность машины, и определить соответствующие этой мощности параметры потока перед двигателем, то есть выполнить согласование параметров двигателя с гидравлическими характеристиками рукава. Естественно, что величина внутреннего диаметра рукава может быть принята любой большей, чем его минимальная величина, при которой обеспечивается заданная мощность двигателя.

Однако для ручных пневматических машин важно обеспечить минимальную жесткость рукава для создания приемлемых условий работы оператора. С этой целью требуется опре-

делить гидравлические характеристики рукава, при которых заданная мощность двигателя является максимально достижимой для выбранных условий, а внутренний диаметр рукава минимально возможным.

Для определения связи параметров двигателя и рукава примем два допущения:

1. Массовый расход газа в двигателе равен расходу газа через рукав.

2. Давление торможения потока в выходном сечении (1-1) рукава и на входе в двигатель равны.

При этих условиях мощность двигателя определится уравнением:

$$N = GH\eta_e = P_0^* \sqrt{T_0^*} \frac{\pi \cdot d^2}{4} C_p \eta_e \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\} q(\lambda_0) \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (1)$$

где $G = \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\} \cdot \frac{\pi d^2}{4} \frac{P_0^*}{\sqrt{T_0^*}} \cdot q(\lambda_0)}$ - массовый расход газа через рукав;

$$H = C_p T_0^* \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] - \text{располагаемый теплоперепад;}$$

η_e - эффективный коэффициент полезного действия двигателя;

P_0^*, T_0^* - давление и температура торможения потока во входном сечении (0-0) рукава;

$\Pi = \frac{P_{2\text{ст}}}{P_0^*}$ - располагаемый перепад давлений;

$P_{2\text{ст}}$ - статическое давление на выходе из двигателя;

k - показатель адиабаты;

C_p - теплоемкость газа;

R - газовая постоянная;

d - внутренний диаметр рукава;

$\sigma = \frac{P_1^*}{P_0^*} = \frac{q(\lambda_0)}{q(\lambda_1)}$ - коэффициент сохранения полного давления на участке (0-1);

$$q(\lambda) = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda \cdot \left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} - \text{газодинамическая функция;} \quad (2)$$

$\lambda = \frac{c}{a^*}$ - безразмерная скорость потока, c - скорость потока;

a^* - критическая скорость, равная местной скорости звука.

Во всех уравнениях параметры потока с индексом «0» относятся к входному, а параметры с индексом «1» - к выходному сечению рукава. Приведем уравнение (1) к безразмерному виду:

$$\bar{N} = \frac{\left(\frac{N}{\eta_e} \right)}{P_0^* \cdot \sqrt{T_0^*} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot C_p \cdot \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}}} = q(\lambda_0) \cdot \bar{H} = q(\lambda_0) \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right], \quad (3)$$

где \bar{N} - приведенная мощность; $q(\lambda_0)$ - приведенный расход; \bar{H} - приведенный теплоперепад.

Для определения наименьшего внутреннего диаметра рукава, при котором обеспечивается заданная мощность двигателя, достаточно решить задачу определения максимально достижимой мощности двигателя при известных гидравлических характеристиках рукава. Условия достижения максимума приведенной мощности \bar{N} , определяемой выражением (3), найдем из решения уравнения $\frac{\partial \bar{N}}{\partial \sigma} = 0$.

В работе [2] для определения связи между λ_0 и σ использовано уравнение адиабатного течения сжимаемого газа в цилиндрической трубе. Для ручных пневматических машин изменение гидравлических характеристик рукава находится в довольно узких пределах, поэтому, пренебрегая изменением плотности и скорости газа по длине рукава, для определения потерь давления на участке (0-1) можно использовать известную гидравлическую формулу $\Delta P_{0-1}^* = \left(\zeta \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \rho_0^* \cdot \frac{C_0^2}{2}$, где ζ - коэффициент гидравлического сопротивления рукава; l, d - длина и внутренний диаметр рукава; ρ_0^* - плотность; C_0 - скорость потока в начальном сечении рукава.

Величину σ для участка (0-1) можно выразить следующим образом:

$$\sigma = \frac{P_1^*}{P_0^*} = \frac{P_0^* - \Delta P_{0-1}^*}{P_0^*} = 1 - \left(\zeta \cdot \frac{l}{d} \right) \cdot \frac{\rho_0^* \cdot C_0^2}{P_0^* \cdot 2}.$$

Используя уравнение состояния $P_0^* = \rho_0^* \cdot R \cdot T_0^*$, выражение для критической скорости звука $a^* = \sqrt{\left(\frac{2 \cdot k}{k+1} \right) \cdot R \cdot T_0^*}$ и для безразмерной скорости $\lambda_0 = \frac{C_0}{a^*}$, можно выразить $\frac{\rho_0^* \cdot C_0^2}{P_0^* \cdot 2} = \left(\frac{2 \cdot k}{k+1} \right) \cdot \frac{\lambda_0^2}{2}$.

В работе [1], в уравнении адиабатного течения газа в цилиндрической трубе применено понятие приведенной длины трубы $\chi = \frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot \zeta \cdot \frac{l}{d}$. Используя его, получим окончательное выражение для коэффициента сохранения полного давления:

$$\sigma = 1 - 0,5 \lambda_0^2 \chi. \quad (4)$$

Отсюда: $\lambda_0 = \sqrt{2} \chi^{-0,5} (1 - \sigma)^{0,5}$. (5)

Далее, анализируя уравнение (2), отметим, что при $\lambda < 0,4$ приведенный расход $q(\lambda)$ изменяется практически линейно с изменением λ , а множитель $\left(1 - \frac{k-1}{k+1} \cdot \lambda^2 \right)^{\frac{1}{k-1}} \approx 1$. Поэтому при $\lambda < 0,4$ формулу (2) с погрешностью, не превышающей 3...5%, можно записать:

$$q(\lambda) \approx \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda. \quad (6)$$

С учетом (5) и (6), уравнение (3) можно записать:

$$\bar{N} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2} \cdot \chi^{-0,5} \cdot (1 - \sigma)^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (7)$$

Значение коэффициента сохранения полного давления σ , соответствующего максимальной мощности, определится из решения уравнения $\frac{\partial \bar{N}}{\partial \sigma} = 0$:

$$\frac{\partial \bar{N}}{\partial \sigma} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2} \cdot \chi^{-0,5} \cdot \frac{\partial}{\partial \sigma} \left\{ (1-\sigma)^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} = \frac{\partial}{\partial \sigma} \left\{ (1-\sigma)^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma}\right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \right\} = 0. \quad (8)$$

Из уравнения (8) следует, что приведенная длина трубы χ не входит в число параметров, определяющих условия достижения максимальной приведенной мощности.

После алгебраических преобразований уравнение (8) можно привести к выражению:

$$\left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \right] \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-k}{k}} + 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-2\cdot k}{k}} = \Pi^{\frac{1-k}{k}}, \quad (9)$$

или

$$\sigma_{N_{\max}} \cdot \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) + 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \sigma_{N_{\max}}^{-1} \right]^{1-k} = \Pi. \quad (10)$$

Проанализируем уравнение (9) с целью найти его приближенное аналитическое решение. Обозначим:

$$X = \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \right] \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-k}{k}}; Y = 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-2\cdot k}{k}};$$

$$Z = \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \right] \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-k}{k}} + 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-2\cdot k}{k}} = \Pi^{\frac{1-k}{k}}.$$

Характер протекания зависимостей X , Y и Z , представленных на рис. 2, показывает, что X - первый член уравнения (9), содержащий $\sigma_{N_{\max}}$, изменяется на порядок меньше, чем второй член этого уравнения – Y , следовательно, член X может быть заменен постоянной величиной. Целесообразно, в первом приближении, для соблюдения граничных условий, принять $X = \left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \right]$. Тогда уравнение (9) можно записать в виде:

$$\left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \right] + 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k}\right) \cdot \sigma_{N_{\max}}^{\frac{1-2\cdot k}{k}} = \Pi^{\frac{1-k}{k}}. \quad (11)$$

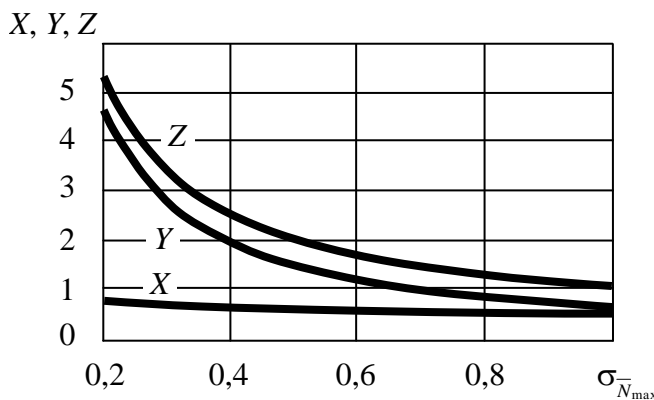


Рис. 2. Зависимости X, Y, Z от $\sigma_{N_{\max}}$.

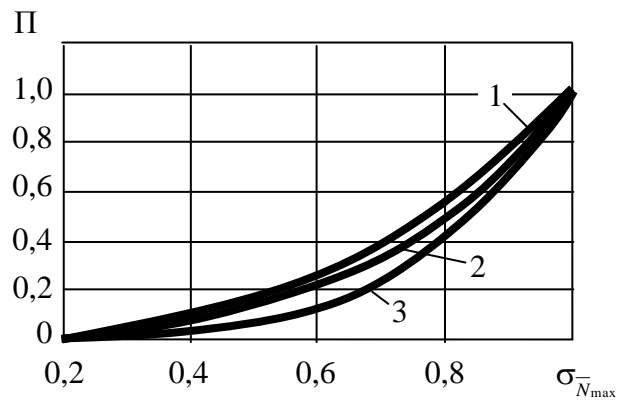


Рис.3. Графики зависимостей:

1 – по уравнению (11); 2 – по уравнению (10);
3 – по уравнению (12)

В работе [2] с использованием уравнения адиабатного течения сжимаемого газа в цилиндрической трубе было получено уравнение связи $\sigma_{N_{\max}}$ и перепада давлений Π :

$$\sigma_{\bar{N}_{\max}} \cdot \left[\frac{1}{k} + \left(\frac{k-1}{k} \right) \cdot \sigma_{\bar{N}_{\max}}^{-2} \right]^{1-k} = \Pi. \quad (12)$$

На рис. 3 приведены графики зависимостей, соответствующие уравнениям (10), (11) и (12).

Погрешность в определении $\sigma_{\bar{N}_{\max}}$ можно уменьшить, ограничив рассматриваемый диапазон изменения Π . В общем случае диапазон изменения Π : $0 \leq \Pi \leq 1$.

Случай $\Pi=0$ соответствует истечению газа из трубы в абсолютный вакуум и является чисто теоретическим. Величине $\Pi=0,01$, что соответствует перепаду давлений

$\Pi^{-1} = \frac{P_0^*}{P_{2\text{ст}}} = 100$, соответствует величина $\sigma_{\bar{N}_{\max}} = 0,4$, определенная по (10). Таких перепадов

давлений для ручных пневматических машин не используют. Реально используемый диапазон изменения Π составляет: $0,1 \leq \Pi \leq 0,75$. В этом диапазоне изменения Π формулу (11) можно аппроксимировать выражением (13), дающим значительно меньшую (не более 1%) погрешность при определении $\sigma_{\bar{N}_{\max}}$:

$$\left[1 - 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k} \right) + 2 \cdot \left(\frac{k-1}{k} \right) \cdot \sigma_{\bar{N}_{\max}}^{-1,625} \right]^{1-k} = \Pi. \quad (13)$$

Из выражения (13) определим коэффициент сохранения полного давления $\sigma_{\bar{N}_{\max}}$, соответствующий максимальной приведенной мощности:

$$\sigma_{\bar{N}_{\max}} = \left[\frac{k}{2 \cdot (k-1)} \cdot \left(\Pi^{\frac{1-k}{k}} + 2 \cdot \frac{k-1}{k} - 1 \right) \right]^{-0,6154}. \quad (14)$$

Величина \bar{N}_{\max} , при заданных Π и χ определяется уравнением (7):

$$\bar{N}_{\max} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2} \cdot \chi^{-0,5} \cdot (1 - \sigma_{\bar{N}_{\max}})^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{\bar{N}_{\max}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]. \quad (15)$$

Скорость λ_0 , соответствующая \bar{N}_{\max} , определится из уравнения (5):

$$\lambda_{0_{\bar{N}_{\max}}} = \sqrt{2} \cdot \chi^{-0,5} \cdot (1 - \sigma_{\bar{N}_{\max}})^{0,5}. \quad (16)$$

Давление перед двигателем: $P_1^* = P_0^* \cdot \sigma_{\bar{N}_{\max}}$. Для расчета наименьшего внутреннего диаметра рукава, необходимо определить величину приведенной длины рукава χ , обеспечивающую заданную мощность двигателя. Величину χ можно определить из уравнений (3) и

(7). Используя выражение $\chi = \frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot \zeta \cdot \frac{l}{d}$, заменим в уравнении (3) d через χ :

$$[d]^2 = \left(\frac{2 \cdot k}{k+1} \zeta l \right)^2 \cdot \chi^{-2}$$

Тогда уравнения (3) и (7) можно записать в виде следующего равенства: $\bar{N}_{\max} = \chi^2 \times$

$$\times \frac{\left(\frac{N}{\eta_e} \right)}{P_0^* \cdot \sqrt{T_0^*} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{2 \cdot k}{k+1} \cdot \zeta \cdot l \right)^2 \cdot C_p \cdot \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}}} = \left(\frac{k+1}{2} \right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \sigma_{\bar{N}_{\max}})^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{\bar{N}_{\max}}} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right] \cdot \chi^{-0,5}.$$

или $A\chi^{-0,5} = B\chi^2$, отсюда $\chi_{\bar{N}_{\max}} = \left(\frac{A}{B}\right)^{0,4}$, (17)

где $A = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \sqrt{2} \cdot (1 - \sigma_{\bar{N}_{\max}})^{0,5} \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{\bar{N}_{\max}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]$, (18)

$$B = \frac{\left(\frac{N}{\eta_e}\right)}{P_0^* \cdot \sqrt{T_0^*} \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{2k}{k+1}\zeta l\right)^2 \cdot C_p \cdot \sqrt{\left\{\frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1}\right)^{\frac{k+1}{k-1}}\right\}}}. \quad (19)$$

Из уравнений (1) и (19) найдем отношение $\frac{l}{d}$, соответствующее максимальной мощности:

$$\left(\frac{l}{d}\right)_{\bar{N}_{\max}} = \left(\frac{2k}{k+1}\zeta\right)^{-1} \chi_{\bar{N}_{\max}}. \quad (20)$$

Из (20) легко определить d_{\min} при заданной длине рукава. Таким образом, задача определения гидравлических характеристик рукава, обеспечивающих заданную мощность двигателя при минимальном внутреннем диаметре рукава, решена.

Основным результатом исследования является вывод, следующий из уравнения (14): коэффициент сохранения полного давления $\sigma_{\bar{N}_{\max}}$, соответствующий максимально достижимой мощности, полностью определяется величинами Π и k и, в пределах принятых допущений, не зависит от величины χ , что наглядно иллюстрируется диаграммой $\bar{N} = f(\sigma; \chi)$ на рис. 6. В указанном примере при $\Pi^{-1} = 6$ и $k=1,4$, величина $\sigma_{\bar{N}_{\max}} = 0,62$.

Рассмотрим некоторые следствия, определенные полученным результатом. Поскольку диаметр трубопровода до рукава практически не ограничен, его величина может быть принята такой, что потери давления на участке до рукава можно принять равными некоторой постоянной величине, следовательно, перепад давлений для двигателя можно считать постоянным, приняв $\Pi^{-1} = 6$. Следовательно, будут постоянными $\sigma_{\bar{N}_{\max}} = 0,62$ и $\bar{H}_{\bar{N}_{\max}} = 0,313$.

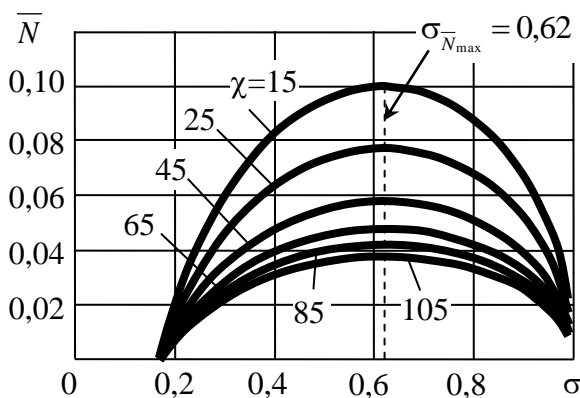


Рис. 6. График зависимости безразмерной мощности от $\bar{N} = f(\sigma; \chi)$ для $\Pi^{-1} = 6$

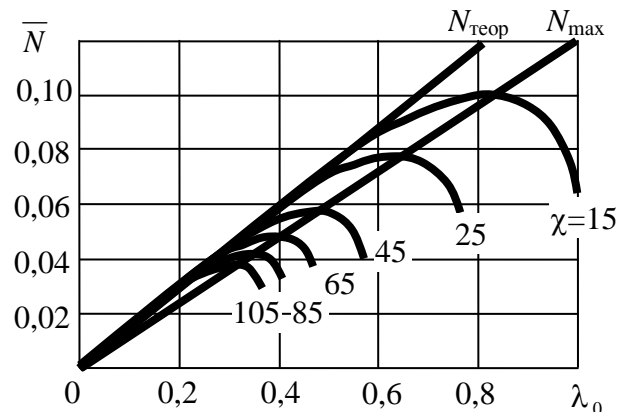


Рис. 7. График зависимости безразмерной мощности $\bar{N} = f(\lambda)$ для $\Pi^{-1} = 6$

Условие $\overline{H}_{\overline{N}_{\max}} = idem$ означает, что величина максимально достижимой мощности \overline{N}_{\max} должна изменяться линейно относительно расхода, поэтому максимальные значения приведенной мощности, полученные при каком-либо значении χ , будут принадлежать прямой линии

$$N_{\max} = \left(\frac{k+1}{2}\right)^{\frac{1}{k-1}} \cdot \lambda_0 \cdot \left[1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{\overline{N}_{\max}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}\right]. \quad (21)$$

Диаграммы на рис. 7 наглядно показывают, что при заданной величине Π , максимум зависимости $\overline{N} = f(\lambda; \chi)$ для любого значения χ , лежит на прямой линии, определенной уравнением (21). На диаграммы нанесен также график зависимости $\overline{N}_{\text{теор}} = f(\lambda)$, позволяющий графически сопоставить \overline{N}_{\max} и $\overline{N}_{\text{теор}}$ (при $\chi=0$), а также соответствующие этим мощностям расходы $G_{\overline{N}_{\max}}$ и $G_{\overline{N}_{\text{теор}}}$.

Оценим влияние гидравлических характеристик рукава на экономичность машины при проектировании машин с $\chi_{\overline{N}_{\max}}$, то есть с минимальным внутренним диаметром воздухоподводящего рукава. Влияние характеристик рукава на экономичность машины можно оценить отношением максимально достижимой приведенной мощности двигателя при заданной величине χ , к теоретически возможной приведенной мощности при $\chi=0$ и одинаковой величине приведенного расхода $q(\lambda_0)$:

$$\eta_p = \frac{\overline{N}_{\max}}{\overline{N}_{\text{теор}}} = \frac{q(\lambda_0) \cdot \overline{H}_{\overline{N}_{\max}}}{q(\lambda_0) \cdot \overline{H}_{\text{теор}}} = \frac{1 - \left(\frac{\Pi}{\sigma_{\overline{N}_{\max}}}\right)^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \Pi^{\frac{k-1}{k}}}. \quad (22)$$

Величина η_p полностью определяется величиной перепада давлений Π^{-1} , так, при $\Pi^{-1} = 6$ величина $\eta_p = 0,78$. Анализ зависимости (22) показал, что величина η_p возрастает с увеличением Π^{-1} , несмотря на то, что величина $\sigma_{\overline{N}_{\max}}$ с увеличением Π^{-1} , уменьшается. Этот вывод иллюстрируется диаграммами зависимостей $\sigma_{\overline{N}_{\max}} = f(\Pi^{-1})$ и $\eta_p = f(\Pi^{-1})$, представленными на рис. 8, из которых следует, что область целесообразных величин лежит Π^{-1} от 5 до 20.

В области $\Pi^{-1} > 20$ зависимость $\eta_p = f(\Pi^{-1})$ носит уже экспоненциальный характер, следовательно, увеличение Π^{-1} уже не приводит к существенному росту η_p . Таким образом, рекомендованный ГОСТ перепад давлений для цеховой системы экономически обоснован.

Определим предельное увеличение расхода газа при проектировании машины с минимальным диаметром воздухоподводящего рукава. Приравняем заданную мощность к макси-

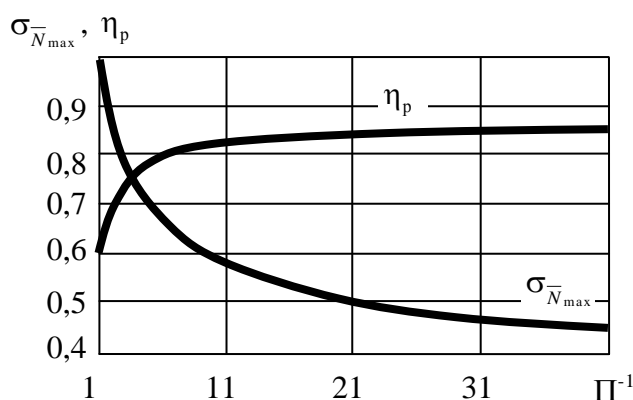


Рис. 8. Зависимости коэффициента сохранения полного давления $\sigma_{\overline{N}_{\max}} = f(\Pi^{-1})$ и коэффициента полезного действия $\eta_p = f(\Pi^{-1})$

мальной и теоретической: $N_{\text{зад}} = N_{\text{max}} = N_{\text{теор}} = G_{\overline{N}_{\text{теор}}} \cdot H_{\text{теор}} = G_{\overline{N}_{\text{max}}} \cdot H_{\overline{N}_{\text{max}}}$. Отсюда

$\frac{G_{\overline{N}_{\text{теор}}}}{G_{\overline{N}_{\text{max}}}} = \eta_p$. Следовательно, увеличение расхода воздуха при проектировании рукава на

$\chi_{\overline{N}_{\text{max}}}$ ограничено величиной η_p^{-1} . В соответствии с ГОСТ12633-90, обязательным к измерению параметром является удельный расход воздуха машины, определяемый по формуле $q_{\text{уд}} = \frac{G}{N}$. Величина $q_{\text{уд}}$ отражает суммарно экономичность двигателя и потерь в рукаве. Выясним энергетический смысл этого показателя:

$$q_{\text{уд}} = \frac{G}{N} = \frac{G}{G \cdot H \cdot \eta_e} = \frac{1}{H \cdot \eta_e} \cdot \frac{H_{\text{теор}}}{H_{\text{теор}}} = \frac{1}{H_{\text{теор}}} \cdot \frac{1}{\eta_e} \cdot \frac{1}{\eta_p}.$$

Поскольку, для условий цеховой системы, величина $H_{\text{теор}} = \text{idem}$, то $q_{\text{уд}}$ определяется величинами η_e и η_p . При проектировании машины с $\chi_{\overline{N}_{\text{max}}}$ величина $\eta_p = \text{idem}$, следовательно, в этом случае $q_{\text{уд}}$ полностью определяется η_e , то есть однозначно отражает экономичность пневматического двигателя.

Поскольку параметры воздуха в цеховой системе установлены ГОСТ 12633-90, соответственно являются постоянными, то можно построить номограммы зависимости максимально достижимой мощности двигателя N_{max} от параметров рукава. Величина N_{max} определяется уравнениями (5) и (11):

$$N_{\text{max}} = \left(\frac{N}{\eta_e} \right)_{\text{max}} = \left[P_0^* \cdot \sqrt{T_0^*} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot C_p \cdot \sqrt{\left\{ \frac{k}{R} \cdot \left(\frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k+1}{k-1}} \right\}} \right] \cdot \overline{N}_{\text{max}} = C \cdot (\zeta \cdot l)^{-0,5} \cdot d^{2,5},$$

где $C = 117,2 \cdot 10^6 \text{ [Втм}^{-2,5}\text{]}$.

Зависимость N_{max} от длины l при различных значениях внутреннего диаметра рукава представлена на рис. 9. Зависимость N_{max} от диаметра d при различных значениях длины рукава представлена на рис. 10.

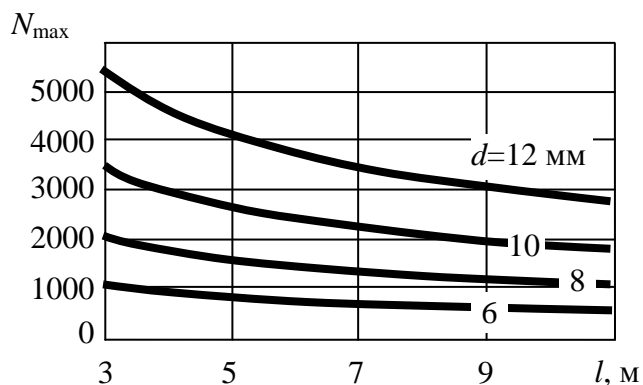


Рис. 9. Зависимость $N_{\text{max}} = f(l)$; $d = \text{var}$

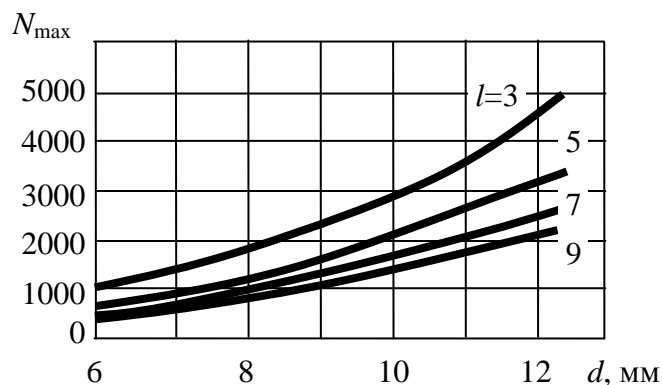


Рис. 10. Зависимость $N_{\text{max}} = f(d)$; $l = \text{var}$

Для обоих случаев $P_0^* = 0,6 \text{ МПа}$, $T_0^* = 293 \text{ К}$, $\Pi = 0,1666$; суммарный коэффициент сопротивления воздухоподводящего рукава $\zeta = 0,045$.

Библиографический список

1. Дейч, М.Е. Техническая газодинамика / М.Е. Дейч. – М.: Энергия, 1974. – 592 с.
2. Кузнецов, Ю.П. Согласование параметров неавтономного пневматического привода с гидравлическими характеристиками подводящей системы. / Ю.П. Кузнецов, Т.Ю. Кузнецова // Энергетические установки и теплотехника: сб. тр. / НГТУ. - Н. Новгород. 2010. Вып. 2. С. 86-94.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

Yu. P. Kuznetsov

**AGREEMENT OF PNEUMATIC ENGINE AND HYDRAULICS INLET HOSE
IN DESIGN OF PNEUMATIC MACHINE**

Analytically solved the problem of determining the reduced length of the air inlet hose, with which a given power manual pneumatic machine is the maximum attainable, and the inner diameter of the sleeve minimal.

Key words: reduced length, air inlet hose, hand pneumatic machine, the inner diameter.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРGETИКА

УДК.621.311.6.03

Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ДУГОВЫХ ПЕЧЕЙ И СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены электромагнитные помехи, создаваемые дугowymi печами в системах электроснабжения. Показаны два пути снижения электромагнитных помех и обеспечения электромагнитной совместимости дугowych печей с другими электроприемниками: путем схемных решений; применением фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ). Описан опыт эксплуатации различных ФКУ и даны рекомендации по выбору их типов и параметров.

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, дуговые печи, системы электроснабжения.

В настоящее время на промышленных предприятиях большое распространение получили дуговые печи (ДП) для плавки различных металлов. Мощности ДП находятся в пределах от 0,5 до 150 МВ·А. Дуговые печи являются источниками мощных электромагнитных помех (ЭМП), которые могут отрицательно влиять на функционирование других электроприемников, систем автоматики, релейной защиты и ПЭВМ, приводя к их сбою или отказу. Основными видами ЭМП, создаваемыми дугowymi печами, являются: отклонения, провалы и колебания напряжения, несинусоидальность и несимметрия токов и напряжений. При наличии ЭМП системы электроснабжения должны строиться с учетом электромагнитной совместимости (ЭМС) источников помех и других электроприемников, которые питаются от этих систем электроснабжения. Под ЭМС понимается способность устройства или системы удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не создавая недопустимых помех другим устройствам, работающим в этом окружении [1].

Электромагнитная совместимость электроприемников имеет важное практическое значение, особенно в связи с массовым внедрением в системы управления электроприемников элементов микроэлектроники и микропроцессорной техники, а также широким применением ПЭВМ и автоматизированных систем управления технологических процессов.

Электромагнитная совместимость достигается, когда уровень помехоустойчивости электроприемника выше уровня ЭМП, действующих на электроприемники в пределах электромагнитной среды, в которой он находится.

Зная назначение электроприемника, его режимы работы и характер ЭМП, которые он генерирует в сеть, выбирают класс электромагнитной среды. Для каждого класса электромагнитной среды в стандарте [2] приведены допустимые уровни ЭМП.

Электромагнитная совместимость дугowych печей и систем электроснабжения может быть обеспечена: 1) схемным путем; 2) применением специальных фильтрокомпенсирующих устройств [1, 4].

Схемные пути обеспечения ЭМС

В соответствии с п. 7.5.44 ПУЭУ допускается подключать ДП к электрическим сетям общего назначения без выполнения специальных расчетов колебаний напряжения и содержания высших гармоник, если соблюдается условие

$$\frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n S_{П.Тi}^2}}{S_{кз}} \leq 0,01Д, \tag{1}$$

где $S_{П.Тi}$ – номинальная мощность i -го печного трансформатора, МВ·А; $S_{кз}$ – мощность короткого замыкания в месте подключения ДП к электрическим сетям общего назначения, МВ·А; n – число одновременно работающих печей; $Д$ – коэффициент ($Д = 1$ для ДП переменного и 2 для ДП постоянного тока).

Таким образом, для выбора точки подключения надо знать номинальные мощности печей и мощности короткого замыкания в точках подключения.

Приведем пределы мощностей короткого замыкания на различных напряжениях.

Напряжение, кВ	Мощность короткого замыкания, МВ·А
6 – 10.....	100 – 500
35.....	500 – 1200
110.....	1600 – 6000
220.....	3000 – 10000
500.....	10000 – 20000

Исходя из этих данных, без расчета ЭМС можно подключать на разные напряжения ДП следующих мощностей:

Напряжение, кВ	Подключаемая мощность, МВ·А, не более
6 – 10.....	5
35.....	12
110.....	60
220.....	100
500.....	200

Из этих данных следует, что дуговые печи мощностью выше 60 МВ·А необходимо подключать на напряжение 220-500 кВ, это в десятки раз увеличивает стоимость их систем электроснабжения. Поэтому для печей большей мощности более перспективным методом обеспечения их ЭМС является применение фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ) прямой или косвенной компенсации [4, 5].

При выборе ФКУ необходимо решить три задачи:

- 1) какое должно быть ФКУ: групповое или индивидуальные?
- 2) какое ФКУ наиболее надежное и экономичное (прямой или косвенной компенсации)?
- 3) как выбрать параметры отдельных элементов ФКУ?

Первые ФКУ, внедренные на двух металлургических предприятиях 20 лет назад (рис. 1), были предназначены для снижения электромагнитных помех от группы ДП. Двадцатилетняя практика эксплуатации ФКУ приведенных позволяет сделать следующие выводы:

ФКУ прямой компенсации (рис 1, а):

- имеет меньшую установленную мощность элементов и не генерирует высшие гармоники тока;
- имеет большое запаздывание срабатывания ($T_3 = 20$ мс) и соответственно меньший процент снижения колебаний напряжения (рис. 2);
- наблюдаются частые пробой конденсаторов при их перезарядке и отключение ФКУ для ремонтов.

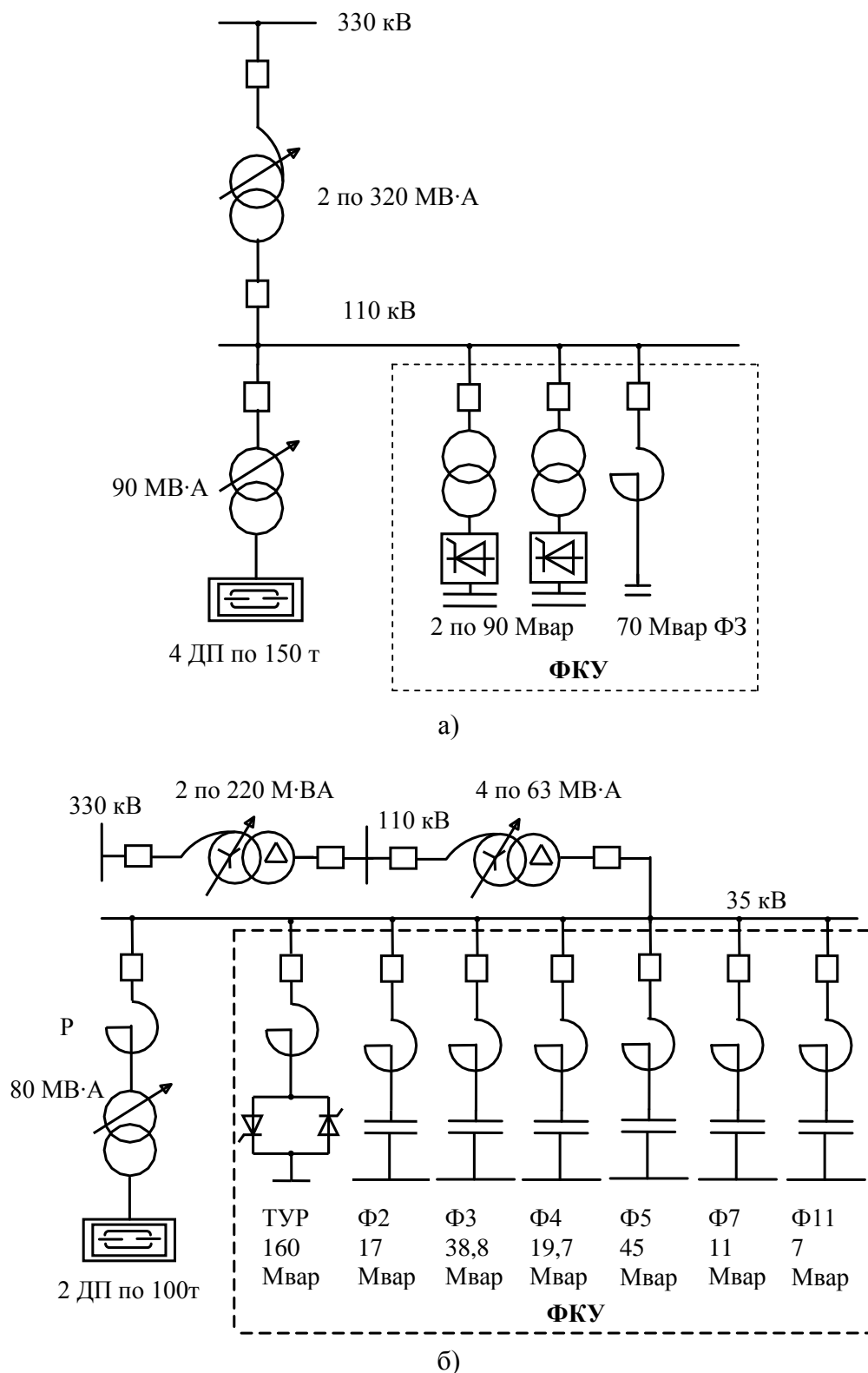


Рис. 1. Схемы ФКУ прямой (а) и косвенной (б) компенсации

ФКУ косвенной компенсации (рис. 1, б):

- имеет меньшее время запаздывания срабатывания ($T_3 = 10$ мс) и соответственно больший процент снижения колебаний напряжения (рис. 2);
- плавное регулирование и отсутствие бросков тока при регулировании;
- более надежен в работе.

На рис. 2 приведены зависимости коэффициента снижения колебаний напряжения $K_{\delta U_t}$ от степени компенсации реактивной мощности K_Q и времени T_3 запаздывания ФКУ, из которых видно, что ФКУ косвенной компенсации при $T_3 = 10$ мс может снижать колебания на 55%, а ФКУ прямой компенсации, имеющий $T_3 = 20$ мс, может снижать колебания только на 20%.

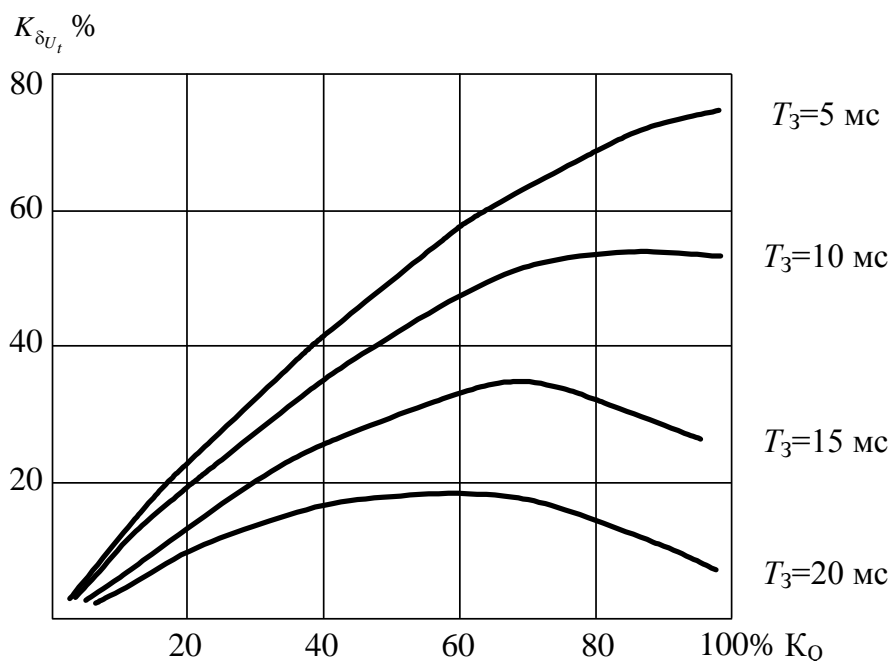


Рис. 2. Зависимости коэффициента снижения колебаний напряжения $K_{\delta U_t}$ от степени компенсации реактивной мощности K_Q и времени T_3 запаздывания ФКУ

Опыт эксплуатации ФКУ, приведенных на рис. 1, также показал, что групповой способ компенсации колебаний напряжения неэффективен, так как частота колебаний возрастает до значения

$$f_k = f_{од} \cdot 2n,$$

где $f_{од}$ – частота колебаний от одной ДП; n – число ДП.

При большой частоте колебаний ФКУ не успевает (из-за запаздывания) реагировать на все колебания, кроме этого, как видно из рис. 1, б, в ФКУ устанавливается большое количество фильтров, которые при групповой стабилизации трудно настраивать и они могут выходить из строя.

На основании опыта эксплуатации ФКУ в настоящее время как в России, так и за рубежом пришли к выводу, что надо применять ФКУ только косвенной компенсации, индивидуально на каждой ДП. На рис. 3 приведена схема ФКУ косвенной компенсации, которая смонтирована на крупной ДП мощностью 140 МВ·А на одном из металлургических предприятия [5]. Данное ФКУ состоит из управляемого тиристорами реактора ТУР мощностью 160 Мвар и трех фильтров: широкополосного С-фильтра Φ_2 мощностью 50 Мвар; настроенных фильтров на 3-ю Φ_3 и 4-ю Φ_4 гармоники мощностью 45 и 55 Мвар. Система регулирования ФКУ настроена на поддержание постоянства реактивной мощности в узле нагрузки

$$Q_{\Sigma} = Q_{ДСП} + Q_{ТУР} - Q_{\Phi_2} - Q_{\Phi_3} - Q_{\Phi_4} \geq 0.$$

В табл. 1 приведены результаты расчета ЭМП для схемы, представленной на рис. 3. Расчет проведен для нормального режима работы схемы, когда включены обе питающие линии 500 кВ ($S_{кз}$ максимальная), а также для следующих двух аварийных режимов:

- функционирует одна линия 500 кВ ($S_{кз}$ минимальная);
- автотрансформатор АТ отключен, и печь питается от шин 110 кВ, имеющих связь с другими источниками.

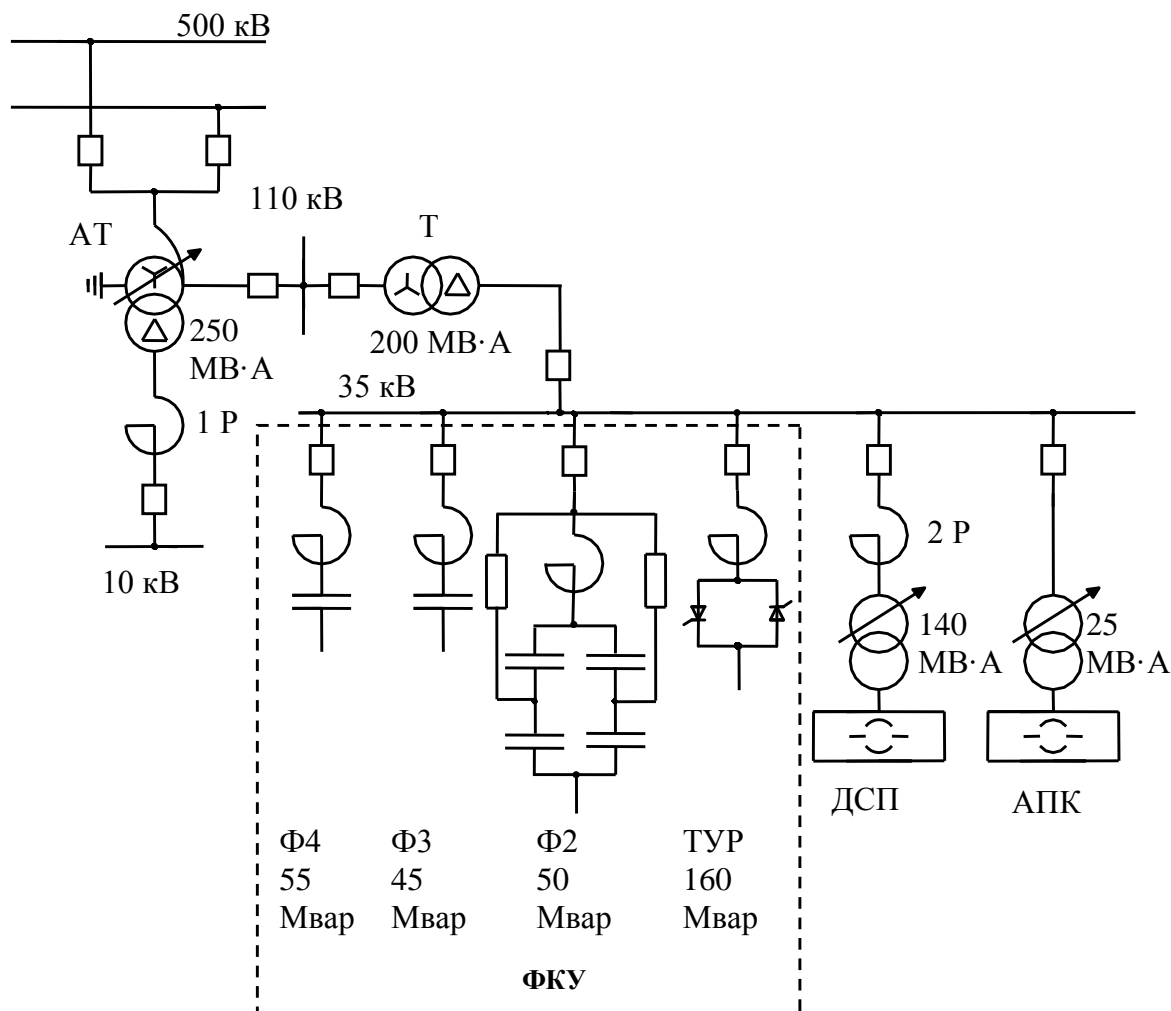


Рис. 3. Схема ФКУ косвенной компенсации, на ДП мощностью 140 МВ·А

Таблица 1

ПКЭ	Величина ЭМП при $S_{кз}$		
	на шинах 500 кВ		на шинах 110 кВ
	максимальной 17000 МВ·А	минимальной 10400 МВ·А	максимальной 4080 МВ·А
Кратковременная доза фликера: с ФКУ, о.е. без ФКУ, о.е.	0,6 0,92	0,96 1,48	2,33 3,59
Коэффициент искажения синусоидальности напряжения, %	0,26	0,41	1,29
Коэффициент несимметрии напряжения по обратной последовательности, %	0,28	0,45	1,34

Как видно из табл. 1, в нормальном режиме работы схемы все ЭМП на шинах 500 кВ соответствуют требованиям [2], а в аварийных режимах доза фликера превышает установленную в ГОСТе норму при питании от шин 110 кВ.

Рассмотрим, как выбираются параметры ФКУ косвенной компенсации для ДП.

Принцип работы данных ФКУ, подробно описанный в [1, 4], заключается в том, что ТУР потребляет реактивную мощность в противофазе с ДП. Регулирование реактора должно производиться таким образом, чтобы осуществлялось слежение за фронтом наброса и сброса реактивной мощности ДП.

Мощность регулируемого реактора ТУР определяется в следующем порядке:

- 1) определяется максимальный размах колебания на шинах источника питания, %:

$$\delta U_{t \max} = \frac{S_{\text{ПТ}} \cdot 100}{S_{\text{КЗ}}}, \quad (2)$$

где $S_{\text{ПТ}}$ – номинальная мощность печного трансформатора, МВ·А; $S_{\text{КЗ}}$ – мощность КЗ на шинах источника питания, МВ·А;

- 2) максимальный размах колебаний сравнивается в допустимым $\delta U_{\text{тд}}$ в соответствии с [1]:

$$\delta U_{\text{тд}} \geq \delta U_{t \max}. \quad (3)$$

Если неравенство (3) на шинах источника питания выполняется, то ФКУ устанавливаются без реактора ТУР, если не выполняется, определяется коэффициент уменьшения колебаний

$$K_{\delta U_t} = \frac{(\delta U_{t \max} - \delta U_{\text{тд}})}{\delta U_{t \max}}; \quad (4)$$

- 3) зная время запаздывания ФКУ (по данным завода изготовителя) по рис. 2 определяется коэффициент компенсации K_Q ;

- 4) вычисляется реактивная мощность ТУР, Мвар:

$$Q_{\text{ТУР}} = \frac{K_Q}{100} Q_{\text{МП}}, \quad (5)$$

где $Q_{\text{МП}}$ – максимальная реактивная мощность печи, Мвар (определяется или по графикам нагрузки печей или принимается равной номинальной реактивной мощности печи);

- 5) определяется мощность статического звена ФКУ, состоящего из фильтров высших гармоник, она определяется по $\text{tg } \varphi_{\text{эс}}$, который для таких потребителей задается энергосистемой

$$Q_{\text{Ф}} = P_{\text{П}} (\text{tg } \varphi_{\text{П}} - \text{tg } \varphi_{\text{ЭС}}); \quad (6)$$

где $P_{\text{П}}$ – расчетная активная мощность печи, МВт (определяется из технологических графиков); $\text{tg } \varphi_{\text{П}}$ – коэффициент реактивной мощности ДП;

- б) на основании спектрального состава токов генерируемых ДП и ТУР определяется количество фильтров высших гармоник.

В табл. 2 приведен процентный состав гармоник тока генерируемых ДП и ТУР мощностью от 50 до 150 МВ·А, по данным завода изготовителя.

Таблица 2

Порядок гармоник	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
ДП, %	5,0	6,0	3,0	4,0	1,5	2,0	1,0	1,0	0,5	0,5	0,3	0,2
ТУР, %*	-	-	-	5,1	-	2,6	-	-	-	1,1	-	0,8

* Обмотки ТУР соединены треугольником.

Опыт эксплуатации ФКУ [5] показал, что для снижения уровней высших гармоник до требований [2] достаточна установка трех фильтров (рис. 3). Фильтры на 3 и 4-ю гармоники являются настроенными на частоты 147,5 и 197,5 Гц соответственно. Фильтр на 2-ю гармонику является широкополосным фильтром типа С, он имеет малое сопротивление широкому спектру гармоник, что позволяет сократить количество фильтров в ФКУ и снизить в них потери электроэнергии.

Как показано в [3], требования к точности настройки фильтров зависят от коэффициента K_P , который определяется по выражению

$$K_P = \frac{Q_{\Phi i}}{S_{КЗ}}, \quad (7)$$

где $S_{КЗ}$ – мощность КЗ на шинах, где устанавливаются фильтры, МВ·А.

Если $K_P \geq 1,5 \cdot 10^{-2}$, то можно сократить число фильтров и снизить требования к их точности настройки. Расчеты показывают, что для систем электроснабжения с ДП K_P всегда больше $1,5 \cdot 10^{-2}$.

Суммарная мощность батарей фильтров должна быть равна или больше Q_{Φ} по (6).

Мощность батарей конденсаторов в каждом фильтре определяется по выражению

$$Q_{\Phi i} \geq 1,2 K_{СХ} \cdot I_{n\Sigma} \cdot U_{НОМ.Б}; \quad (8)$$

где $K_{СХ}$ – коэффициент, зависящий от схемы соединения конденсаторов в фильтре ($K_{СХ} = 3$ при звезде и $K_{СХ} = \sqrt{3}$ при треугольнике); $I_{n\Sigma}$ – действующее значение гармоник тока, протекающих через фильтр расчетной гармоники n_p ; $U_{НОМ.Б}$ – номинальное напряжение конденсаторов в фильтре.

Ток $I_{n\Sigma}$ определяется по выражению

$$I_{n\Sigma} = \sqrt{\sum_1^k (I_{n_q} \sigma_{n_q})^2}, \quad (9)$$

где I_{n_q} – ток n_q -й гармоники; σ_{n_q} – доля тока n_q -й гармоники протекающего через фильтр n_p ; k – число гармоник, протекающих через фильтр.

Ток I_{n_q} определяется по табл. 2.

Коэффициент σ_{n_q} определяется по выражениям [3]:

- при одном фильтре

$$\sigma_{n_q} = \frac{1}{\frac{1 - n_{q*}^2}{\kappa_p n_p^2} + 1}; \quad (10)$$

- при двух фильтрах

$$\sigma_{n_{q,1}} = \frac{1}{\frac{1 - n_{q,1*}^2}{\kappa_{p,1} \cdot n_{p,1}^2} + \frac{\kappa_{p,2} \cdot n_{p,2}^2}{\kappa_{p,1} \cdot n_{p,1}^2} \cdot \frac{1 - n_{q,1*}^2}{1 - n_{q,2*}^2} + 1}; \quad (11)$$

$$\sigma_{n_{q,2}} = \frac{1}{\frac{1-n_{q2}^2}{\kappa_{p2} \cdot n_{p2}^2} + \frac{\kappa_{p1} \cdot n_{p1}^2}{\kappa_{p2} \cdot n_{p2}^2} \cdot \frac{1-n_{q2}^2}{1-n_{q1}^2} + 1}; \quad (12)$$

где $n_{q^*} = \frac{n_p}{n_q}$; $n_{q1^*} = \frac{n_{p1}}{n_{q1}}$; $n_{q2^*} = \frac{n_{p2}}{n_{q2}}$; $\kappa_{p1} = \frac{Q_{\phi 1}}{S_{\kappa 3}}$; $\kappa_{p2} = \frac{Q_{\phi 2}}{S_{\kappa 3}}$.

Сопротивление реактора фильтров определяется по выражению

$$x_p = \frac{U_{\text{НОМБ}}^2}{Q_{\phi} n_p^2}; \quad (13)$$

Выбор параметров фильтра типа *C* подробно изложен в [6]. После выбора параметров всех трех фильтров производится проверка остаточных напряжений всех гармоник.

$$\Delta U_{n_{q^*}} = U_{n_{q^*}} (1 - \sigma_{n_{q^*}}); \quad (14)$$

где $U_{n_{q^*}}$ – напряжение гармоники до установки фильтра.

Остаточные напряжения сравниваются с нормами ГОСТ 13109-97:

$$\Delta U_{n_{q^*}} \leq U_{нд^*}. \quad (15)$$

Если неравенство (15) выполняется для всех гармоник, то расчет заканчивается, если нет, то необходимо установить еще один фильтр на гармонику, где $\Delta U_{n_{q^*}} \geq U_{нд^*}$.

Напряжение гармоник до установки фильтра находится по выражению [1]:

$$U_{n_q} = \frac{I_{n_q}}{|Y_{\Sigma q}|}, \quad (16)$$

где $Y_{\Sigma q}$ – суммарная проводимость схемы замещения от ДП до фильтра [1].

Пофазное регулирование обмоток ТУР позволяет снижать также несимметрию напряжения в сетях с дуговыми печами.

Выводы

1. Для повышения качества электроэнергии в электрических сетях с дуговыми печами рекомендуется применять индивидуальные фильтрокомпенсирующие установки косвенной компенсации.

2. Применение ФКУ позволяет также увеличить вводимую в печь мощность (за счет стабилизации напряжения), снижает время плавки и повышает производительность ДП.

Библиографический список

1. **Вагин, Г.Я.** Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – Н.Новгород: НГТУ, 2004. – 214 с.
2. ГОСТ Р 51317.2.4-2000. Уровни электромагнитной совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в системах электроснабжения. – М.: Изд-во стандартов. 2000.

3. **Жежеленко, И.В.** Качество электроэнергии на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко, М.Л. Рабинович, В.М. Божко. – Киев: Техніка, 1981. – 160 с.
4. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 336 с.
5. **Вагин, Г.Я.** К вопросу об экономической целесообразности применения на промышленных предприятиях сверхмощных дуговых печей // Промышленная энергетика. 2009. № 2. – С 35-37.
6. **Коверникова, Л.И.** Применение фильтров С-типа для нормализации напряжений высших гармоник в сети с распределенной нелинейной нагрузкой // Сб. докладов 10-й НТК по электромагнитной совместимости. – СПб., 2008. – 350 с.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

G. Vagin, A. Sevostianov, S. Yurtaev

ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY OF ARC-TYPE FURNACES AND SYSTEMS OF ELECTRIC ENERGY SUPPLY

The article deals with electromagnetic interferences created by arc-type furnaces in the systems of electric energy supply. Two ways to reduce electromagnetic interference and to provide electromagnetic compatibility of arc-type furnaces with other electrical receivers are demonstrated: schematic solutions; application of filter compensating devices (FCD). Experience of application of various FCD is described and recommendations on the choice of their types and parameters are given.

Key words: Electromagnetic compatibility, arc-type furnaces, systems of electric energy supply.

УДК 621.314

В.П. Кириенко¹, В.В. Ваняев¹, Е.А. Копелович²**ОСОБЕННОСТИ РЕЖИМОВ РАБОТЫ КОНДЕНСАТОРОВ
В ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВОК**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Института прикладной физики РАН (Н. Новгород)²

Рассмотрены особенности режимов работы конденсаторов в АС/DC преобразователях электрофизических установок. Предложены методика расчета допустимых режимов конденсаторов с применением имитационных моделей преобразователей и методика их выбора с использованием аналитической взаимосвязи параметров, полученной на основе паспортных данных.

Ключевые слова: конденсатор, преобразователь, электрофизическая установка, имитационные модели, методика выбора, допустимые режимы.

Последние десятилетия характеризуются широким использованием в различных областях науки и техники мощных и сверхмощных электрофизических установок (ЭФУ) [1]. К ним относятся генераторы и усилители когерентного электромагнитного излучения. По уровню выходной мощности несомненное лидерство среди таких ЭФУ принадлежит СВЧ установкам и лазерным комплексам, первые из которых позволяют получать излучение мощностью порядка 1 МВт (10^6 Вт) в непрерывном режиме, а вторые – до 1 ПВт (10^{15} Вт) в моноимпульсном режиме.

Наиболее мощные СВЧ-установки построены на гирорезонансных приборах (гиротронах, гироклистронах и др.) или приборах магнетронного типа (магнетронах и др.). Современные мощные лазерные комплексы выполняются на базе газовых или твердотельных лазеров. Для мощных СВЧ и лазерных установок необходимы высоковольтные источники питания (ВВИП), концепция построения которых изложена в [1].

Исходя из анализа требований, приведенных в [1], ВВИП мощных ЭФУ могут быть выполнены на базе трех структурных схем:

- с прямой передачей энергии в нагрузку через высоковольтный АС/DC преобразователь с фильтром;
- с передачей энергии в нагрузку через высоковольтный АС/DC преобразователь и коммутатор;
- с передачей энергии в нагрузку от промежуточного емкостного накопителя энергии (ЕНЭ) через коммутатор. В этом случае АС/DC преобразователь выполняет функцию зарядного устройства (ЗУ) ЕНЭ.

Одним из наиболее перспективных являются ЗУ, построенные на базе полупроводниково-конденсаторных преобразователей. Они имеют простую силовую схему, обеспечивают параметрическую стабилизацию выходных параметров (тока или мощности) и естественное токоограничение в аварийных режимах.

В процессе функционирования к конденсаторам, содержащимся в их силовых контурах, прикладывается несинусоидальное напряжение, изменяющееся в течение цикла зарядки, что не позволяет выбирать их тип и режим работы непосредственно по величине этого напряжения и его частоте [1, 2].

В подобных случаях исходят из того, что эксплуатационные режимы [3] не должны выходить за пределы допустимых значений:

- мощности частичных разрядов;

- мощности тепловыделения;
- амплитуды тока через конденсатор;
- действующего значения тока через конденсатор.

Данное обстоятельство ведет к необходимости определения этих пределов и факторов, влияющих на них.

Мощность частичных разрядов в диэлектрике зависит от приложенного напряжения. Для непропитанных конденсаторов или конденсаторов с вязкой пропиткой, у которых частичные разряды недопустимы, величина допустимого размаха переменного несинусоидального напряжения $U_{\text{пнд}}$ определяется из условия

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{псн}}, \quad (1)$$

где $U_{\text{псн}}$ - наибольший допустимый размах синусоидального напряжения конденсатора, равный номинальному напряжению конденсатора $U_{\text{н}}$

$$U_{\text{псн}} = U_{\text{н}}. \quad (2)$$

Для конденсаторов с жидкой пропиткой, в случае равной длительности косинусоидальной формы фронта t_{ϕ} и спада несинусоидального напряжения, величину $U_{\text{пн}}$ рассчитывают по формуле

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{пс}} \sqrt[m]{\frac{f_{\text{с}}^n \tau_{\text{с}}}{f_{\text{н}} \tau_{\text{н}}} (2t_{\phi})^{n-1}}, \quad (3)$$

где $U_{\text{пс}}$, $f_{\text{с}}$, $\tau_{\text{с}}$ - размах (двойная амплитуда) напряжения несинусоидальной формы, его частота и срок службы конденсатора при этих условиях соответственно; $f_{\text{н}}$, $\tau_{\text{н}}$ - с частота несинусоидального напряжения и требуемый срок службы соответственно; m , n - показатели степени, определяемые типом диэлектрика ($n = 0,6 \dots 1,0$; $m = 4 \dots 6$ для пленочных диэлектриков).

Если конденсатор работает в области частот, где его напряжение ограничено допустимой мощностью тепловыделения, то ее величина $\Delta P_{\text{сд}}$ в установившемся режиме работы при синусоидальном напряжении может быть определена по формуле

$$\Delta P_{\text{сд}} = 0,5 C \omega U_{\text{мд}}^2 \operatorname{tg} \delta, \quad (4)$$

где C , $\operatorname{tg} \delta$ - емкость конденсатора и тангенс угла потерь диэлектрика; ω - круговая частота приложенного напряжения; $U_{\text{мд}}$ - допустимая при заданной частоте амплитуда синусоидального напряжения, определяемая из графиков зависимости $U_{\text{мд}} = \varphi(f)$ для данного типа конденсатора.

Величина потерь мощности при несинусоидальном напряжении с косинусоидальным фронтом и спадом кривой в соответствии с [2] равна

$$\Delta P_{\text{н}} = 0,239 C \omega U_{\text{пн}}^2 \operatorname{tg} \delta \cdot \lg 1,8 \frac{T}{t_{\phi}}, \quad (5)$$

где $U_{\text{пн}}$ - размах несинусоидального напряжения заданной формы; $T = 2\pi/\omega$ - период переменной, составляющей напряжения конденсатора.

Из выражений (4) и (5) при условии $\Delta P_{\text{н}} = \Delta P_{\text{сд}}$ определяют допустимый размах $U_{\text{пнд}}$ несинусоидального напряжения заданной формы, обеспечивающего такие же потери в конденсаторе, что и при синусоидальном напряжении:

$$U_{\text{пнд}} = U_{\text{мд}} \sqrt{\frac{1}{0,48 \lg 1,8 \frac{T}{t_{\phi 1}}}}. \quad (6)$$

Особенность стационарных режимов работы конденсаторов ЗУ в том, что они состоят из последовательности следующих друг за другом циклов, в пределах каждого из которых

величина размаха их напряжения $U_{\text{пн}}$ и длительность его фронта $t_{\text{ф}}$ (спада), в общем случае, являются функциями времени.

В подобных условиях представляется целесообразным ввести понятия эквивалентных синусоидальных напряжения $U_{mэ}$ и тока $I_э$, имеющих неизменную амплитуду и обеспечивающих такие же потери в конденсаторах при заданной рабочей частоте ЗУ, что и реальные несинусоидальные напряжение $U_{\text{пн}}(t)$ и действующее значение тока $I_{\text{н}}(t)$, мгновенные значения которых изменяются по величине и форме в течение цикла зарядки.

Величина потерь мощности в конденсаторе при напряжении $U_{\text{пн}}(t)$ равна среднему за цикл зарядки ЕНЭ значению потерь мощности, определяемому из выражения

$$\Delta P_{\text{нрц}} = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \Delta P_{\text{н}}(t) dt = 0,239 J C \omega \text{tg} \delta, \quad (7)$$

где J - интеграл, определяемый по формуле

$$J = \frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} \left[U_{\text{пн}}^2(t) \cdot \lg 1,8 \frac{T}{t_{\text{ф}}(t)} \right] dt, \quad (8)$$

$T_{\text{ц}}$ - длительность цикла зарядки ЕНЭ.

Потери мощности при эквивалентном синусоидальном напряжении с амплитудой $U_{mэ}$ будут

$$\Delta P_э = 0,5 C \omega U_{mэ}^2 \text{tg} \delta. \quad (9)$$

Амплитуда эквивалентного синусоидального напряжения $U_{mэ}$, соответствующая равенству потерь $\Delta P_{\text{нрц}} = \Delta P_э$, определяется из выражения

$$U_{mэ} = \sqrt{0,48 \cdot J}. \quad (10)$$

В этом случае величина допустимого размаха эквивалентного синусоидального напряжения $U_{mэд}$ должна выбираться из равенства

$$U_{mэд} = U_{mд}. \quad (11)$$

Действующее значение эквивалентного синусоидального тока $I_э$, определяющее потери мощности в токоведущих частях конденсатора, рассчитывается как действующее за цикл зарядки ЕНЭ значение реального несинусоидального тока $i_{\text{н}}(t)$ в соответствии с выражением

$$I_э = \sqrt{\frac{1}{T_{\text{ц}}} \int_0^{T_{\text{ц}}} i_{\text{н}}^2(t) dt}. \quad (12)$$

В установленном тепловом режиме работы ЗУ потери мощности в токоведущих частях конденсатора не должны превышать допустимого по условиям охлаждения значения, независимо от формы кривой тока. В качестве допустимого эквивалентного синусоидального тока $I_{эд}$ может быть выбрано наибольшее допустимое действующее значение синусоидального тока $I_{д}^{\text{max}}$, определяемого по частотным характеристикам данного типа конденсатора [1]

$$I_{эд} = I_{д}^{\text{max}}. \quad (13)$$

Интеграл J , величины $U_{mэ}$ и $I_э$ определяются численными методами при расчете электромагнитных процессов ЗУ в течение цикла зарядки накопительного конденсатора или в процессе имитационного моделирования, например, в среде *Matlab Simulink*.

При расчете допустимой амплитуды тока через конденсатор следует основываться на том, что потери энергии, выделяемые в металлических частях конденсатора при произволь-

ной форме импульса тока, протекающего через него, не должны превышать значение потерь, выделяемых в конденсаторе при протекании через него тока прямоугольной формы с известными параметрами, приводимыми в справочных данных [4].

Потери энергии при протекании импульса тока прямоугольной формы могут быть определены из выражения

$$W_1 = r I_{мп}^2 t_{и} = r \left(C \frac{du}{dt} \right)_{\max}^2 \cdot \frac{U_{н}}{\left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}} = r U_{н} C^2 \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}, \quad (14)$$

где r - активное сопротивление токопроводящих элементов конденсатора; $I_{мп}$ - амплитуда прямоугольного импульса тока; $t_{и}$ - длительность импульса тока; $U_{н}$ - номинальное напряжение конденсатора; C - номинальная емкость; $\left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}$ - наибольшее паспортное значение скорости нарастания напряжения на конденсаторе.

Потери энергии при протекании импульса тока произвольной формы определяются по формуле

$$W_2 = r \int_0^{t_{и}} i^2 dt. \quad (15)$$

Для надежной работы конденсатора должно соблюдаться условие $W_2 \leq W_1$, из которого следует

$$\int_0^{t_{и}} i^2 dt \leq U_{н} C^2 \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}. \quad (16)$$

При форме импульса тока, близкой к синусоидальной, что характерно для конденсаторов ЗУ, выражение (6) после преобразований примет вид

$$I_m \leq 2C \sqrt{\frac{U_{н}}{t_{и}} \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}}, \quad (17)$$

где I_m - амплитуда импульса тока.

Предельно допустимое значение амплитуды импульса тока $I_{мд}$ в соответствии с (17) будет

$$I_{мд} = 2C \sqrt{\frac{U_{н}}{t_{и}} \left(\frac{du}{dt} \right)_{\max}}. \quad (18)$$

Выбор допустимой амплитуды синусоидального напряжения заданной частоты, прикладываемого к конденсатору, и токов конденсатора производится на основе паспортных зависимостей $U_{мд} = \varphi(f)$ на выпускаемую продукцию, указанных разработчиками и предприятиями-изготовителями. Алгоритм определения допустимой амплитуды напряжения конденсаторов по номограммам, предлагаемым предприятиями-изготовителями, представлен на рис. 1.

Применение этих номограмм вызывает неудобства при необходимости построения частотных характеристик конденсаторов в широком диапазоне изменения рабочей частоты и номинальной емкости.

В связи с этим представляется целесообразным получение аналитической зависимости, связывающей допустимую амплитуду напряжения конденсаторов с величиной рабочей частоты и номинальной емкостью, базирующейся на паспортных данных завода-изготовителя.

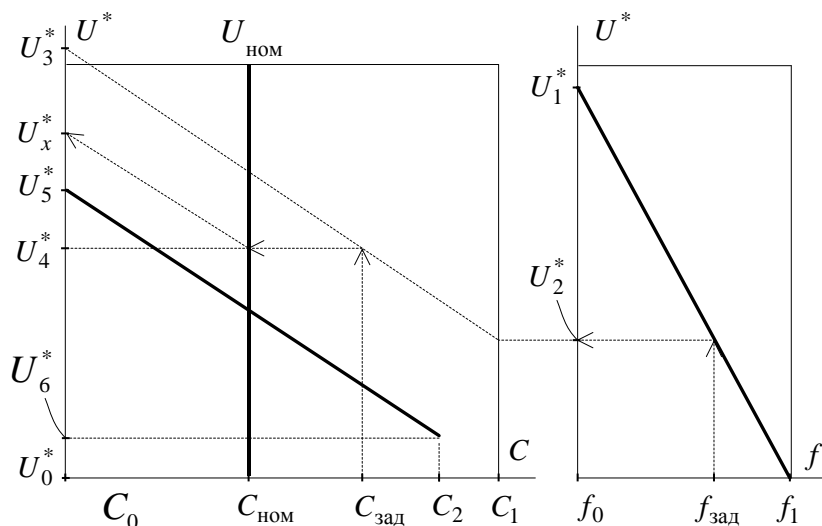


Рис. 1. Номограммы для определения допустимой амплитуды напряжения конденсаторов

Из рис. 1 с учетом логарифмического масштаба диаграмм могут быть получены следующие соотношения:

$$\lg U_2^* = \lg U_1^* - k_1(\lg f_{\text{зад}} - \lg f_0) = \lg U_1^* - k_1 \lg \frac{f_{\text{зад}}}{f_0}, \quad (19)$$

$$\lg U_3^* = \lg U_2^* + k_2(\lg C_1 - \lg C_0) = \lg U_2^* + k_2 \lg \frac{C_1}{C_0}, \quad (20)$$

$$\lg U_4^* = \lg U_3^* - k_2(\lg C_{\text{зад}} - \lg C_0) = \lg U_3^* - k_2 \lg \frac{C_{\text{зад}}}{C_0}, \quad (21)$$

где коэффициенты k_1 и k_2 рассчитываются по формулам:

$$k_1 = \lg \frac{U_1^*}{U_0^*} / \lg \frac{f_1}{f_0}, \quad (22)$$

$$k_2 = \frac{\lg U_5^* - \lg U_6^*}{\lg C_2 - \lg C_0} = \lg \frac{U_5^*}{U_6^*} / \lg \frac{C_2}{C_0}. \quad (23)$$

При определении величины коэффициента k_2 величины U_5^* и C_2 выбираются произвольно. В приведенных выражениях $U_0^*..U_6^*$ - относительные значения напряжений в процентах, определяемые из номограмм, а $f_{\text{зад}}$ - заданное значение рабочей частоты.

Искомое относительное значение допустимой амплитуды напряжения (в процентах) определяется аналогично:

$$\lg U_{\text{мд}}^* = \lg U_4^* + k_2(\lg C_{\text{ном}} - \lg C_0) = \lg U_4^* + k_2 \lg \frac{C_{\text{ном}}}{C_0}. \quad (24)$$

Подставляя выражения (1...5), (19...23) в (6) и (24), после несложных преобразований, получаем окончательно

$$\lg U_{\text{мд}}^* = \lg U_1^* + \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}} \lg \frac{C_1 C_{\text{ном}}}{C_0 C_{\text{зад}}} - \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f_{\text{зад}}}{f_0}. \quad (25)$$

Абсолютное значение допустимой амплитуды напряжения $U_{мд}^*$ рассчитывается по формуле

$$U_{мд} = U_{мд}^* U_{н} = U_{н} \cdot 10^{A-2}, \quad (26)$$

где

$$A = \lg U_{мд}^* = \lg U_1^* + \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}} \lg \frac{C_1 C_{ном}}{C_0 C} - \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f_{зад}}{f_0}; \quad (27)$$

$U_{н}$ - номинальное напряжение конденсатора.

Полученные выражения (26) и (27) позволяют найти частотную зависимость допустимых значений действующего $I_{д}$ и максимального $I_{д}^{max}$ токов конденсатора при $f_{зад} = var$, имеющую вид

$$I_{д} = \sqrt{2} \pi f_{зад} C U_{мд}. \quad (28)$$

Методика выбора конденсаторов ЗУ

Полученные аналитические зависимости, связывающие величину допустимой амплитуды синусоидального напряжения конденсаторов с величиной их емкости и рабочей частоты, позволяют упростить алгоритм выбора конденсаторов и повысить его точность, так как при этом не требуется постоянное обращение к графическому материалу.

В этом случае поиск производится в следующей последовательности.

1. Выбирают предварительно тип конденсатора и его номинальное напряжение $U_{н}$, исходя из рабочей частоты ЗУ и наибольшего размаха несинусоидального напряжения $U_{пн}$, определяемого на основе анализа процессов ЗУ, в соответствии с условием $U_{пн} \leq U_{н}$.

2. По результатам моделирования ЗУ определяют значение $U_{мэ}$, которое принимают за допустимое значение, полагая его равным $U_{мд}$, т.е. $U_{мд} = U_{мэд} = U_{мэ}$.

3. Определяют относительное значение допустимой амплитуды синусоидального напряжения конденсатора $U_{мд}^* = \frac{U_{мд}}{U_{н}}$.

4. Находят расчетную емкость $C_{расч}$, при которой обеспечиваются допустимые потери при заданной частоте f , подставляя полученную величину $U_{мд}^*$ в выражения

$$C_{расч} = C_1 \cdot 10^B, \quad (29)$$

где

$$B = \lg \frac{C_{ном}}{C_0} - \left(\lg U_{мд}^* + \frac{\lg \frac{U_1^*}{U_0^*}}{\lg \frac{f_1}{f_0}} \lg \frac{f}{f_0} - \lg U_1^* \right) \frac{\lg \frac{U_5^*}{U_6^*}}{\lg \frac{C_2}{C_0}}. \quad (30)$$

5. Выбирают ближайшее меньшее из стандартного ряда номиналов значение емкости, соответствующее условию $C \leq C_{расч}$.

6. Находят число N параллельно соединяемых конденсаторов, исходя из требуемых значений емкости дозирующего $C_{д}$ или разделительного $C_{р}$ конденсаторов $N \approx \frac{C_{д(р)}}{C}$, округляя полученное значение до большего целого числа.

7. Находят амплитудное и действующее значение тока единичного конденсатора и сравнивают их с допустимыми значениями синусоидальных величин, определяемых соответственно ранее изложенному:

$$I_{m1} = \frac{I_m}{N} \leq I_{мд}, \quad (31)$$

$$I_{\text{э}1} = \frac{I_{\text{э}}}{N} \leq I_{\text{д}}^{\text{max}}. \quad (32)$$

8. При нарушении одного из условий (31), (32) задаются увеличенным значением номинального напряжения и повторяют расчет.

Описанная методика дает возможность выбора типов и параметров конденсаторов в установившихся периодических режимах их работы.

В моноимпульсных режимах ЗУ температура нагрева может не достигать допустимых значений, что позволяет увеличить допустимые потери мощности в диэлектрике и токопроводящих элементах в сравнении с установившимся режимом. Однако детальный расчет таких режимов требует знания ряда тепловых параметров конденсаторов, которых, как правило, нет в справочных данных, что обуславливает необходимость проведения объемных теоретических и экспериментальных исследований. В этой ситуации можно применять приведенную методику, учитывая возможное недоиспользование выбранных элементов по нагреву.

Выводы

1. Предложенная методика расчета допустимых режимов конденсаторов ЗУ с применением имитационных моделей, реализованных в среде Matlab Simulink, позволяет обоснованно подходить к выбору конденсаторного оборудования при различных параметрах зарядного цикла в установившемся периодическом режиме его работы.

2. Использование аналитической зависимости, связывающей допустимую амплитуду напряжения конденсаторов с величиной рабочей частоты и номинальной емкостью, полученной на основе паспортных данных, дает возможность достаточно просто рассчитывать характеристики конденсаторов в широком диапазоне изменения рабочей частоты и номинальной емкости.

3. Предложенная методика выбора конденсаторов несложна и может быть применена в расчетах моноимпульсных режимов ЗУ, если допустимо недоиспользование выбираемых элементов по нагреву.

4. Описываемая методика использована в Институте прикладной физики РАН (г. Н.Новгород) при разработке преобразователей мощных ЭФУ различного функционального назначения. В частности, в серии ВВИП для гиротронных комплексов исследовательского и прикладного назначения; ряде ВВИП моноимпульсных твердотельных лазеров петаваттного уровня мощности; ВВИП технологической магнетронной установки для напыления алмазных пленок. Имеющийся значительный опыт эксплуатации этих устройств подтверждает достоверность предлагаемой методики расчета конденсаторов в режимах работы, отличных от паспортных.

5. Методика может быть применена также для выбора конденсаторов других типов преобразовательных устройств с периодическим режимом работы.

Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. - Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.

2. **Кириенко, В.П.** Режимы работы высоковольтных зарядных устройств с дозирующими конденсаторами для электрофизических установок / В.П. Кириенко, Е.А. Копелович // Электричество. 2006. № 5. С. 25–31.
3. **Ермуратский, В.В.** Конденсаторы переменного тока в тиристорных преобразователях / В.В. Ермуратский, П.В. Ермуратский. – М.: Энергия, 1979. – 224 с.
4. Высоочастотные полипропиленовые конденсаторы: Каталог ОАО «НИИ «ГИРИКОНД»». – М., 2007.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

V.P. Kirienko, V.V. Vanyaev, E.A. Kopelovich

THE FEATURES OF THE CAPACITORS OPERATION REGIMES IN THE CONVERTERS OF THE ELECTRO PHYSICAL INSTALLATIONS

The features of the capacitors operation regimes in AC/DC are considered. The procedure for the calculation of capacitors allowable operation regimes using converter imitation models and the procedure for capacitors choosing based on the analytical correlation of their parameters derived with the data sheets are proposed.

Key words: capacitor, converter, electrophysical installation, imitation models, procedure for choosing, allowable regimes.

УДК 621.311.18

А.Н. Назарычев¹, С.Н. Животягина², Т.А. Жулина³**ОЦЕНКА РАСХОДА РЕСУРСА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ С УЧЕТОМ РЕЖИМОВ ЕГО РАБОТЫ И УСЛОВИЙ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**Ивановский государственный энергетический университет¹,
Ивановский институт ГПС МЧС²,
Проектный центр «Контакт» (г. Иваново)³

Поставлена задача необходимости уточнения величины ресурса работы электрооборудования. Проанализированы причины, влияющие на его изменения. Разработана математическая модель оценки расхода ресурса с учетом режимов его работы и влияния температуры окружающей среды, позволяющая получить достоверные показатели его состояния.

Ключевые слова: электрооборудование, надежность, ресурс, предельное состояние, эксплуатация.

Согласно [1], технический ресурс – это наработка от начала эксплуатации объекта или ее возобновления после ремонта до наступления его предельного состояния. Предельное состояние – состояние, при котором дальнейшая эксплуатация объекта должна быть прекращена из-за неустранимого нарушения требований безопасности или неустранимого снижения уровня работоспособности, или недопустимого снижения эффективности эксплуатации. Тогда ресурс можно рассматривать как интегральную оценку технического состояния оборудования, измеряемую в единицах наработки. Для разных типов электрооборудования (ЭО) наработка измеряется в различных единицах: для трансформаторов – количество лет, для выключателей – количество коммутаций и т.п.

Причиной изменения величины ресурса является изменение эксплуатационных факторов: режимов и условий работы. В зависимости от их интенсивности, характера условий и режимов работы происходит сработка ресурса на определенную величину. Все эксплуатационные факторы можно разделить на тепловые, механические, электрические, химические, радиационные и др. Для ЭО первые три являются наиболее важными. Действие каждой группы факторов характеризуется соответствующими параметрами: для тепловых – температура; для механических – вибросмещение, виброскорость, частота и т.п.; для электрических – напряженность электромагнитного поля, уровень напряжения. Очевидно, что чем больше отклонение каждого из параметров по всем группам факторов от номинального значения, тем интенсивнее срабатывается ресурс. Тяжесть режима по i -му параметру оценивается коэффициентом тяжести режима k_i :

$$k_i = \frac{X_i}{X_i^{ном}}, \quad (1)$$

где X_i и $X_i^{ном}$ – текущее и номинальное значения i -го параметра соответственно.

При увеличении коэффициента k_i происходит ускорение сработки ресурса. Оборудование работает установленную нормативным документом величину наработки (нормативный ресурс), если выполняется условие (2):

$$k_1 = k_2 = \dots = k_i = \dots = k_N = 1, \quad (2)$$

где $i = 1 \dots N$ – количество эксплуатационных факторов, действующих на ЭО.

Значение коэффициента $k_i < 1$ соответствует облегчению режима работы ЭО по i -му фактору, а $k_i > 1$ – утяжелению. Текущий режим работы ЭО характеризуется множеством значений k_i для всех возможных факторов. Отклонение любого фактора способствует пере-

ходу ЭО в новый режим работы, которому соответствует новая скорость сработки ресурса. На каждом из установившихся режимов работы ЭО скорость сработки ресурса постоянна:

$$\frac{dR}{dt} = v = const \Rightarrow R(t) = \int_0^t v dt = vt, \quad (3)$$

где v - скорость сработки ресурса, постоянная для каждого режима работы ЭО. Зависимости ресурса R^* в относительных единицах от времени t для режимов, характеризующихся разными величинами v , представлены на рис. 1.

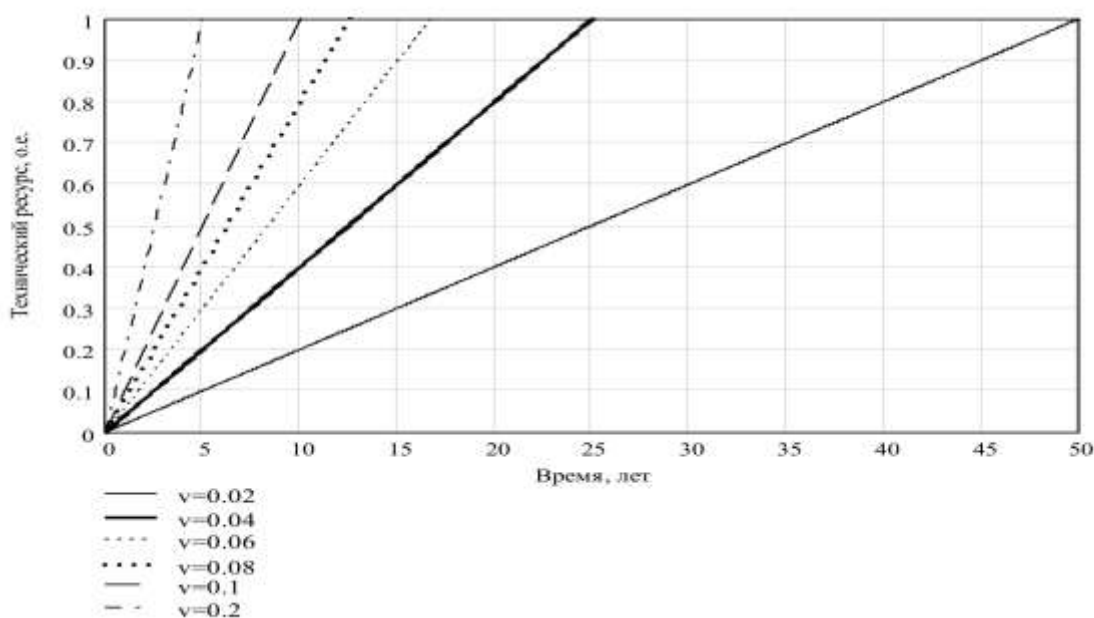


Рис. 1. Зависимость относительного ресурса R^* от времени t

Предположим, что при изменении коэффициента тяжести режима k_i на d_i единиц, ресурс ЭО изменяется в e раз:

$$R = R_0 e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}}, \quad (4)$$

где R_0 – установленный ресурс. Поделив обе части равенства (4) на R_0 , получим аналогичное выражение в относительных единицах:

$$R^* = e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}}, \quad (5)$$

Зависимость технического ресурса ЭО R^* от коэффициента тяжести режима k_i при $d_i = \{0.1, 0.5, 1, 2, 5, 10\}$ приведена на рис. 2. Эта зависимость имеет качественный характер и отражает лишь тенденцию изменения ресурса. Для точного определения зависимости (5) необходимо знать значение d_i , которое, в свою очередь, может быть определено экспертно или статистическим путем для ЭО конкретного типа и класса напряжения.

На рис. 2 показано, какую величину ресурса по отношению к установленному может сработать ЭО при работе в течение всего срока службы с одним и тем же значением i -го параметра (фактора) k_i при номинальных значениях остальных параметров.

Для N воздействующих факторов выражение (5) принимает вид

$$R^* = \prod_{i=1}^N e^{\frac{-(k_i-1)}{d_i}} = e^{\sum_{i=1}^N \frac{-(k_i-1)}{d_i}}. \quad (6)$$

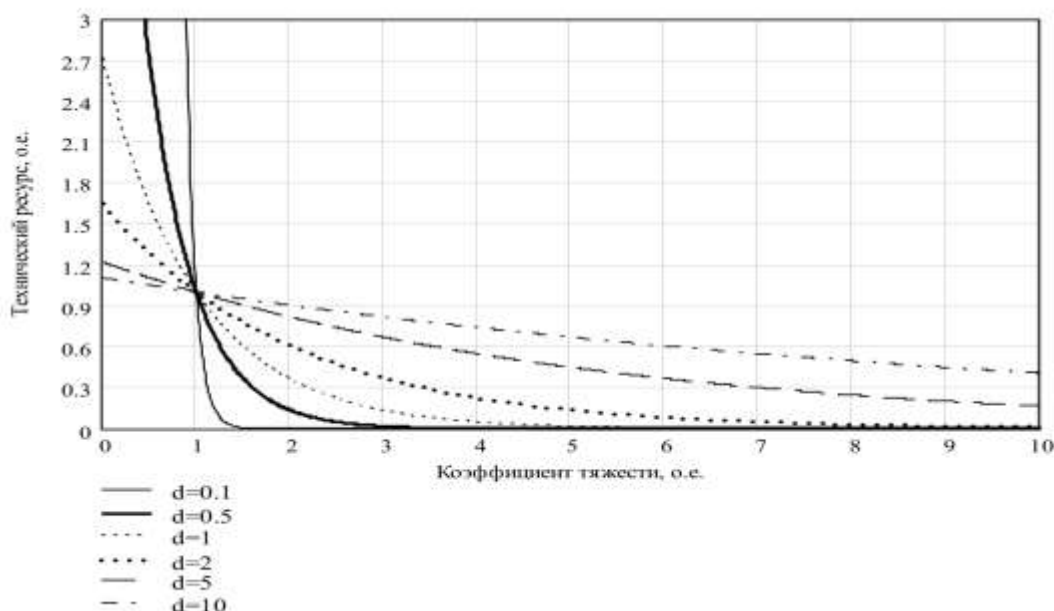


Рис. 2. Зависимость технического ресурса ЭО R^* от коэффициента тяжести режима k_i

Для трех групп эксплуатационных факторов формулу (6) запишем в виде

$$R^* = e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}}, \quad (7)$$

где $j_1 = 1 \dots n_1$ – количество электрических факторов; $j_2 = 1 \dots n_2$ – тепловых; $j_3 = 1 \dots n_3$ – механических; $k_{j_1}^{\mathcal{E}}, k_{j_2}^T, k_{j_3}^M$ – кратности j_1 -го электрического, j_2 -го теплового, j_3 -го механического факторов; $d_{j_1}^{\mathcal{E}}, d_{j_2}^T, d_{j_3}^M$ – относительные отклонения j_1 -го электрического, j_2 -го теплового, j_3 -го механического факторов, при которых ресурс ЭО меняется в e раз, при этом $n_1+n_2+n_3=N$.

В самом общем случае величина d_i может меняться в зависимости от k_i : $d_i = f(k_i)$. Однако для упрощения дальнейших расчетов примем, что $d_i = \text{const}$ при любом значении k_i . Величина k_i в общем случае также может быть не постоянная и зависеть от величины наработки, а чаще от времени.

Допустим, ЭО работает в режиме, отличном от номинального по одному или нескольким факторам. Действительный сработанный ресурс в единицах наработки определяется по отношению к наработке в номинальных условиях в соответствии с (7):

$$\Delta R = \int_0^{R_p} R^* dR = \int_0^{R_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dR, \quad (8)$$

где ΔR – реальный сработанный ресурс ЭО; R_p – реальная наработка ЭО (количество часов, коммутаций и т.п.).

Для пояснения формулы (8) рассмотрим пример. Допустим, единицами наработки для ЭО являются часы, тогда под ресурсом понимается время наработки ЭО до предельного состояния. Формула (8) приобретает вид

$$\Delta T = \int_0^{T_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dt, \quad (9)$$

где T_p – реальное время работы ЭО; ΔT – фактическое (эквивалентное) время, которое наработало ЭО в данных условиях за время T_p .

Если коэффициенты тяжести в выражении (9) зависят от времени, то процесс интегрирования усложняется.

Вернемся к выражению (3). Будем считать, что установленный срок службы ЭО соответствует времени, в течение которого ЭО исчерпает свой ресурс. Если единицами наработки являются единицы времени, то понятия установленного срока службы и установленного ресурса эквивалентны. Тогда скорость сработки ресурса определяется выражением

$$v = R_y / T_y, \quad (10)$$

где T_y – установленный срок службы.

Если расчет ведется в относительных единицах, то $R_y = 1$. Отметим, что величина R_y устанавливается для номинального режима работы ЭО, т.е. когда выполняется условие (2). Если ЭО работает в условиях, отличных от номинальных, то скорость сработки ресурса на интервале времени T_p увеличивается и определяется по выражению

$$v = \Delta R / T_p. \quad (11)$$

Подставив (8) в (11), получим

$$v = \frac{1}{T_p} \int_0^{R_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dR. \quad (12)$$

Единица измерения величины v зависит от единицы измерения наработки, характерной для данного типа ЭО. Если единицами наработки являются единицы времени, то величина скорости сработки ресурса v на отрезке $[0, T_p]$ в относительных единицах определяется по выражению

$$v = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} e^{\sum_{j_1=1}^{n_1} \frac{-(k_{j_1}^{\mathcal{E}}-1)}{d_{j_1}^{\mathcal{E}}} + \sum_{j_2=1}^{n_2} \frac{-(k_{j_2}^T-1)}{d_{j_2}^T} + \sum_{j_3=1}^{n_3} \frac{-(k_{j_3}^M-1)}{d_{j_3}^M}} dt. \quad (13)$$

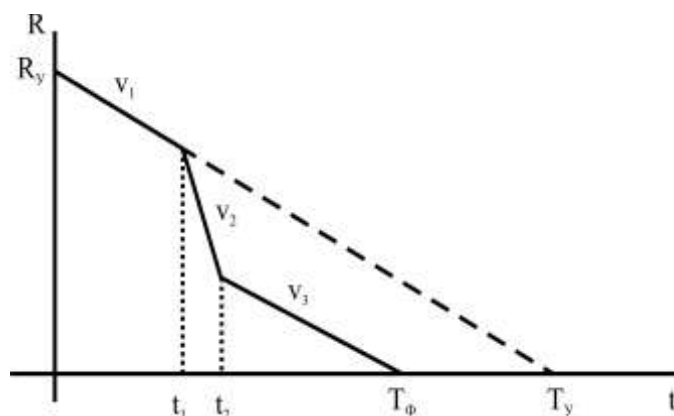


Рис. 3. Качественная зависимость ресурса от времени

Подставляя значения скоростей в выражение (3), получим зависимость ресурса от времени на данном временном интервале. Исходя из этого, общая зависимость ресурса от времени представляет собой ломаную линию. При достижении ею прямой, задаваемой уравнением $R = 1$, наступает окончание установленного срока службы ЭО. Качественная зависимость ресурса от времени представлена на рис. 3.

Остаточный ресурс при этом определится по выражению

$$R_{ост} = 1 - R. \quad (14)$$

Рассмотрим пример для трансформатора типа ТД-80000/220. Известно, что в течение суток он работал 16 ч с нагрузкой 78 МВА ($S^* = 0,975$), 7,5 ч – 72 МВА ($S^* = 0,9$) и 0,5 ч – 85 МВА ($S^* = 1,063$). В данном режиме трансформатор проработал все 25 лет своего нормативного срока службы R_0 . Произведем расчет ресурса трансформатора при изменении $\vartheta_{окр\ ном}$ от 15 до 55 °С.

Для данного трансформатора принимаем $x = 0,9$; $y = 1,6$; $\Delta\vartheta_{м.ном} = 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (60 К) или $\Delta\vartheta_{м.ном}^* = 0,612$ (0,162 о.е); $\Delta\vartheta_{ННТ.ном} = 98-35-60 = 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ или $\Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* = 0,031$ о.е. (0,003 о.е.). Найдем коэффициент $d = 315/79 = 3,987$.

Рассчитаем фактический сработанный ресурс R^* по формуле (15) из [2]:

$$R^*(\vartheta_{окр}^*) = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{\vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[\frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y - 1}{\Delta\vartheta^*}} - 1) \quad (15)$$

Если данный трансформатор имеет изоляцию класса А, то величина $\Delta X_9 = -1,053 \text{ 1/К}$. Тогда $\Delta X_9^* = \Delta X_9 / (1/371) = 1,053 \cdot 371 = 390,663$ о.е. По выражению (16) рассчитаем фактический сработанный ресурс R^* трансформатора при тех же условиях эксплуатации [2]:

$$R^*(\vartheta_{окр}^*) = R_0^* + \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{0,264 - \vartheta_{окр}^* - \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[\frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x - \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y}{\Delta X_9^* \left[0,736 + \vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[\frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y \right]} - 1} - 1) \quad (16)$$

В именованных единицах фактический сработанный ресурс будет равен $R = 0,745 \cdot 25 = 18,625$ лет и $R = 1,00031 \cdot 25 = 25,008$ лет. Нормативный остаточный ресурс $R_{0.ост}^* = 1 - 0,745 = 0,255$ о.е или $R_{ост} = 25 - 18,625 = 6,375$ лет. Это справедливо, если далее трансформатор в течение суток будет работать с номинальной нагрузкой (80 МВА) температурой ННТ (98 $^{\circ}\text{C}$). Предположим, что такой режим работы трансформатора сохранится и далее. Тогда фактический остаточный ресурс рассчитаем по формуле (17) [2]:

$$R_{ост}^*(\vartheta_{окр}^*) = R_{0.ост}^* - \sum_{j=1}^K R_j^* \cdot (e^{\frac{\vartheta_{окр}^* + \Delta\vartheta_{м.ном}^* \left[\frac{1+d(S^*)^2}{1+d} \right]^x + \Delta\vartheta_{ННТ.ном}^* (S^*)^y - 1}{\Delta\vartheta^*}} - 1) \quad (17)$$

Таким образом, при условии, что трансформатор в течение суток всегда будет работать с нагрузками, указанными в данном примере, и температурой окружающей среды от 15 до 55 $^{\circ}\text{C}$, то его полная наработка до предельного состояния будет определяться из выражения

$$N_{пред}(\vartheta_{окр}) = R_{ост}^*(\vartheta_{окр}^*) \cdot 25 + R^*(\vartheta_{окр}^*) \cdot 25 \quad (18)$$

На рис. 4 приведена зависимость наработки трансформатора до предельного состояния $N_{пред}$ от температуры окружающей среды $\vartheta_{окр}$.

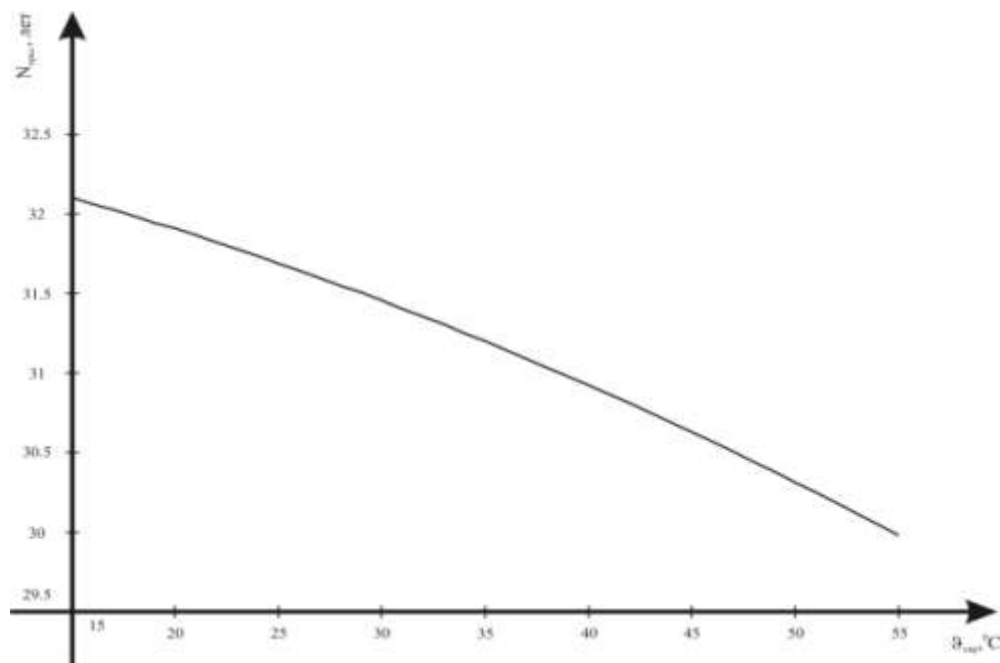


Рис. 4. Зависимость наработки до предельного состояния $N_{пред}$ от температуры окружающей среды $\theta_{окр}$

Из рис. 4 следует, что срок службы трансформатора в районах с повышенной температурой для приведенного примера снижается в среднем на 2,5% при увеличении температуры на 10°C .

Выводы

1. Разработанная математическая модель оценки ресурса ЭО с учетом условий эксплуатации позволяет рассчитать фактический сработанный ресурс с учетом влияния температуры окружающей среды и нагрузки.

2. Результаты расчета показали, что в районах с повышенной температурой ресурс их работы снижается в среднем на 2,5% при увеличении температуры на 10°C .

Библиографический список

1. Надежность систем энергетики. Терминология. – М.: Наука, 1980. Вып. 95. – 43 с.
2. **Назарычев, А.Н.** Методы и математические модели комплексной оценки технического состояния электрооборудования / А.Н. Назарычев, Д.А. Андреев. – Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2005. – 224 с.

Дата поступления
в редакцию 12.03.2010

A.N. Nazarychev, S.N. Zhivotyaguina, T.A. Zhulina

ESTIMATION OF ELECTRIC POWER EQUIPMENT LIFE TIME CONSUMPTION CONSIDERING ITS WORKING MODES AND ENVIRONMENT

The article states a problem of electrical power equipment lifetime specification. It analyzes reasons impacting lifetime. Authors describe mathematical model for lifetime consumption estimate considering working modes of the equipment and influence of ambient temperature. This model allows obtaining reliable indicators of lifetime consumption.

Key words: electric power equipment, reliability, life time, operating limit state, operation, maintenance.

УДК 621.314

Копелович Е.А.¹, Ваняев В.В.², Хватов С.В.²**ИМПУЛЬСНЫЙ ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ
ДЛЯ СОЗДАНИЯ УСКОРЯЮЩЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ
В МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ**Института прикладной физики РАН (Н. Новгород)¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Приведено описание принципа действия высоковольтного импульсного источника питания, предназначенного для создания ускоряющего электрического поля в электрофизических установках на базе СВЧ приборов. Отличительной особенностью источника является уменьшенная энергоемкость входящих в него накопительных конденсаторов. Получены выражения для расчета параметров компонентов источника питания и приведены результаты его имитационного моделирования.

Ключевые слова: импульс, моделирование, энергоемкость, напряжение, тиристор.

Для решения ряда важных задач научного и прикладного значения, в частности, в области электротехнологий и физики ионных пучков используются электрофизические установки на базе различных типов мощных СВЧ-приборов (гиротронов, магнетронов и др.) [1, 2]. Принцип их действия основан на взаимодействии с электромагнитной волной пучка электронов, которые ускоряются в электрическом поле и фокусируются в магнитном поле. Характерным для мощных электрофизических установок данных приложений является импульсно-периодический режим генерации электромагнитного излучения со скважностью ≥ 10 .

Наиболее энергоемкими элементами систем электропитания мощных СВЧ-приборов являются генераторы высоковольтных импульсов напряжения (ГИН), с помощью которых формируется ускоряющее электрическое поле на интервале генерации электромагнитного излучения. Особо актуальным является создание ГИН с накопительными конденсаторами (НК), способных формировать на СВЧ-приборе прямоугольные импульсы напряжения амплитудой в десятки киловатт, длительностью в сотни микросекунд – единицы миллисекунд с неравномерностью вершины импульса напряжения менее 1%. При этом ток нагрузки составляет единицы – десятки ампер. В результате, при средней мощности ($10^3 \dots 10^5$) Вт мощность импульса в нагрузке равна (1...10) МВт. В связи с этим актуальными становятся вопросы повышения энергетических характеристик ГИН (энергоемкость, КПД).

Наиболее применяемый в настоящее время вариант построения ГИН основан на формировании прямоугольного импульса напряжения на нагрузке при частичном разряде НК через включенный последовательно с нагрузкой полностью управляемый (например транзисторный) коммутатор (рис. 1) [3].

В этом случае при формировании импульсов напряжения миллисекундного диапазона с малой неравномерностью вершины энергия, запасаемая в НК, во много раз превышает энергию, передаваемую в нагрузку на интервале импульса.

Для НК в схеме рис. 1 емкость C и запасаемая в ней энергия $W_{НК}$ определяются выражениями:

$$C \geq \frac{T_{и}}{R_{н}} \frac{U^{\max}}{\Delta U}, \quad (1)$$

$$W_{НК} \approx W_{и} \frac{U^{\max}}{2\Delta U}, \quad (2)$$

где R_n - эквивалентное сопротивление нагрузки; T_n - длительность формируемого импульса; W_n - энергия импульса; U^{\max} - максимальное значение напряжения нагрузки; ΔU - снижение напряжения нагрузки на интервале T_n . Поэтому, например, при характерном для мощных СВЧ-приборов значении $\Delta U/U^{\max} \leq 0,01$, в соответствии с выражением (2), запасаемая в НК энергия более чем в 50 раз больше энергии импульса. Это требует использования в ГИН миллисекундного диапазона сложных, громоздких и дорогих емкостных накопителей энергии.

Для снижения энергоемкости НК в предлагаемый ГИН (рис. 2, а) между НК и транзисторным коммутатором VT введен многозвенный резистивный токоформирующий элемент (РТФЭ), содержащий N звеньев с тиристорами $VS1...VS_{N-1}$ и резисторами $R2...R_N$. РТФЭ позволяет путем уменьшения вводимого последовательно с нагрузкой добавочного сопротивления поддерживать величину напряжения на нагрузке неизменной в пределах заданной нестабильности [4].

Принцип работы такого ГИН при $N = 6$ поясняется диаграммами (рис. 2, б).

На интервале формирования выходного импульса напряжения в работе ГИН можно выделить N интервалов непрерывности, соответствующих включенному состоянию транзисторного коммутатора VT и тиристоров $VS1...VS_{N-1}$.

После зарядки НК от зарядного устройства (на рис. 2 не показано) до заданного начального уровня напряжения U_{01} система управления отпирает VT и далее поочередно с заданной временной задержкой включает тиристоры РТФЭ. При этом конденсатор C разряжается на нагрузку R_n через резисторы $R2...R_N$ звеньев, общее сопротивление которых по мере формирования импульса уменьшается. В результате напряжение нагрузки изменяется между максимальными и минимальными значениями (рис. 2, б).

На произвольном j -м интервале работы ГИН, когда открыты тиристоры 1-го, 2-го, 3-го, ... j -1-го звеньев РТФЭ, напряжение НК определяется из формулы

$$u_j \approx U_{0j} \left(1 - \frac{t}{R_j C} \right), \quad (3)$$

где U_{0j} , R_j - начальное напряжение НК и активное сопротивление силового контура на j -м интервале соответственно.

Максимальное значение напряжения нагрузки на j -м интервале

$$U_{nj}^{\max} = \frac{R_n}{R_j} U_{0j}. \quad (4)$$

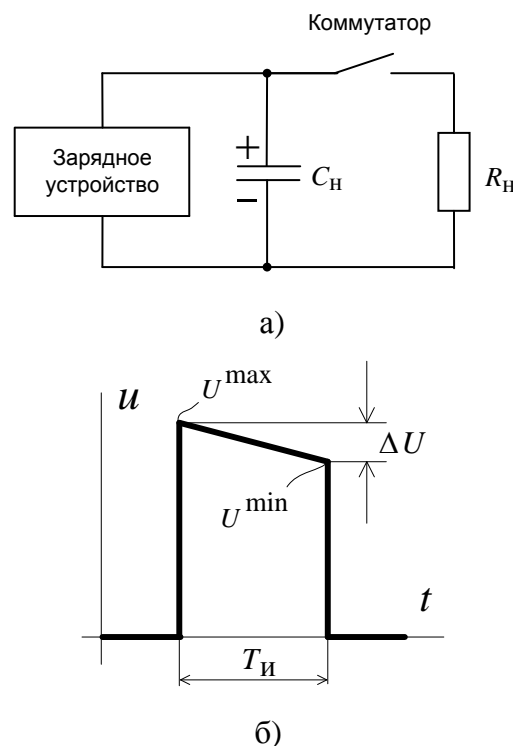


Рис. 1. Принцип построения ГИН с частичным разрядом НК:
а - схема ГИН,
б - выходное напряжение

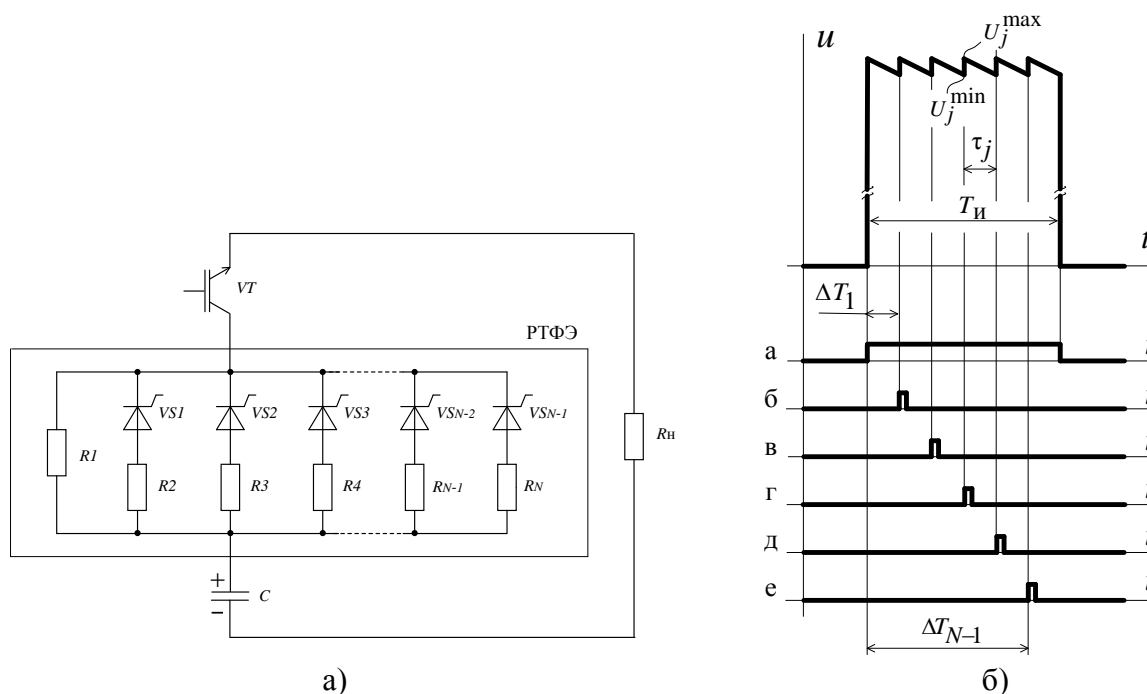


Рис. 2. Генератор импульсов напряжения с РТФЭ:

а – принципиальная схема; *б* – алгоритм работы;

u – напряжение на нагрузке; *а* – сигнал управления транзисторным коммутатором *VT*;

б, в, г, д, е – сигналы управления тиристорами *VS1...VS_{N-1}* соответственно

Минимальное значение напряжения нагрузки на этом интервале, в соответствии с выражениями (3) и (4), определяется выражением

$$U_{нj}^{\min} = U_{нj}^{\max} \left(1 - \frac{\tau_j}{R_j C} \right), \quad (5)$$

где τ_j - длительность *j*-го интервала.

Из выражения (3) с учетом (5) находим связь между значениями начальных напряжений НК на *j* и *j*+1-м интервалах работы РТФЭ:

$$U_{0j+1} \approx U_{0j} \left(1 - \frac{\tau_j}{R_j C} \right) = U_{0j} \left(\frac{U_{нj}^{\min}}{U_{нj}^{\max}} \right). \quad (6)$$

Из выражения (6) с учетом (4) находим соотношение между сопротивлениями силового контура на рассматриваемых интервалах

$$R_{j+1} = R_j \left(\frac{U_{нj}^{\min}}{U_{нj}^{\max}} \right). \quad (7)$$

Для получения наименьших пульсаций выходного напряжения ГИН необходимо, чтобы минимальные и максимальные напряжения на нагрузке на интервалах РТФЭ оставались неизменными, т.е.

$$U_{нj}^{\min} = U_{н}^{\min}, \quad U_{нj}^{\max} = U_{н}^{\max}. \quad (8)$$

При выполнении этих условий из выражения (7) следует система соотношений

Из выражений (13) и (14) определяем соотношение между емкостями НК сопоставляемых ГИН при формировании импульса с одинаковыми параметрами и при одном и том же сопротивлении нагрузки

$$C = \frac{1 - U_H^*}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*} C_1.$$

Энергоемкость НК генератора с РТФЭ при учете выражений (4) и (10) будет

$$W_C = \frac{CU_{01}^2}{2} = \frac{(U_H^*)^{2(1-N)}}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*} \frac{T_H (U_H)^2}{2R_H},$$

где $U_H = \frac{U_H^{\min} + U_H^{\max}}{2}$ - среднее значение напряжения нагрузки на интервале формируемого импульса.

Энергоемкость ГИН без РТФЭ с учетом (4) и (14) определяется по формуле

$$W_{C1} = \frac{C_1 U_0^2}{2} = \frac{1}{1 - U_H^*} \frac{T_H (U_H)^2}{2R_H}.$$

Из полученных выражений находим соотношение энергоемкостей НК сравниваемых устройств

$$W_C = \frac{(1 - U_H^*)(U_H^*)^{1-N}}{1 - (U_H^*)^N} W_{C1}.$$

На интервале формирования выходного импульса напряжение НК уменьшается. Относительное снижение напряжения НК в ГИН с РТФЭ рассчитывается по уравнению $\Delta U^* = 1 - U_H^*$, а в схеме без РТФЭ в соответствии с выражением (14): $\Delta U_1^* = 1 - U_{H1}^* = \frac{T_{H1}}{R_H C_1}$.

При одинаковых параметрах силовой цепи и длительности импульсов соотношение падений напряжения НК в рассматриваемых вариантах ГИН равно

$$\frac{\Delta U^*}{\Delta U_1^*} = \frac{1 - U_H^*}{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*}.$$

При формировании импульса напряжения в нагрузке в РТФЭ выделяются потери энергии, величина которых при малых пульсациях тока и напряжения нагрузки равна

$$\Delta W = \int_0^{T_H} u \cdot i \cdot dt = \frac{U_H T_H}{R_H} U_2, \tag{15}$$

где u, i - мгновенные значения напряжения РТФЭ и тока нагрузки соответственно; U_2 - среднее значение падения напряжения на РТФЭ. Величина U_2 при указанных условиях определяется по уравнению

$$U_2 = \frac{\Delta U_C}{2} = \frac{U_H T_H}{2R_H C}, \tag{16}$$

где ΔU_C - приращение напряжения НК на интервале T_H .

Из выражений (15), (16) с учетом (13) находим относительное значение потерь энергии

$$\Delta W^* = \frac{\Delta W}{W_H} = \frac{T_H}{2R_H C} = \frac{(U_H^*)^{1-N} - U_H^*}{2}.$$

Коэффициент полезного действия ГИТ рассчитывается по формуле

$$\eta = \frac{1}{1 + \Delta W^*} = \frac{2}{2 + (U_H^*)^{1-N} - U_H^*}.$$

На рис. 3 приведены осциллограммы работы ГИН при отсутствии и наличии РТФЭ, полученные на имитационных моделях этих устройств в среде Matlab Simulink при следующих параметрах ГИН: $R_H = 1,25$ кОм; $U_{01} = 55$ кВ; $U_H = 50$ кВ; $T_H = 13$ мс; $\Delta U^* = 0,01$; $N = 10$. Моменты отпирания тиристоров РТФЭ рассчитаны в соответствии с выражением (12).

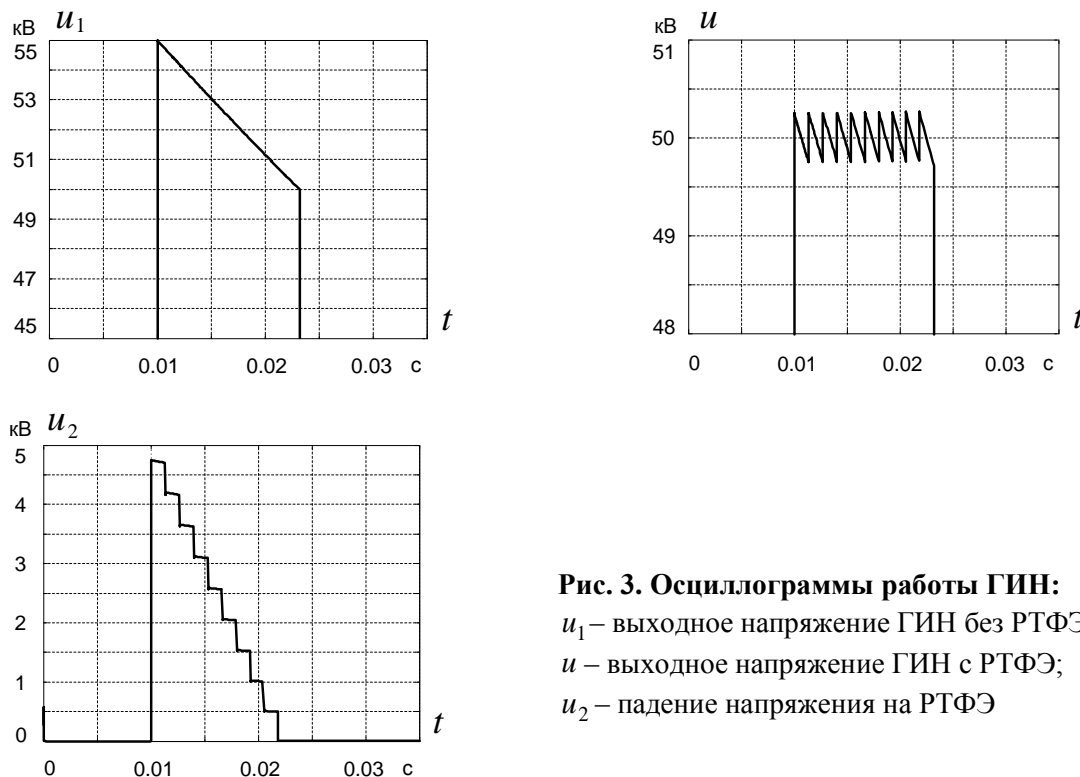


Рис. 3. Осциллограммы работы ГИН:
 u_1 – выходное напряжение ГИН без РТФЭ;
 u – выходное напряжение ГИН с РТФЭ;
 u_2 – падение напряжения на РТФЭ

Выводы

1. Применение ГИН с РТФЭ дает возможность значительно уменьшить емкость НК и величину накапливаемой в нем энергии. Так, при значениях $\Delta U^* = 0,01$ и $N = 10$ требуемое значение емкости ГИН равно $C \approx 0,095 C_1$ при формировании импульса с одинаковыми параметрами и одним и тем же сопротивлении нагрузки.

2. Уменьшение энергоемкости ГИН с РТФЭ позволяет уменьшить негативные последствия аварийных режимов, связанных с возможностью полного разряда НК на нагрузку при выходе из строя высоковольтного транзисторного ключа.

3. Введение РТФЭ в ГИН незначительно увеличивает потери в устройстве. Так, при указанных значениях параметров величина КПД генератора составляет 95%.

4. Полученные аналитические выражения, позволяющие рассчитывать величины сопротивлений шунтирующих резисторов и моменты отпирания тиристоров, служат основой разработки инженерной методики проектирования силовой части и системы управления ГИН с РТФЭ.

Библиографический список

1. **Копелович, Е.А.** Концепция построения высоковольтных источников питания для мощных электрофизических установок // Актуальные проблемы электроэнергетики: труды НГТУ. - Н.Новгород, 2009. Т. 77. С. 32–36.

2. **Кириенко, В.П.** Преобразовательные устройства для систем электропитания импульсных нагрузок / В.П. Кириенко, Е.А. Копелович, В.Ф. Стрелков // Материалы Всемирного электротехнического конгресса, ВЭЛК-2005. – М., 2005.
3. Solid state modulator application in linear accelerators / M.P.J. Gaudreau [at al.] // Proceedings of the 1999 Particle Accelerator Conference, New York, 1999. P. 1491–1493.
4. Патент на полезную модель № 90949 РФ, МПК Н 03 К 3/53. Генератор импульсных напряжений / Ваняев В.В., Копелович Е.А. Оpubл. 20.01.2010.

*Дата поступления
в редакцию 12.03.2010*

Е.А. Kopelovich, V.V. Vanyaev, S.V. Hvatov

**PULSE POWER SUPPLY
FOR CREATION THE ACCELERATING ELECTRIC FIELD
IN THE POWER ELECTRO PHYSICAL INSTALLATIONS**

This paper presents new high voltage power supply with pulse output voltage for creation the accelerating electric field in the electro physical installations based on the different high power vacuum electron devices. Distinctive feature of the power supply is reduced power intensity of the storage capacitors entering into it. Expressions for calculation of the power supply components parameters are developed and results of the power supply imitating modeling are reported.

Key words: pulse, modeling, power intensity, voltage, thyristor.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74

А.И. Евстигнеев, В.В. Петров, Э.А. Дмитриев, А.А. Тарасова

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СМЕСЕЙ С СВЯЗУЮЩИМИ НА ОСНОВЕ СУЛЬФАТА МАГНИЯ

Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет

Представлены исследования нового типа неорганического связующего на основе сульфата магния. Исследованные связующие предназначены для получения песчаных литейных форм и стержней, отверждаемых тепловой сушкой.

Ключевые слова: песчаная форма, сульфат магния, неорганическое связующее.

Постановка задачи

Задача данной статьи – исследование новых неорганических связующих, обладающих следующими характеристиками: высокая прочность в отвержденном состоянии; легкая выбиваемость после затвердевания отливки; возможность многократной регенерации; низкая себестоимость и недефицитность; экологическая безопасность на всех технологических этапах и процессах утилизации.

Для синтеза неорганических связующих были отобраны следующие типы соединений: сульфаты и фосфаты. Фосфаты достаточно широко используются в литейном производстве как самостоятельные связующие. Сульфаты, согласно литературным данным, в качестве связующих начали внедряться в литейное производство с 2003 г., но в качестве неорганических клеев они известны достаточно давно. Так, известно [59, 150], что прочностные свойства смеси SiO_2 , затворенного сульфатами или фосфатами некоторых металлов, изменяется в ряду $\text{Al} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{Co} > \text{Cu}$, т. е. коррелируются с возрастанием силы поля катиона. Свойства алюмо-, ферро-, магний-фосфатных связующих применительно к литейному производству достаточно подробно изучены [64], и определены области их использования. Анализ свойств сульфатов металлов из представленного ряда показал, что наиболее подходящими по термостойкости для литейного производства являются сульфаты алюминия и магния, к тому же эти соединения производятся химической промышленностью в больших объемах и не являются дефицитными и дорогостоящими. Однако предварительные исследования показали, что смеси на основе кварцевого песка и сульфата алюминия после сушки нагревом ($110\text{--}120^\circ\text{C}$) резко теряют прочность, тогда как смеси с сульфатом магния, наоборот, набирают прочность. Это связано со специфическими свойствами сульфата магния – плавиться при нагревании и в дальнейшем, по мере удаления кристаллизационной воды, кристаллизоваться, тем самым связывая зерна песка.

Исследование связующих свойств сульфата магния

Первоначально было выявлено, что сухая смесь кварцевого песка и мелкодисперсного порошка $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ при нагревании не переходит в связанное состояние. По-видимому, это связано с тем, что мелкие частицы сульфата магния при нагревании достаточно быстро

теряют кристаллизационную воду, соответственно быстро минуют фазу плавления, за период которой не успевают сплавиться между собой и образовать устойчивые контакты с зернами наполнителя. При увлажнении смеси кварцевого песка и $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ водой смесь в процессе сушки приобретает прочность за счет испарения воды и плавления с последующей кристаллизацией MgSO_4 (рис. 1). Причем было замечено, что с увеличением влажности смеси ее прочность в сухом состоянии увеличивается. С целью изучения влияния влажности и температуры сушки на прочность смеси с сульфатом магния был разработан трехуровневый план эксперимента. Варьируемыми факторами были приняты влажность смеси и температура ее сушки. Исследуемая функция отклика – прочность смеси на разрыв. Варьирование факторов производилась на трех уровнях: влажность – 0,5, 2,5, 4,5 масс. ч., температура сушки – 100, 125, 150 °С. При проведении экспериментов смесь готовилась следующим образом: в сухой песок вводился порошок $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ в количестве 5 масс. ч., после перемешивания в смесь вводилось расчетное количество воды с последующим перемешиванием. Сырую смесь с сульфатным связующим также подвергали испытанию на прочность, при этом было выявлено, что вода в смеси изменяет ее сырую прочность от 0 до 0,02 МПа, т. е. смесь в сыром состоянии имеет низкую прочность.

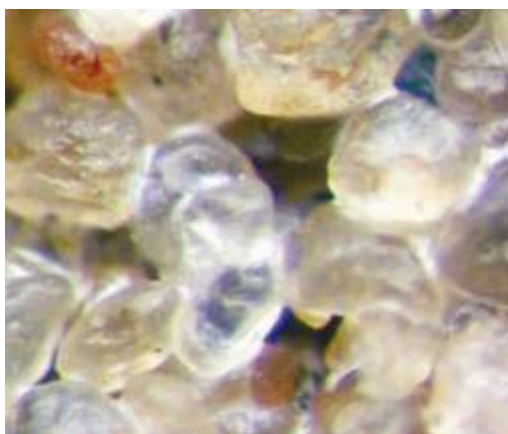


Рис. 1. Структура смеси песка, MgSO_4 и воды после сушки при температуре 180 °С (x 25)

В результате обработки экспериментальных данных была получена поверхность отклика (рис. 2), из которой видно, что оптимальное количество воды зависит от температуры сушки. При минимальной температуре сушки (100 °С) оптимальное содержание воды в смеси соответствует 2,5–3,0 масс. ч. С увеличением температуры сушки оптимальное содержание воды несколько увеличивается. Так, при температуре сушки 150 °С оптимальное количество воды в смеси 4,0–4,5 масс. ч. Таким образом, с целью получения максимальной прочности смеси содержание $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ и воды при условии, что температура последующей сушки смеси 150 °С, должно быть в соотношении 1 : 0,8–0,9.

Увеличение содержания воды в смеси выше оптимального приводит к некоторому падению прочности, что наиболее заметно при низких температурах сушки. Очевидно, что падение прочности при этом объясняется тем, что при высокой влажности смеси наблюдается наиболее интенсивная миграция MgSO_4 в наполнителе вслед за парами воды, удаляющимися по порам смеси с поверхности образца в атмосферу.

Помимо содержания воды в смеси, значительное влияние на прочность оказывает и температура сушки. Так, при одинаковом содержании воды в смеси (к примеру 2,5 масс. ч.) прочность при температуре сушки 100 °С достигает 0,38 МПа, а при увеличении температуры сушки до 150 °С прочность повышается почти в два раза и достигает 0,67 МПа. Очевидно, что прочность образцов при различных температурах сушки зависит от получаемой структуры гидрата MgSO_4 .

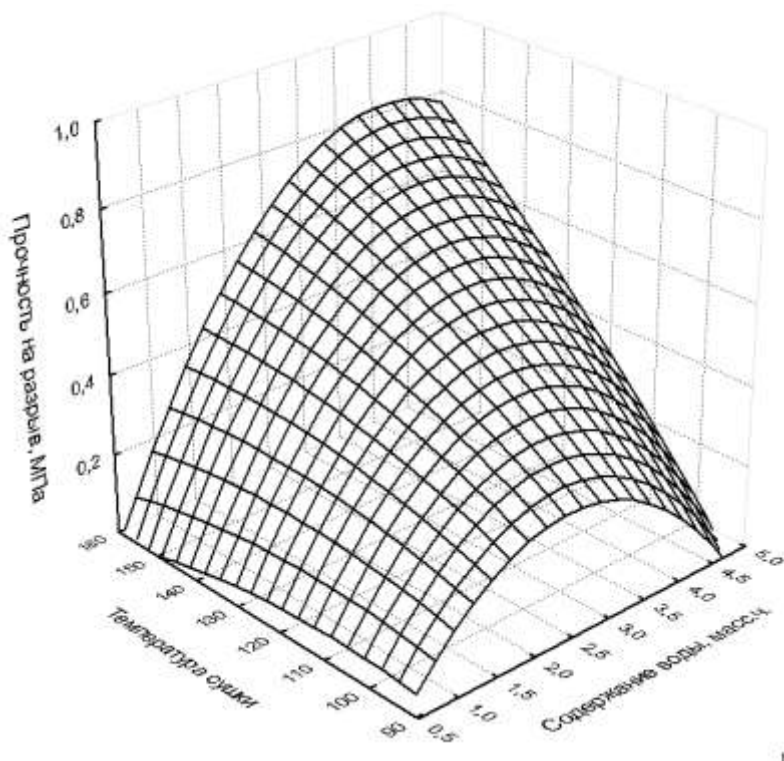


Рис. 2. Зависимость прочности смеси на разрыв от содержания воды и температуры сушки

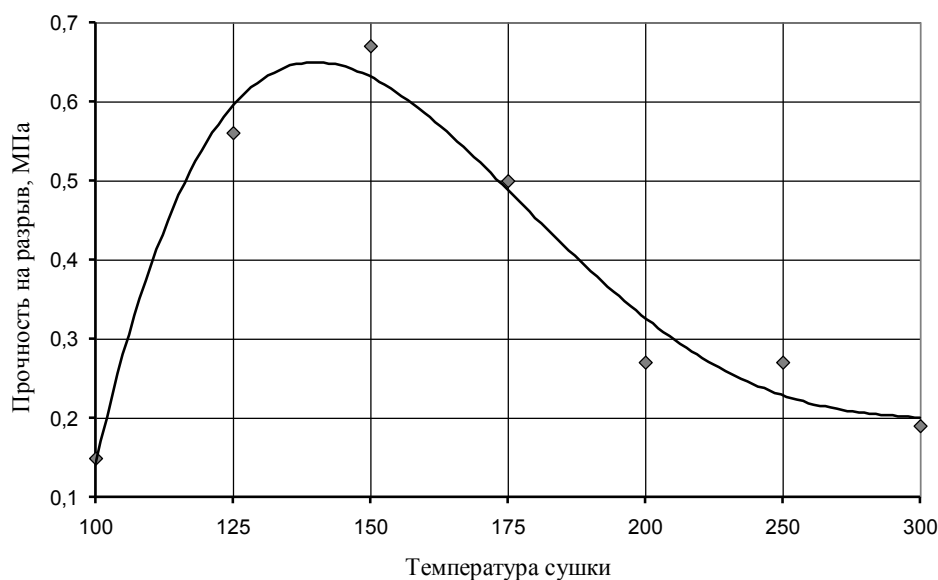


Рис. 3. Зависимость прочности смеси с связующим MgSO_4 от температуры сушки

С целью определения влияния структуры гидрата MgSO_4 на прочность образцов была приготовлена смесь песка с содержанием 5 масс. ч. $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ с добавлением 3,5 масс. ч. воды. Из смеси изготавливались стандартные образцы «восьмерка», которые сушились при различных температурах и подвергались испытанию на прочность. В результате была получена зависимость прочности смеси от температуры сушки (рис. 3), из которой следует, что наиболее оптимальной с точки зрения получения максимальной прочности является температура сушки 140–150 °С.

Сопоставляя полученную зависимость (рис. 3) с данными термоанализа сульфата магния, можно видеть, что максимальной прочностью обладает моногидрат MgSO_4 . Дальней-

шее обезвоживание приводит к резкому падению прочности с последующей ее стабилизацией при температуре от 300 °С. При нагреве отвержденной смеси до 1000 °С смесь практически полностью разрушается, что вызвано механическим разрушением связующего в манжетах.

Результаты исследования смесей с использованием в качестве связующего $MgSO_4$ показали возможность его использования в качестве связующего в формовочных и стержневых смесях. Сульфат магния термически устойчив до температуры 1100 °С, что позволит использовать его в качестве связующего при литье цветных сплавов и чугуна. Способность $MgSO_4$ восстанавливать содержание воды в кристаллизационной решетке позволит легко регенерировать отработанные смеси.

Однако, в ходе исследований связующих свойств $MgSO_4$ были выявлены существенные недостатки:

- низкая прочность смеси песка с $MgSO_4$ в сыром состоянии;
- невысокая прочность смеси в отвержденном состоянии, что затрудняет использование сульфата магния для получения сложных стержней и форм.

Для устранения выявленных недостатков дальнейшие исследования проводились в направлении улучшения свойств сульфата магния путем получения на его основе двойных солей. Наилучшие результаты были получены при добавлении к $MgSO_4$ сульфатов и ряда водорастворимых полимеров.

Исследование связующих свойств смеси солей $MgSO_4 - Na_2SO_4$

Исследования изменения прочностных свойств смеси песка с смесью солей $MgSO_4-Na_2SO_4$ проводились следующим образом: в раствор $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ с водой (1 : 0,9) вводилось заданное количество Na_2SO_4 (10, 20, 30, 40 % от массы порошка $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, содержащегося в растворе), полученный раствор смеси солей вводили в кварцевый песок фракции 04 в количестве 5 % массы сухой двойной соли в растворе. Сформированные из полученных смесей образцы «восьмерка» отверждались при температуре 150 °С до полной стабилизации массы. Изменение прочности полученных образцов от содержания Na_2SO_4 в связующем $MgSO_4$ представлено на рис. 4.

Полученная зависимость показывает, что увеличение содержания Na_2SO_4 в $MgSO_4$ повышает прочностные свойства смеси. Причем при содержании в $MgSO_4$ до 30 % Na_2SO_4 прочность смеси увеличивается практически в 2,2 раза.

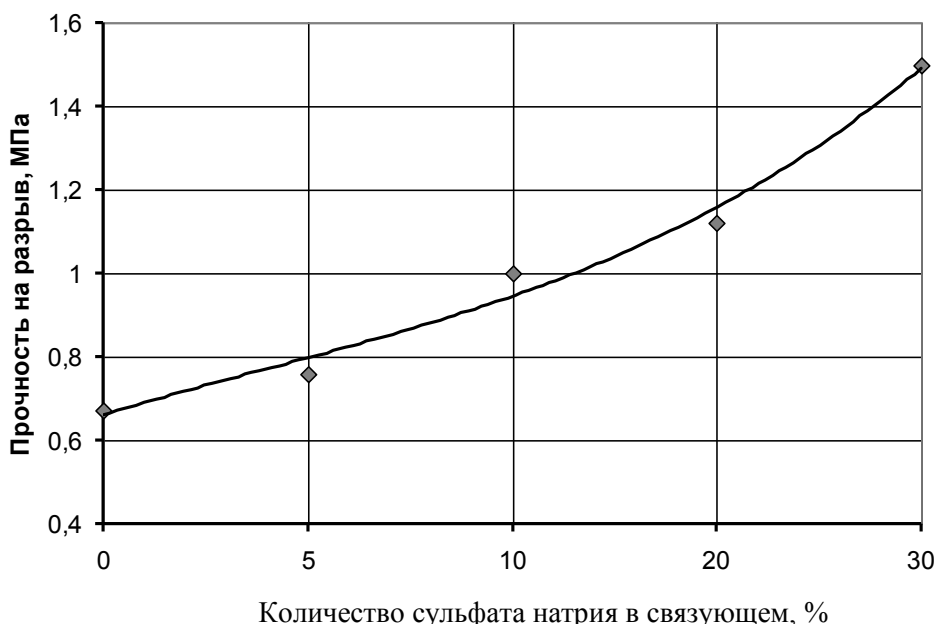


Рис. 4. Влияние количества Na_2SO_4 в связующем $MgSO_4$ на прочность песчаной смеси

Увеличение содержания Na_2SO_4 в MgSO_4 более чем на 30 % приводит к резкому падению прочности. Так, в случае модифицирования MgSO_4 40 % Na_2SO_4 прочность на разрыв песчаной смеси упала до 0,4 МПа.

Анализ структур отвержденных смесей, содержащих в качестве связующего смесь солей MgSO_4 - Na_2SO_4 , показал, что при содержании в связующем Na_2SO_4 в количестве от 10 до 30 % затвердевшее связующее находится на поверхности зерен и в местах их контакта в виде прозрачной стекловидной пленки, а в случае содержания в связующем более 30 % Na_2SO_4 затвердевшее связующее имеет преимущественно белый матовый цвет с белыми кристаллическими вкраплениями. Очевидно, что отдельные кристаллические вкрапления в основной массе связующего играют роль концентраторов напряжений, что приводит к падению прочности связующего и, как следствие, всей смеси в целом.

Прочность отвержденной смеси, содержащей в качестве связующего смесь солей MgSO_4 - Na_2SO_4 , так же, как и при использовании в качестве связующего MgSO_4 в чистом виде, во многом зависит от температуры сушки (рис. 5). Максимальная прочность достигается при температуре сушки 150 °С, с повышением температуры прочность смеси снижается до 0,7–0,65 МПа, что, как и при использовании чистого MgSO_4 , обусловлено полным обезвоживанием связующего.

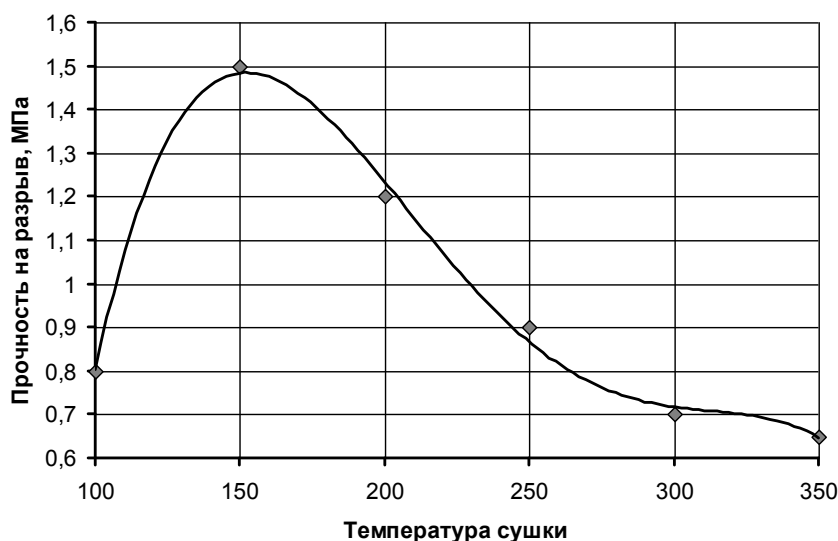


Рис. 5. Зависимость прочности смеси кварцевого песка с связующим MgSO_4 , содержащим 30 масс. ч. Na_2SO_4 , от температуры сушки

Следует отметить, что при использовании смеси солей MgSO_4 - Na_2SO_4 в структуре смеси, высушенной при температурах 300 – 400 °С, растрескивание манжет в смеси не обнаружено. При прокаливании (до 1000 °С) смеси с связующим MgSO_4 - Na_2SO_4 отслоение связующего от зерен и растрескивание манжет также не было обнаружено, что, очевидно, связано с плавлением входящего в состав связующего Na_2SO_4 при температуре 790 °С. Плавление Na_2SO_4 способствует снятию внутренних напряжений, возникающих в связующем при высокотемпературном нагреве.

Использование Na_2SO_4 в составе связующего на основе MgSO_4 позволяет повысить прочность смеси в отвержденном состоянии, но при этом связующее MgSO_4 - Na_2SO_4 , как и связующее на основе чистого MgSO_4 , значительно теряет прочность при температурах от 150 до 300 °С.

Выводы

В ходе исследований установлено:

- прочность смесей с связующим на основе сульфата магния зависит от содержания в них воды. Оптимальным является содержание воды в соотношении связующее – вода 1 : 0,8–0,9;

• максимальной прочностью обладает моногидрат сульфата магния, получаемый при температуре сушки смеси 150 °С. Последующее полное обезвоживание MgSO₄, происходящее при более высоких температурах сушки, снижает прочность смеси за счет разрыхления и частичного растрескивания пленки связующего;

• при введении в состав связующего MgSO₄ добавки Na₂SO₄ до 30% путем их совместного растворения в воде прочность связующего и, как следствие, всей смеси после сушки резко возрастает. Однако при этом выявлено, что термостабильность синтезированного связующего MgSO₄-Na₂SO₄ значительно хуже связующего на чистом MgSO₄. Так, с повышением температуры смеси с связующим MgSO₄-Na₂SO₄ до 350 °С ее прочность падает практически на 60 %

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

A.I. Evstigneev, V.V. Petrov, E.A. Dmitriev, A.A. Tarasova

**RESEARCH OF PROPERTIES OF MIXES BINAERS BASED
ON MAGNESIUM SULPHATE**

The article presents investigations of a new type of inorganic binaers based on magnesium sulphate. Information on the effect of initial humidity of moulding sand and drying temperature on the strength properties of hardened sand is given.

Key words: sand of moulding, magnesium sulphate, inorganic binaers.

УДК 621.771:621.746

Р.А. Бикулов, В.И. Астащенко, М.С. Колесников, Т.В. Астащенко

ВЛИЯНИЕ СФЕРОИДИЗИРУЮЩЕГО МОДИФИЦИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ТЕРМИЧЕСКИ ОБРАБОТАННЫХ АУСТЕНИТО-БЕЙНИТНЫХ ЧУГУНОВ

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Исследована и показана возможность применения низконикелевого и низкомагниевого модификаторов для получения высокопрочного чугуна. Механические свойства полученного чугуна находятся на высоком уровне.

Ключевые слова: высокопрочный чугун, сфероидизирующие модификаторы, аустенизация, изотермическая закалка, закалочные среды, микроструктура металлической основы, графитовые включения, механические свойства.

Аустенито-бейнитные чугуны с шаровидным графитом обладают высоким комплексом механических и эксплуатационных свойств, что делает их перспективными для изготовления ответственных тяжело нагруженных деталей в автомобилестроении: шестерен, коленчатых валов, рычагов передней подвески и т.п. В работе обоснован выбор базового варианта технологического процесса изготовления отливок из высокопрочного чугуна, обеспечивающего получение без термической обработки ВЧШГ с $\sigma_b \geq 600$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 380$ МПа, $\delta \geq 10\%$, а после изотермической закалки – аустенито-бейнитного ВЧШГ с $\sigma_b \geq 900$ МПа, $\sigma_{0,2} \geq 520$ МПа, $\delta \geq 5\%$. Для решения поставленной задачи исследованы широко используемые отечественные сфероидизирующие модификаторы для ковшевого и внутриформенного модифицирования и вновь разработанные [1, 2].

Плавку чугуна проводили в индукционной тигельной печи повышенной частоты МГП-52 с основной футеровкой и использованием в шихте передельных чугунов, отходов углеродистой стали и ферросплавов.

На первом этапе исследований в качестве сфероидизирующих модификаторов использовали ЖКМК-4Р (49,6% Si, 9,5% Ca, 8,6% Mg, 4,7% РЗМ, Fe – ост.); медь – магниевую и никель-магний-цериевую лигатуру (90% Ni, 9% Mg, 1% Ce). В качестве флюса применили криолит К2 (ГОСТ 10561-73). Графитизирующее модифицирование осуществляли ФС-75 (ГОСТ 1415-78). Модификатор ЖКМК-4Р вводили в ковш с помощью «колокольчика», тяжелые лигатуры – на дно ковша.

Для получения аустенито-бейнитной структуры использовали двухступенчатую закалку:

- аустенитизация – нагрев образцов до 900°C в соляной ванне, выдержка 0,5 ч.; заготовки для оценки прокаливаемости выдерживались один час;
- изотермическая закалка в селитре в течении двух часов при температуре 300°C (режим 1), 350°C (режим 2) и 380 °C (режим 3), дальнейшее охлаждение на воздухе.

Химический состав исследованных чугунов: 3,45-3,65% С; 0,2-0,25% Mn; < 0,02% S; < 0,08% P.

Использовались различные варианты модифицирования: 2,5% ЖКМК-4 (1); 0,6% (Ni-Mg-Ce) + 0,6% (Cu-Mg) + 0,6% ФС75 (2); 1,1% (Ni-Mg-Ce) + 0,6% ФС75 (3); 1,2% (Cu-Mg) + 0,6% ФС75 (4).

При варианте 1 в чугуне содержалось 2,9-3,12% Si, в остальных вариантах – 2,4-2,6% Si. При варианте 2 в чугуне содержалось 0,48-0,52% Ni и 0,49-0,52% Cu, при варианте 3 – 0,85-0,93% Ni, при варианте 4 – 0,78-0,81% Ni.

С учетом выбранных отливок-представителей, в частности отливки «рычаг передней подвески» автомобиля КАМАЗ, требуемый уровень прокаливаемости (до 15 мм) обеспечивался введением в чугун до 0,5% Ni или 0,5% Cu. В нелегированных чугунах, модифицированных ЖКМК-4, обеспечивалась прокаливаемость до 10 мм. Предварительные эксперименты показали, что введение до 0,5% Mo несколько снижает прочность и, особенно, пластичность чугуна, обеспечивая в то же время сквозную прокаливаемость образцов толщиной до 30 мм.

Данные о механических свойствах полученных чугунов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства АБВЧШГ

Варианты модифицирования	Режим изотермической закалки	Механические свойства					
		σ_B	$\sigma_{0,2}$	δ , %	НВ	КС, Дж/см ²	
		МПа					
1	1	1390	1000	1220	2,8	401	79
	2			765	9,3	302	132
2	1	1330		1230	1,1	415	53
	2	930		755	5,4	338	83
3	1	1350		1230	1,2	388	71
	2	930		745	7,2	311	99
4	1	1420		1270	2,1	415	71
	2	975		760	7,9	331	93

Учитывая, что применение Ni-Mg-Ce лигатуры позволяет получить достаточно высокие свойства чугуна как в литом, так и в изотермическом закаленном состояниях, а также ее широкое применение на заводах, нами исследована возможность использования низкомагнетной (до 5% Mg) и низконикелевой (до 30% Ni) лигатуры, отличающейся высокой технологичностью при ковшевом модифицировании, сравнительной дешевизной и возможностью ее изготовления непосредственно в литейных цехах.

Проведенные исследования позволили оптимизировать состав модификатора и отработать технологию его получения и измельчения.

При получении лигатуры использовались две плавильные печи, процесс смешения расплавов и получение низконикелевой Fe-Ni-Mg-Ce лигатуры осуществлялся под слоем флюса, церий вводился в виде МЦ-40. По одному варианту лигатура разливалась в водоохлаждаемые изложницы. Полученные слитки дробились с использованием вибрационной щековой дробилки марки 150 ДР и мельницы КИД60, что позволило получить фракцию менее 1,0 мм. В результате дополнительных экспериментальных работ нами была также получена лигатура в виде порошка на установке УРС40-1, которая используется обычно для получения металлических порошков распылением расплава в струе газа. Полученный порошок с фракцией 0,2-0,4 мм отличается стабильностью химического состава, удобен для автоматизированного процесса дозирования и расфасовки. Использование лигатуры в виде порошка повышенной дисперсности при обработке чугуна в ковшах до 70 кг показало ее высокую технологичность, отсутствие пироэффекта и дымовыделения, высокое усвоение и обеспечивает (при остаточном содержании Ni в чугуне = 0,51%) без термообработки $\sigma_B = 605$ МПа, $\sigma_{0,2} = 385$ МПа и $\delta = 10,2\%$, а после термообработки (режим 1/ режим 2) $\sigma_B = 1390/1120$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1180/905$ МПа и $\delta = 2,6/5,5\%$.

При внутриформенном модифицировании использовалась лигатура ФСМг5 (ТУ-14-5-134-86). Конструкция и методика расчета литниковой системы были, как и на ОАО «КАМАЗ», но с установкой фильтра типа Sedex.

В чугунах, содержащем 3,48% С, 2,5% Si, 0,16% Mn, 0,2% Ni, 0,58% Cu, 0,015% S, 0,038% P и 0,06% Cr, при введении 1,5% ФСМг5 были обеспечены свойства:

- без термообработки $\sigma_B = 605$ МПа, $\sigma_{0,2} = 400$ МПа, $\delta = 10,4\%$ и 230НВ;
- после изотермической закалки (режим 3) $\sigma_B = 1020$ МПа, $\sigma_{0,2} = 760$ МПа, $\delta = 5,6\%$ и 325 НВ.

В чугунах, содержащем 3,37% С, 2,67% Si, 0,12% Mn, 0,64% Cu, 0,034% S, 0,047% P и 0,04% Cr, были обеспечены свойства:

- без термообработки $\sigma_B = 650$ МПа, $\sigma_{0,2} = 420$ МПа, $\delta = 7,3\%$ и 235 НВ;
- после изотермической закалки (режим1/режим2) $\sigma_B = 1470/1140$ МПа, $\sigma_{0,2} = 1150/770$ МПа, $\delta = 3,0/9,7\%$ и 415НВ/330НВ.

Полученные результаты работы свидетельствуют о том, что с использованием отечественных шихтовых материалов и предложенных низконикелевых и низкомагниевого модификаторов возможно получение отливок из ВЧШГ, которые обеспечивают для деталей автомобилестроения из чугуна требуемые свойства как в литом, так и в термообработанном состояниях.

Во второй части работы исследовано влияние легирования чугуна никелем и медью, которые (по имеющимся данным) увеличивают прокаливаемость и повышают прочность чугуна. Нами была проведена серия экспериментов, в которых никель и медь вводились отдельно и совместно. Химический состав, прокаливаемость, механические свойства базовых чугунов, используемых на ОАО «КАМАЗ», в исходном и закаленном состояниях приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Характеристика химического состава и структуры АБВЧШГ^{1*}

Плавка	Химический состав (мас., %)						Структура графита		Количество феррита в металлической основе в литом состоянии
	С	Si	Mn	Ni	Cu	Mo	K_ϕ	d_r	
1	3,57	2,61	0,26	0,23	0,57	-	0,94	43	Ф65
2	3,45	2,71	0,25	0,05	0,65	-	0,93	38	Ф40
3	3,64	2,64	0,27	0,90	-	-	0,93	36	Ф55
4	3,57	2,68	0,27	0,57	0,49	-	0,90	51	Ф35
5	3,56	2,51	0,27	-	0,94	-	0,91	38	Ф30
6	3,52	2,57	0,28	1,93	-	-	0,94	41	Ф15
7	3,23	2,26	0,51	0,35	1,00	0,30	0,92	48	Ф5

* АБВЧШГ – аустенито-бейнитный высокопрочный чугун с шаровидным графитом; K_ϕ – коэффициент формы графита; d_r – средний размер графитовых включений (мкм).

Из каждой плавки определялись механические свойства ВЧШГ на образцах, вырезанных из стандартных клиньев: в литом состоянии (по 3 образца от каждой плавки) и после изотермической закалки (по 3 образца на каждый режим термической обработки).

Исследования структуры на микроскопе NEOFOT-21 проводили на шлифах, вырезанных из образцов клиновидных заготовок и головок образцов после механических испытаний. Механические испытания при статических нагрузках проводили на универсальной разрывной машине ZD-20. Ударную вязкость определяли по ГОСТ 9454-78 на образцах размером 10×10×55 мм без надреза на маятниковом копре МК-10.

Во всех случаях после закалки структура чугуна состояла из бейнита и остаточного аустенита. Видно, что изотермическая закалка чугуна базового состава (табл. 3), легированного

в различном соотношении медью и никелем, обеспечивает возможность варьировать в широких пределах прочностью (905-1450 МПа) и пластичностью (1,3-9,8%). При этом прокаливаемость изменяется в пределах от 7,5 до 17 мм. Дополнительное легирование чугуна молибденом (0,3%) несколько снижает пластичность, но увеличивает прокаливаемость до 32-38 мм.

Таблица 3

**Влияние параметров термической обработки на механические свойства
и прокаливаемость АБВЧШГ**

Плав-ка	Параметры термообработки				Механические свойства				Прокаливаемость, мм
	аустенитизация		изотермическая закалка		σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	НВ	
	$T, ^\circ\text{C}$	τ , мин	$T, ^\circ\text{C}$	τ , мин					
1	-	-	-	-	530	420	11,8	190	-
1	900	30	300	30	1400	1230	1,6	400	12,0
1	900	30	380	30	1000	750	5,4	295	9,0
2	-	-	-	-	560	440	6,7	200	-
2	900	30	300	30	1450	1120	2,1	406	10,0
2	900	30	380	30	1140	730	8,9	298	8,0
3	-	-	-	-	520	410	7,4	196	-
3	900	30	300	30	1350	1220	1,3	386	10,8
3	900	30	380	30	905	715	7,9	290	7,5
4	-	-	-	-	550	445	6,3	202	-
4	900	30	300	30	1330	1120	1,2	405	12,0
4	900	30	380	30	915	730	6,1	305	9,0
5	-	-	-	-	580	410	5,8	206	-
5	900	30	300	30	1400	1220	2,0	418	13,0
5	900	30	380	30	960	735	8,3	300	9,0
6	-	-	-	-	680	560	2,8	226	-
6	900	30	300	30	1350	1140	5,1	380	17,0
6	900	30	380	30	950	685	9,8	275	12,0
7	-	-	-	-	750	550	1,5	242	-
7	900	30	300	30	1500	1250	1,2	415	38,0
7	900	30	380	30	1015	770	3,8	320	32,0

Выводы

1. Показана возможность использования низконикелевых и низкомагниевого модификаторов для получения высокопрочного чугуна с шаровидным графитом.
2. Благодаря изотермической закалке чугуна в горячем расплаве соли можно повысить прочностные показатели сплава при сохранении на высоком уровне его пластичных свойств.
3. Легирование чугуна медью и никелем позволяет достичь прокаливаемости на уровне 7,5 – 17,0 мм и получить на ВЧШГ высокую прочность как в литом ($\sigma_B > 520$ МПа), так и термообработанном ($\sigma_B > 905$ МПа) состоянии. Дополнительное введение молибдена в чугун существенно повышает его прокаливаемость, но несколько снижает (до 3,8%) пластичность. Достижимый уровень свойств указывает на возможность применения чугуна для автомобильных отливок ответственного назначения.

Библиографический список

1. Производство чугунов многоцелевого назначения: разработка составов и управление технологическими процессами / Р.А. Бикулов [и др.]. – М.: Academia, 2009. – 351 с.
2. **Корниенко, Э.Н.** Разработка высокопрочных чугунов с повышенными специальными свойствами / Э.Н. Корниенко, М.С. Колесников. – Наб. Челны: Изд-во Камского политехн. ин-та, 1999. – 169 с.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

R.A. Bikulov, V.I. Astachenko, M.S. Kolesnikov, T.V. Fstaschenko

INFLUENCE OF SPHEROIDIZING MODIFICATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF THERMALLY TREATED AUSTENITE AND BAINAITE CAST IRON

The possibility of applying low nickel and low magnesium modifiers for high-test cast iron producing is shown. Mechanical properties of the derived cast iron are on a high level.

Cast iron alloying by nickel, copper and molybdenum and also isothermal annealing promotes hardening and harden ability of alloy.

Key words: High-test cast iron, spheroidizing modifiers, austenite process, isothermal annealing, quenching circumstances, microstructure of metal foundation, graphite inclusions, mechanical properties.

УДК 539.3, 621.74

Г. М. Севастьянов, В. И. Одинокоев, И. Г. Сапченко

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЯ ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ДЛЯ КЕРАМИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКОВОЙ ФОРМЫ В ЛИТЬЕ ПО ВЫПЛАВЛЯЕМЫМ МОДЕЛЯМ

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Приводится оригинальный алгоритм решения задачи распространения теплоты в керамической форме при заливке и затвердевании расплава стали и расчёта фронта кристаллизации. Алгоритм предназначен для использования в программных продуктах научно-исследовательской и прикладной направленности для литейного производства.

Ключевые слова: литейное производство, керамические оболочковые формы, уравнение межфазового перехода, уравнение теплопроводности, численные методы.

Введение. Рассмотрим процесс заливки стали температуры θ_M^0 в керамическую оболочковую форму, разогретую до температуры θ_F^0 . Ограничимся рассмотрением стандартного стояка формы, представляющего собой осесимметричное тело, состоящее из сферической и цилиндрической частей. Геометрические параметры стояка: R – радиус сферической части, S – высота цилиндрической части, H – толщина формы. Ввиду осевой симметрии и однородности материала формы и заливаемого металла будем рассматривать сегмент стояка с произвольным углом развертки ω . Зададим систему криволинейных координат и разобьём рассматриваемую область ортогональными плоскостями, как показано на рис. 1. Число элементов разбиения по координате α_1 : в форме – N_F^I , в металле – N_M^I ; по координате α_2 : в сферической части стояка – N_ϕ^{II} , в цилиндрической части стояка – N_H^{II} . Таким образом, общее число элементов равно $(N_F^I + N_M^I)(N_\phi^{II} + N_H^{II})$.

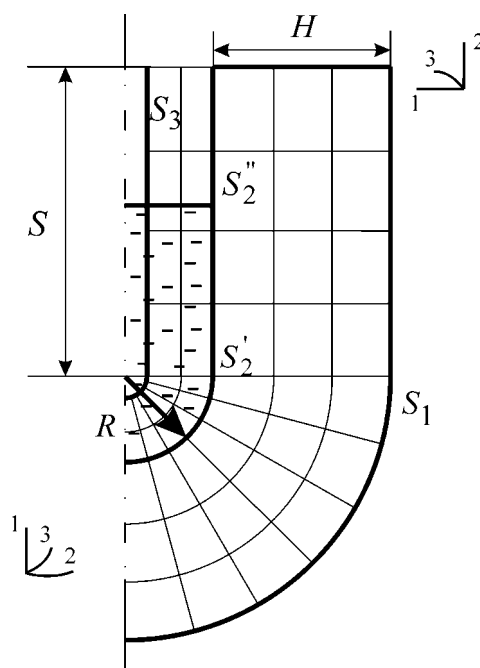


Рис. 1. Область расчёта с обозначением поверхностей, разбитая на ортогональные элементы

Формализация процесса. Моделируемый процесс распространения теплоты состоит из двух этапов: этап заливки расплава, на котором непрерывно меняется граница раздела металл – форма и этап последующего застывания металла в форме.

Время заполнения формы рассчитаем при постоянной скорости поступления расплава:

$$\tau_1 = \tau_\phi + \tau_H,$$

где τ_ϕ – время заполнения сферической части; τ_H – время заполнения цилиндрической части;

$$\tau_\phi = \frac{2\pi R^3}{3\nu}, \quad \tau_H = \frac{\pi R^2 H}{\nu},$$

ν – скорость поступления расплава.

Общее время, в течение которого будем рассматривать процесс, складывается из τ_1 и времени τ_2 – продолжительности второго этапа.

Примем ряд предположений:

- в процессе заливки не происходит фазовый переход расплава; это предположение в реальных условиях выполнено практически в точности из-за незначительности времени заполнения формы и процессов перемешивания металла под напором струи; по тем же причинам принимается, что температура расплава остаётся неизменной до начала второго этапа процесса;

- в течение некоторого времени после окончания заливки в жидком металле сохраняется область, температура которой равна начальной температуре заливаемого металла; граничная поверхность этой области на рис. 1 обозначена S_3 ; фактически, представленное предположение адекватно, если поверхность S_3 задана на достаточном удалении от внутренней поверхности формы;

- температура внешней грани формы во время заливки постоянна, а в дальнейшем изменяется по заданному закону $\theta|_{S_1} = \theta(\tau)$, где τ – время с начала процесса;

- считаются заданными температурные зависимости теплофизических величин для стали и керамики формы: теплопроводность $\lambda_M(\theta)$ и $\lambda_F(\theta)$, теплоёмкость $C_M(\theta)$ и $C_F(\theta)$, плотность $\rho_M(\theta)$ и $\rho_F(\theta)$.

Зададим разбиение времени процесса по шагам: m_ϕ^I – число шагов при заполнении сферической части стояка; m_H^I – число шагов при заполнении цилиндрической части стояка, m^{II} – число шагов на втором этапе процесса (этап затвердевания полностью залитого металла).

Тогда начальные условия на первом шаге процесса включают в себя поле температур в элементах формы и расплава $\theta_{i,j}$, где i, j – индексы, определяющие положение элемента по сетке; i – номер столбца (нумерация от оси симметрии); j – номер элемента в столбце (нумерация от внешней грани формы):

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} \theta_M^0, & \text{при } N_F^I < j \leq N_F^I + N_M^I \\ \theta_F^0, & \text{при } j \leq N_F^I \end{cases}.$$

На последующих шагах начальными условиями по температуре являются рассчитанные на предыдущем шаге поля температур.

Граничные условия на этапе 1 $\theta|_{S_2'} = \theta_M^0$, $\theta|_{S_2''} = \theta_F^0$, $\theta|_{S_1} = \theta_F^0$, или в матричной форме:

$$\theta_{i, N_F^I + 1} = \begin{cases} \theta_M^0, & \text{при } i \leq n(\tau) \\ \theta_F^0, & \text{при } i > n(\tau) \end{cases}, \quad (1)$$

$$\theta_{i,1} = \theta_F^0, \quad i = \overline{1, (N_\phi^{II} + N_H^{II})}. \quad (2)$$

Здесь $n(\tau)$ – число дуг на внутренней поверхности формы, составляющих S_2' , иными словами, это номер последнего элемента «залитого» металлом. Оно определяется следую-

щим образом. Возьмём произвольное $\tau < \tau_\phi$. Объём расплава, поступивший в форму за это время, равен τv . Этот расплав занимает в стояке элемент объёма высотой h , равный $\pi \int_0^h \sqrt{R^2 - (R-x)^2} dx$ (рис. 2), тогда $\tau v = \frac{1}{3} \pi h^2 (3R - h)$.

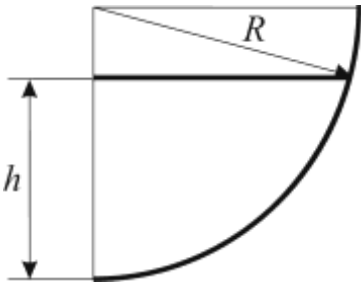


Рис. 2. Элемент объёма в сферической части формы

Это кубическое уравнение решается после соответствующих преобразований относительно h по формулам Кардано или же методом половинного деления на полуинтервале $h \in [0, R]$, где оно имеет один действительный корень. Далее, учитывая $\cos \varphi = 1 - \frac{h}{R}$, выразим

$$n(\tau) = \text{round} \left(\frac{2N_\phi^{\text{II}} \cdot \arccos \left(1 - \frac{h(\tau)}{R} \right)}{\pi} \right), \quad \text{при } \tau < \tau_\phi, \quad \text{где}$$

$\text{round}(x)$ – округленное к ближайшему целому значение x .

При произвольном $\tau_\phi \leq \tau \leq \tau_\phi + \tau_H$ $n(\tau) = N_\phi^{\text{II}} + \text{round} \left(\frac{v(\tau - \tau_\phi) N_H^{\text{II}}}{\pi R^2 H} \right)$.

Граничные условия на этапе 2 $\theta|_{S_3} = \theta_M^0$, $\theta|_{S_1} = \theta(\tau)$ или

$$\theta_{i, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}})} = \theta_M^0, \quad \theta_{i, 1} = \theta(\tau), \quad i = \overline{1, (N_\phi^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})} \quad (3)$$

Алгоритм расчёта температурных полей. Согласно методу, описанному в [1, 2], предпримем следующую последовательность шагов.

1. Производится подсчёт дуг ортогональных элементов:

- массив дуг $S2_{i,j}$, отложенных по координате α_1 , $i = \overline{1, (N_\phi^{\text{II}} + N_H^{\text{II}} + 1)}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}} + 1)}$,

$$S2_{i,j} = \begin{cases} \frac{H}{N_F^{\text{I}}}, & \text{если } j \leq N_F^{\text{I}} \\ \frac{d}{N_M^{\text{I}}}, & \text{если } j > N_F^{\text{I}} \end{cases},$$

где d – расстояние между поверхностями S_3 и S_2 ;

- массив дуг $S1_{i,j}$, отложенных по координате α_2 , $i = \overline{1, (N_\phi^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}} + 1)}$,

$$S1_{i,j} = \begin{cases} (R + H - K1) \frac{\pi}{2N_\phi^{\text{II}}}, & \text{если } i \leq N_\phi^{\text{II}} \\ \frac{S}{N_H^{\text{II}}}, & \text{если } i > N_\phi^{\text{II}} \end{cases},$$

где $K1 = \begin{cases} 0, & \text{если } j = 1 \\ \sum_{k=1}^{j-1} S2_{i,k}, & \text{если } j \neq 1 \end{cases};$

- массив дуг $S3_{i,j}$, отложенных по координате α_3 , $i = \overline{1, (N_\phi^{\text{II}} + N_H^{\text{II}} + 1)}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}} + 1)}$,

$$S3_{i,j} = (R + H - K1) \sin \left(\frac{\pi}{2N_{\phi}^{\text{II}}} K2 \right) \cos \omega,$$

где $K1 = \begin{cases} 0, & \text{если } j = 1 \\ \sum_{k=1}^{j-1} S2_{i,k}, & \text{если } j \neq 1 \end{cases}$, $K2 = \begin{cases} i-1, & \text{если } i \leq N_{\phi}^{\text{II}} + 1 \\ N_{\phi}^{\text{II}}, & \text{если } i > N_{\phi}^{\text{II}} + 1 \end{cases}$.

2. Задаётся начальное поле температур (на первом шаге используются начальные условия задачи, на последующих – значения, рассчитанные на предыдущем шаге) $\theta_{i,j}$, $i = \overline{1, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + 1)}$. Согласно граничным условиям (1)-(2) задаются элементы массива $\theta_{i,j}$, $i = \overline{1, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + 1)}$ (внешняя поверхность формы и поверхность соприкосновения металла с формой).

3. В соответствии со сформированным полем температур $\theta_{i,j}^0$ для каждого элемента области задаются массивы теплопроводности $\lambda_{i,j}$, теплоёмкости $C_{i,j}$ и удельного веса $\gamma_{i,j}$.

4. Для внутренних элементов области производится расчёт коэффициентов $t11_{i,j}$, $t12_{i,j}$, $t22_{i,j}$, $t21_{i,j}$ $i = \overline{2, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}} - 1)}$, $j = \overline{2, N_F^{\text{I}}}$ по формулам:

$$t11_{i,j} = \frac{(\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j-1})S1_{i,j} \cdot (S3_{i,j} + S3_{i+1,j})\Delta\Delta_k}{C_{i,j}\gamma_{i,j}V_{i,j}(S2_{i,j} + S2_{i+1,j} + S2_{i,j-1} + S2_{i+1,j-1})}, \tag{4.1}$$

$$t12_{i,j} = \frac{(\lambda_{i,j} + \lambda_{i,j+1})S1_{i,j+1}(S3_{i,j+1} + S3_{i+1,j+1}) \cdot \Delta\tau_k}{C_{i,j}\gamma_{i,j}V_{i,j}(S2_{i,j} + S2_{i+1,j} + S2_{i,j+1} + S2_{i+1,j+1})}, \tag{4.2}$$

$$t22_{i,j} = \frac{(\lambda_{i,j} + \lambda_{i+1,j})S2_{i+1,j}(S3_{i+1,j} + S3_{i+1,j+1})\Delta\Delta_k}{C_{i,j}\gamma_{i,j}V_{i,j}(S1_{i,j} + S1_{i,j+1} + S1_{i+1,j} + S1_{i+1,j+1})}, \tag{4.3}$$

$$t21_{i,j} = \frac{(\lambda_{i,j} + \lambda_{i-1,j})S2_{i,j}(S3_{i,j} + S3_{i,j+1})\Delta\Delta_k}{C_{i,j}\gamma_{i,j}V_{i,j}(S1_{i,j} + S1_{i,j+1} + S1_{i-1,j} + S1_{i-1,j+1})}, \tag{4.4}$$

где $\Delta\tau_k$ – величина k -го шага по времени; $V_{i,j}$ – объём элемента (i, j) , вычисленный приближённо по формуле $V_{i,j} = (S1_{i,j} + S1_{i,j+1})(S2_{i,j} + S2_{i+1,j})(S3_{i,j} + S3_{i,j+1} + S3_{i+1,j} + S3_{i+1,j+1})/16$.

Отметим, что согласно формулам (4.1)–(4.4) указанные коэффициенты не зависят от угла развёртки ω сегмента формы. Это подтверждает возможность произвольного его выбора.

По формуле

$$\theta_{i,j}^{\text{iter}} = \frac{\theta_{i,j}^0 + \theta_{i,j-1}^{\text{iter}-1}t11_{i,j} + \theta_{i,j+1}^{\text{iter}-1}t12_{i,j} + \theta_{i+1,j}^{\text{iter}-1} \cdot t22_{i,j} + \theta_{i-1,j}^{\text{iter}-1}t21_{i,j}}{1 + t11_{i,j} + t12_{i,j} + t22_{i,j} + t21_{i,j}},$$

где $\theta_{i,j}^0$ – элементы сформированного в пункте 3 поля температур; iter – номер итерации, представляющей собой итеративную процедуру, рассчитываются значения температуры во внутренних элементах области.

5. Для элементов первого столбца элементов от оси симметрии ($i = 1, j = \overline{2, N_F^{\text{I}}}$) коэффициент $t21_{i,j} = 0$, коэффициенты $t12_{i,j}$ и $t22_{i,j}$ рассчитываются по формулам (4.2) и (4.3), а коэффициент $t11_{i,j}$, исходя из соображений симметрии, по формуле

$$t11_{i,j} = \frac{2\lambda_{i,j}S1_{i,j}(S3_{i,j} + S3_{i+1,j})\Delta\Delta_k}{C_{i,j}\gamma_{i,j}V_{i,j}(S2_{i,j} + S2_{i+1,j} + S2_{i,j-1} + S2_{i+1,j-1})}.$$

Итеративная процедура для этих ячеек имеет вид

$$\theta_{i,j}^{iter} = \frac{\theta_{i,j}^0 + \theta_{i,j-1}^{iter-1} t1_{1,i,j} + \theta_{i,j+1}^{iter-1} t1_{2,i,j} + \theta_{i+1,j}^{iter-1} t2_{2,i,j}}{1 + t1_{1,i,j} + t1_{2,i,j} + t2_{2,i,j}}.$$

6. Температура в элементах последнего столбца ($i = \overline{N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}}}$, $j = \overline{2, N_F^{\text{I}}}$) рассчитывается, исходя из сглаживающего условия $\theta_{i,j}^{iter} = \frac{\theta_{i,j}^0 + \theta_{i-1,j}^{iter}}{2}$.

Пункты 4-6 повторяются до сходимости по температуре, то есть до тех пор, пока не выполнится условие $\max\{|\theta_{i,j}^{iter} - \theta_{i,j}^{iter-1}|\} \leq \varepsilon$, $i = \overline{1, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + 1)}$, где ε – требуемая точность. Сходимость процедуры доказана в [2].

Описанная процедура повторяется ($m_{\phi}^{\text{I}} + m_H^{\text{I}}$) раз, что имитирует заполнение формы целиком. На этом завершается первый этап расчёта. Отметим, что п. 1 выполняется только один раз в начале процедуры, поскольку считается, что термические деформации формы, в силу хрупкости керамики, остаются малы в рассматриваемом процессе и не вносят сильных искажений в сетку (по крайней мере, если не произошло нарушения целостности формы).

На втором этапе процесса начинается процесс кристаллизации металла в форме. Расчёт температурных полей на этом этапе также происходит по описанной процедуре 1-6, за единственным отличием: область расчёта увеличивается за счёт элементов в жидком и закристаллизовавшемся металле, соответственно все массивы в пп. 2 и 3 ($\theta_{i,j}$, $\lambda_{i,j}$, $C_{i,j}$, $\gamma_{i,j}$) имеют размерность $i = \overline{1, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}})}$. Соответствующим образом изменяются и границы массивов в пп. 4-6. Начальным полем температур в п. 2 на втором этапе служит поле

$$\theta_{i,j} = \begin{cases} \theta_{i,j}^{m_{\phi}^{\text{I}} + m_H^{\text{I}}}, & \text{при } j \leq N_F^{\text{I}} + 1, \\ \theta_M^0, & \text{при } j > N_F^{\text{I}} + 1 \end{cases},$$

где $i = \overline{1, (N_{\phi}^{\text{II}} + N_H^{\text{II}})}$, $j = \overline{1, (N_F^{\text{I}} + N_M^{\text{I}})}$.

В п. 2 используются граничные условия (3). Число шагов на втором этапе процесса равно m^{II} . Для каждого шага по времени после расчёта поля температур выполняется расчёт фронта кристаллизации.

Алгоритм расчёта фронта кристаллизации. Расчёт фронта кристаллизации проведём следующим образом [3]. Рассмотрим уравнение межфазового перехода

$$\frac{\partial \theta_1}{\partial n} \lambda_1 - \frac{\partial \theta_2}{\partial n} \lambda_2 = \frac{\partial \Delta}{\partial \tau} L \rho, \quad (5)$$

где θ_1 и θ_2 – температура в твердой и жидкой фазах соответственно; λ_1 и λ_2 – коэффициенты теплопроводности в соответствующих фазах; Δ – толщина корочки; L – скрытая теплота плавления; ρ – плотность металла; n – нормаль к границе раздела двух фаз, направление нормали совпадает с направлением координатной оси 1.

Решение этого уравнения получается при некоторых упрощающих предположениях.

Во-первых, примем градиент температуры в жидкой фазе равным нулю, то есть

$$\frac{\partial \theta_2}{\partial n} = 0. \quad (6)$$

Во-вторых, примем, что температура в твердой фазе изменяется линейно, то есть

$$\theta_1 = \theta_1^1 + (\theta_1^2 - \theta_1^1) \frac{x}{\Delta}, \quad (7)$$

где θ_1^1 – температура на границе образовавшейся на временном шаге $\Delta\tau$ корочки и твердого металла (или формы на первом временном шаге кристаллизации); θ_1^2 – температура на границе образовавшейся на временном шаге $\Delta\tau$ корочки и жидкого металла; x – координата по толщине корочки. Тогда, учитывая (6) и (7), уравнение межфазового перехода запишется в виде

$$\lambda_1 \frac{\theta_1^2 - \theta_1^1}{\Delta} = L \cdot \rho \cdot \frac{d\Delta}{d\tau}. \quad (8)$$

Сгруппируем и проинтегрируем:

$$\int \frac{\theta_1^2 - \theta_1^1}{L \cdot \rho} \lambda_1 d\tau = \int \Delta d\Delta, \quad (9)$$

откуда зависимость для определения прироста по толщине закристаллизовавшейся корочки на временном шаге $\Delta\tau$ будет

$$\Delta = \sqrt{\frac{2(\Delta\theta_1)\lambda_1}{\rho L} \Delta\tau},$$

где $\Delta\theta_1$ – перепад температур в твердой фазе вблизи фронта кристаллизации.

Тогда используем следующую итерационную процедуру для расчёта фронта кристаллизации металла на k -м шаге второго этапа:

1) для каждого номера столбца элементов i определим такой номер элемента в столбце j_k^0 , что $\theta_{i,j_k^0} \leq \theta_k$, $\theta_{i,j_k^0+1} > \theta_k$, где θ_k – температура кристаллизации металла;

2) итеративно ($iter$ – номер итерации) рассчитывается прирост толщины корочки на k -м временном шаге по формуле

$$\Delta_k^{iter} = \sqrt{\frac{2 \cdot (\theta_{i,j_k^{iter-1}} - \theta_{i,j_{(k-1)}}) \cdot \lambda(\theta_k)}{\rho(\theta_k)L}} \Delta\tau_k, \text{ где } j_{(k-1)} \text{ – наибольший номер элемента в твёрдой}$$

фазе i -го столбца на $(k-1)$ -м временном шаге, $j_0 = N_F^I$;

3) рассчитывается величина

$$j_k^{iter} = \text{round}\left(\frac{\Delta_k^{iter}}{d} N_M^I\right),$$

где d – расстояние между поверхностями S_3 и S_2 .

Пункты 2-3 повторяются до тех пор, пока не выполнится равенство $j_k^{iter} = j_k^{iter-1}$, тогда $j_k = j_k^{iter}$. Таким образом, найдено уточнённое значение величины прироста корочки затвердевшего металла для i -го столбца элементов на k -м временном шаге.

После этого уточняются температуры в i -м столбце с учётом фазового перехода: $\theta_{i,j} = \theta_k$ при $j = \overline{j_k}, j_k^0$. Описанную процедуру необходимо провести для каждого столбца элементов области. Алгоритм отражает картину протекания процесса кристаллизации металла и позволяет определить границу раздела фаз в данный момент времени.

Совокупность описанных алгоритмов была реализована в среде Compaq Visual FORTRAN 6.0 и используется для численного моделирования напряженно-деформированного состояния керамических оболочковых форм.

Библиографический список

1. Математическое моделирование сложных технологических процессов / В.И. Одинокоев [и др]. – М.: Наука, 2008. – 176 с.

2. **Одиноков, В. И.** Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом / В.И. Одиноков. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 168 с.
3. **Севастьянов, Г. М.** Моделирование процесса заливки металла в керамическую осесимметричную оболочковую форму / Г. М. Севастьянов, В. И. Одиноков, И. Г. Сапченко // Прикладные задачи механики деформируемого твёрдого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. – Комсомольск-на-Амуре: ИМиМ ДВО РАН, 2009. Вып. 3. Ч. 2. С. 18–38.

*Дата поступления
в редакцию 06.04.2010*

G. M. Sevastyanov, V. I. Odinokov, I. G. Sapchenko

**THE SOLUTION ALGORITHM FOR HEAT CONDUCTION EQUATION
FOR CERAMIC SHELL MOLD IN INVESTMENT CASTING**

Original solution algorithm for heat conduction problem in ceramic mould during a process of pouring and solidification of a steel melt and crystallization front computation are given. Algorithm is assigned for use in research and applied software products for foundry engineering.

Key words: foundry engineering, ceramic shell moulds, interphase conversion equation, heat conduction equation, numerical methods.

УДК 539.3.

С.Ю. Скляр, В.И. Одинокоев, Н.С. Ловизин

РЕШЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ НА ЛИТЕЙНО-КОВОЧНОМ МОДУЛЕ ВЕРТИКАЛЬНОГО ТИПА

Институт машиноведения и металлургии ДВО РАН

Моделируется сложный технологический процесс получения непрерывных металлоизделий с использованием литейно-ковочного модуля. Приводится алгоритм решения тепловой задачи, описывающей данный процесс, а также численные результаты исследования.

Ключевые слова: литье, температура, кристаллизатор, литейно-ковочный модуль, металлоизделия, моделирование, ортогональный.

Литейно-ковочный модуль вертикального типа (ЛКМВ) представляет собой компактное устройство, реализующее процесс получения непрерывных металлоизделий (НМ) из цветных сплавов и стали [1]. Данный процесс разрабатывается в институте ИМиМ ДВО РАН. Особенностью этого технологического процесса является совмещение в одном устройстве трех процессов: непрерывного литья, жидкой штамповки и горячей обработки металлов давлением.

Суть процесса состоит в следующем (рис. 1, а). Из промежуточного ковша через разливной стакан б жидкий металл 1 заливается в разъемный кристаллизатор с подвижными охлаждаемыми стенками 3, 4. За счет отвода тепла бойками 3, и стенками 4 происходит затвердевание жидкого металла. Бойки 3 и стенки 4 приводятся в движение от эксцентриков приводных валов 5. При этом они деформируют металл 2 и осуществляют его подачу по ходу технологического процесса. Бойки 3 имеют наклонный участок, на котором осуществляется деформация металла, и калибрующий участок, где формируется непрерывный профиль заданного поперечного сечения.

Конфигурация области деформирования определяется геометрическими параметрами ЛКМВ (размеры бойка, угол наклона $\gamma = 10^\circ$, расстояние между осями эксцентриковых валов), скоростью разливки, толщиной образовавшейся корочки и толщиной готового профиля.

Была поставлена пространственная задача по определению полей температур в сложной четырехкомпонентной области: 1 – жидкий металл (границы этой области определялись следующим образом: $\theta > \theta_{кр}$ – жидкая фаза; $\theta \leq \theta_{кр}$ – твердая фаза, где $\theta_{кр}$ – температура кристаллизации); 2 – закристаллизовавшийся твердый металл, ограниченный поверхностями бойков и боковых стенок; 3 – наклонные бойки, 4 – боковые стенки. С учетом симметрии рассматривалась четвертая часть области деформирования (рис. 1, б).

Процесс получения НМ на ЛКМВ циклический. Весь цикл поворота эксцентрикового вала разбивался на m шагов. На каждом временном шаге m решалась система уравнений.

В заготовке рис. 1 (области 1 и 2), и в инструменте рис. 1 (области 3 и 4), на полцикле обжатия имеет место уравнение

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda \operatorname{grad} \theta), \quad (1)$$

где $\lambda = \lambda(\theta)$ – коэффициент теплопроводности; θ – температура; c – удельная теплоемкость; ρ – плотность; τ – время.

Начальное поле температур $\theta = \theta_0$ находится, исходя из следующих соображений. При

установившемся режиме изменение температуры в системе в процессе деформации происходит в течение одного цикла, то есть при повороте эксцентрика от $\alpha = 0$ до $\alpha = 180^\circ$. Далее бойки 3 расходятся и следует продвижение металла стенками 4 в сторону выхода (рис. 1, а). Угол α при этом изменяется от 180 до 360° . Это период разгрузки. Считается, что за этот период происходит полная рекристаллизация деформируемого металла, то есть следующий цикл начинается с начальных условий $\theta = \theta_0$.

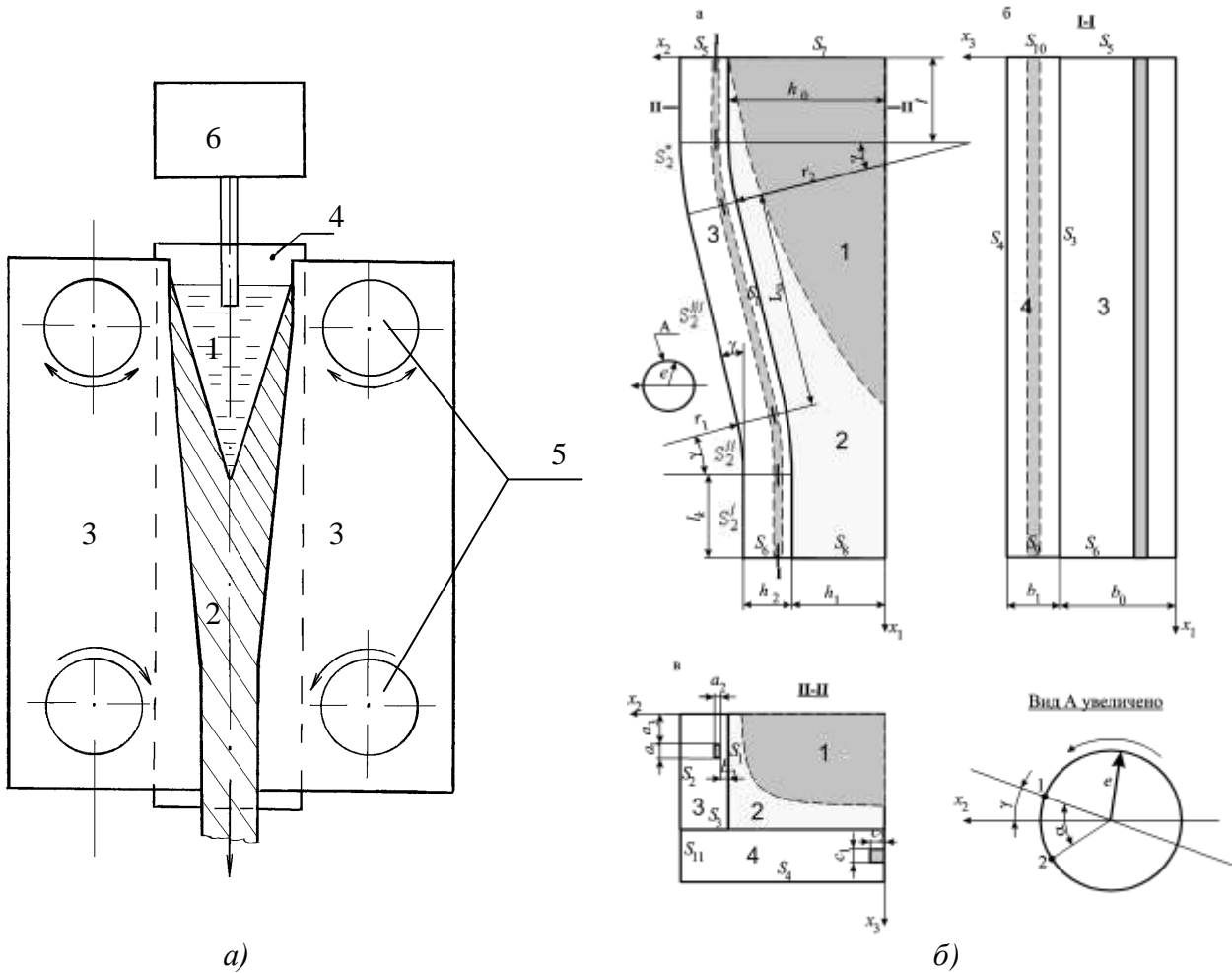


Рис. 1. Процесс получения НМ:
 а – принципиальная схема ЛКМВ; б – расчетная схема процесса

Начальное поле температур перед циклом будем определять из следующего предположения:

- бойки раскрыты ($\alpha = 0$). Это предопределяет геометрию системы;
- полагаем, что масса металла как бы течет в зеве бойков 3 и стенок 4 при соответствующих граничных условиях.

Таким образом, рассматривается стационарный процесс движения металла в замкнутом объеме.

Тогда уравнение теплопроводности по областям запишется в следующем виде.

- Области 1, 2:

Для движущейся среды

$$\text{ср} \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \text{div}(\lambda \text{grad} \theta), \tag{2}$$

где $\frac{d\theta}{d\tau} = \dot{\theta} + v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}$.

Так как процесс стационарный, то $\dot{\theta} = 0$. Тогда

$$\frac{d\theta}{d\tau} = v_i \frac{\partial \theta}{\partial x_i}.$$

Если траекторией движения является одна координата, например x_1 , то

$$\frac{d\theta}{d\tau} = v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1}.$$

Окончательно получим

$$c\rho v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} = \text{div}(\lambda \text{grad}\theta); \quad (3)$$

- Области 3, 4:

При стационарном режиме имеем

$$\text{div}(\lambda \text{grad}\theta) = 0. \quad (4)$$

При решении уравнений (3), (4) задавались граничные условия.

На внешних поверхностях (рис. 1, б) и на поверхностях каналов в областях 3, 4 использовалось граничное условие третьего рода

$$q_n|_{S_i} = \alpha_p (\theta_n - \theta_p^*); \quad i = 2, 4, 6, 9, 10, 11; \quad p = 1, 2. \quad (5)$$

где α_p - коэффициент теплообмена соответственно: α_1 - с внешней средой; α_2 - с водой; θ_p^* - температура окружающей среды ($p = 1, 2$); θ_n - температура поверхности области; q_n - плотность теплового потока для каждой точки поверхности.

$$\theta|_{S_7} = \theta^*, \quad (6)$$

θ^* - температура жидкого металла.

На оси симметрии $x_2 = 0$ и $x_3 = 0$

$$q_n = 0. \quad (7)$$

После решения уравнений (3), (4) с учетом граничных условий (5, 6, 7) поле температур θ будет определено.

Реализация решения указанной системы дифференциальных уравнений осуществлялась апробированными численными методами.

Остановимся более подробно на решении уравнения теплопроводности. Для решения уравнения теплопроводности использовался численный метод [2], согласно которому область разбивается на конечное число ортогональных элементов. На рис. 2 приведена схема разбивки исследуемой области на ортогональные элементы (сечение в плоскости x_1, x_2). Для этого область разбита на десять зон, в которых для описания геометрии приняты разные системы координат: прямоугольные (зоны I, V, VI, VIII, X), билиндрические (зоны II, IV), цилиндрические (зоны III, VII, IX).

Для каждого элемента составляется тепловой баланс, из которого выводится уравнение теплопроводности в следующем виде (рис. 3):

$$\begin{aligned} & t_{12}(\theta_1^+ - \theta_k) - t_{11}(\theta_k - \theta_1^-) + t_{22}(\theta_2^+ - \theta_k) - t_{21}(\theta_k - \theta_2^-) \\ & + t_{32}(\theta_3^+ - \theta_k) - t_{31}(\theta_k - \theta_3^-) = \theta_k - \theta_k^*. \end{aligned} \quad (8)$$

Здесь

$$\begin{aligned}
 t_{12} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^+)}{S_{21} + S_{21}^+} F_1^2 A; & t_{11} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_1^-)}{S_{21} + S_{21}^-} F_1^1 A; \\
 t_{22} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^+)}{S_{12} + S_{12}^+} F_2^2 A; & t_{21} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_2^-)}{S_{12} + S_{12}^-} S_{21}^1 A \\
 t_{32} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_3^+)}{S_{23} + S_{23}^+} F_3^2 A; & t_{31} &= \frac{2(\lambda_k + \lambda_3^-)}{S_{23} + S_{23}^-} F_3^1 A; \\
 A &= \frac{\Delta\tau}{c_k \rho_k V_k}; & V_k &= \frac{S_{12} S_{13} S_{21}}{8}; & F_i^j &= S_{ik}^j S_{ip}^j; \quad i \neq k \neq p; \\
 S_{ij} &= S_{ij}^1 + S_{ij}^2, & S_{ij}^+ &= S_{ij}^{1+} + S_{ij}^{2+}, & S_{ij}^- &= S_{ij}^{1-} + S_{ij}^{2-}, \quad i, k, p = 1, 2, 3; j = 1, 2,
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

где θ_k^* - средняя температура в k -м элементе в начале временного шага $\Delta\tau_m$; в нашем случае $\Delta\tau_m$ - время поворота эксцентрикового вала на угол α на шаге m ; c_k, ρ_k, V_k - соответственно удельная теплоемкость, плотность и объем k -го элемента; λ_k, θ_k - значения коэффициента теплопроводности и температура в k -м элементе в конце временного шага $\Delta\tau$ соответственно; λ_1^-, θ_1^- - соответственно коэффициент теплопроводности и температура в элементе, следующим за элементом k по координате α_1 , в отрицательную сторону; λ_1^+, θ_1^+ - аналогичные параметры в положительном направлении α_1 ; S_{ij}^p - средние значения от дуг ребер элементов.

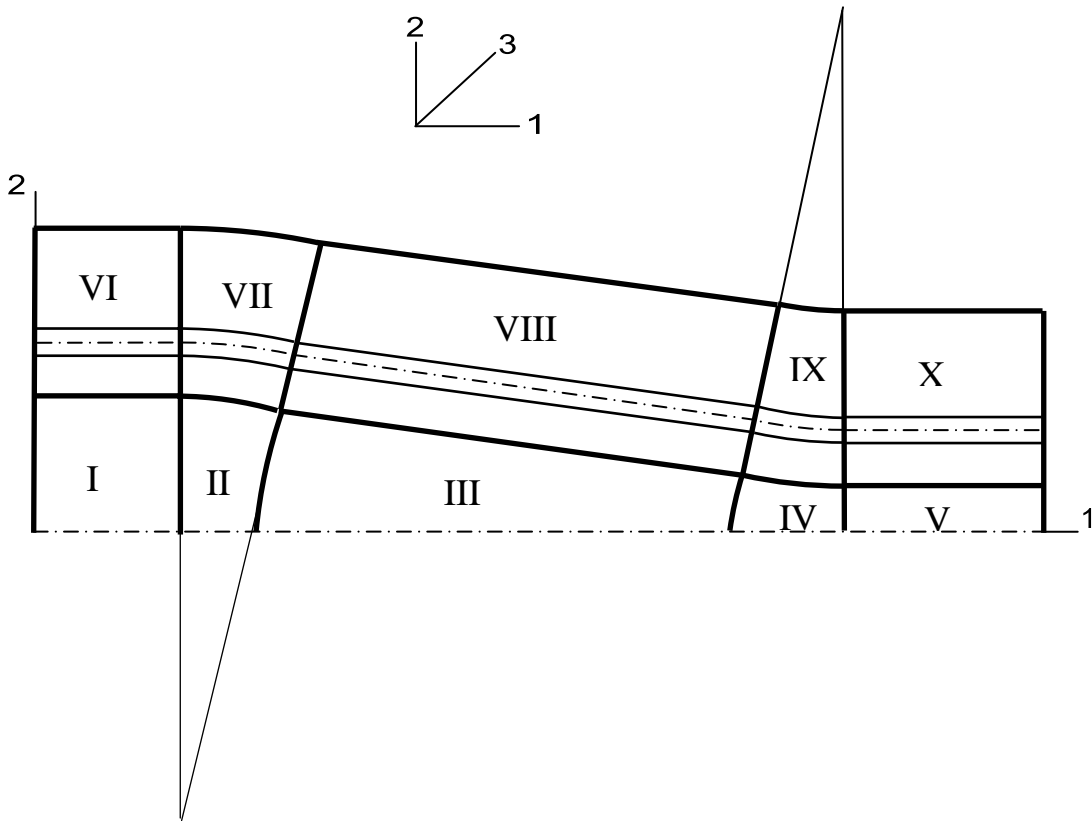


Рис. 2. Схема разбиения исследуемой области

Так, например, $S_{21}^1 = 0,5(|a_0 b_0| + |a_1 b_1|)$.

Тогда $S_{21} = S_{31}$ и $S_{ki} = S_{ji}$; $k \neq j \neq i$.

Выражение (8) может рассматриваться как система уравнений, если $k = 1, \dots, n$, где n – число элементов, на которые разбита область.

Перепишем систему (8) в виде

$$\theta_k = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32} + t_{31}}. \quad (10)$$

Для стационарного процесса (4) имеем

$$\theta_k = \frac{t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32} + t_{31}}. \quad (11)$$

Положим $\lambda_k = \text{const}$, $c_k = \text{const}$, $\gamma_k = \text{const}$. Тогда системы (10), (11) будут линейными и могут быть решены итерационным методом. В работе [2] доказывается сходимость итерационной процедуры.

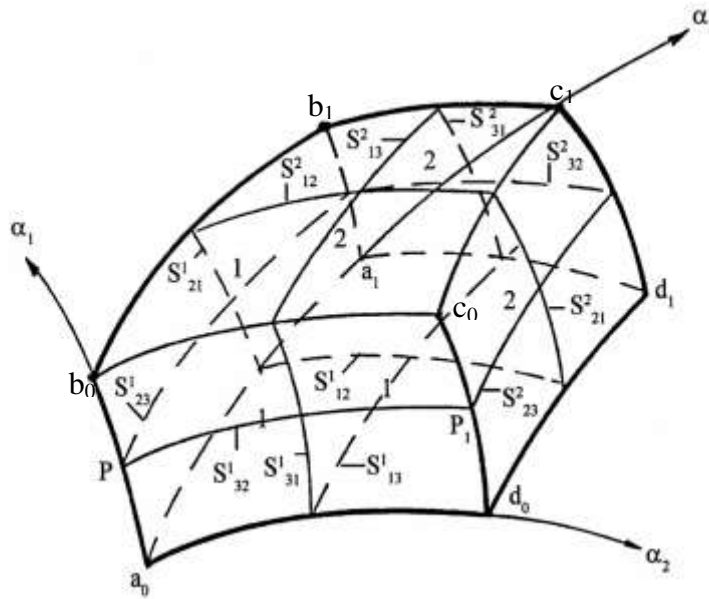


Рис. 3. Вид конечного элемента

В уравнении (3) выражение $v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1}$ представим в разностном виде:

$$v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \approx v_1 \frac{\Delta \theta}{\Delta x_1} = v_1 \frac{\theta_k - \theta_1^-}{\Delta x_1},$$

$\Delta \tau_k = \frac{\Delta x_1}{v_1}$ – время прохождения материальной точки через элемент k . Так как вектор скорости v_1 сонаправлен с координатой x_1 , то окончательно получаем $v_1 \frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{\theta_k - \theta_1^-}{\Delta \tau_k}$.

Таким образом, при расчете начального температурного поля θ_0 расчет температуры θ_k в области 1, 2 производим по формуле

$$\theta_k = \frac{\theta_1^- + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32} + t_{31}}. \quad (12)$$

Учитывая, что $q_n(\tau) = -\lambda \left(\frac{\partial \theta}{\partial n} \right)$ (n – нормаль к поверхности), можно записать для поверхностного элемента β

$$q_n^\beta = -\lambda_\beta \frac{\theta_n^\beta - \theta_n^k}{\delta},$$

где θ_n^k – температура внутреннего элемента k , находящегося по нормали сразу же за поверхностным элементом β ; δ – расстояние от центра тяжести элемента β до центра тяжести элемента k .

Тогда выражение (5) преобразуется к виду

$$\theta_n^\beta = \frac{\lambda_\beta \theta_n^k + \alpha_p \delta \theta_c}{\lambda_\beta + \alpha_p \delta}; \quad p = 1, 2. \quad (13)$$

На основании условия (7) на оси симметрии в плоскости $x_3 = 0$ имеем $\theta_3^- = \theta_k$. Формула (10) имеет вид

$$\theta_k \Big|_{x_3=0} = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{21}\theta_2^- + t_{32}\theta_3^+}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{21} + t_{32}}. \quad (14)$$

На оси симметрии в плоскости $x_2 = 0$ имеем $\theta_2^- = \theta_k$. Формула (10) имеет вид

$$\theta_k \Big|_{x_2=0} = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{32}\theta_3^+ + t_{31}\theta_3^-}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{32} + t_{31}}. \quad (15)$$

Для элементов, примыкающим к двум плоскостям симметрии $x_3 = 0$, $x_2 = 0$ имеем, $(\theta_3^- = \theta_2^-) \Big|_{\substack{x_2=0 \\ x_3=0}} = \theta_k$. Формула (10) приобретает вид

$$\theta_k \Big|_{\substack{x_3=0 \\ x_2=0}} = \frac{\theta_k^* + t_{12}\theta_1^+ + t_{11}\theta_1^- + t_{22}\theta_2^+ + t_{32}\theta_3^+}{1 + t_{12} + t_{11} + t_{22} + t_{32}}. \quad (16)$$

При этом в формулах (14)–(16) для области 3, 4 $\theta_k^* = 0$, для областей 1, 2 - $\theta_k^* = \theta_1^-$.

Таким образом, алгоритм решения температурной задачи имеет следующий вид:

1. Задается геометрия области при $\alpha = \gamma$ и производится ее разбивка на элементы ортогональной формы.

2. Задаются начальные условия: $\lambda_k, c_k, \rho_k, k = 1 \dots, m, \theta_{кр}, \theta_p^*, \alpha_p,$

$p = 1, 2; p = \begin{cases} 1 - \text{воздух} \\ 2 - \text{вода} \end{cases}; v^*$ - скорость движения металла по зонам 1, 2 (рис. 1, б); n –

число оборотов вращения приводных эксцентриковых валов, об/мин.

3. Производится расчет начального температурного поля θ_0 :

а) по формулам (11), (12) насчитываются θ_k по внутренним элементам;

б) по формулам (13)–(16) насчитываются θ_k по граничным элементам и стенкам водоохлаждаемых каналов. По соответствующим формулам вычисляется $\lambda_k(\theta)$ по каждому элементу;

в) следует повторение процедур *a*, *б* до полной сходимости результатов прогонки (≈ 60 итераций).

4. Следует шаг по углу α (поворот эксцентрикового вала), насчитывается новая геометрия области и в соответствии с формулой (10), где θ_k^* - насчитанное в п. 3 начальное температурное поле, находится θ_k на первом временном шаге по аналогичному алгоритму п. 3.

При этом $\Delta\tau_k = \frac{\Delta\alpha \cdot 30}{\pi n}$.

5. Следует снова шаг по α , и осуществляется расчет температурного поля с учетом предыдущего θ_k^* и т.д.

Результаты расчетов, проведенных по данной методике, для центрального сечения НМ из стали марки Ст3.сп приведены на рис. 4.

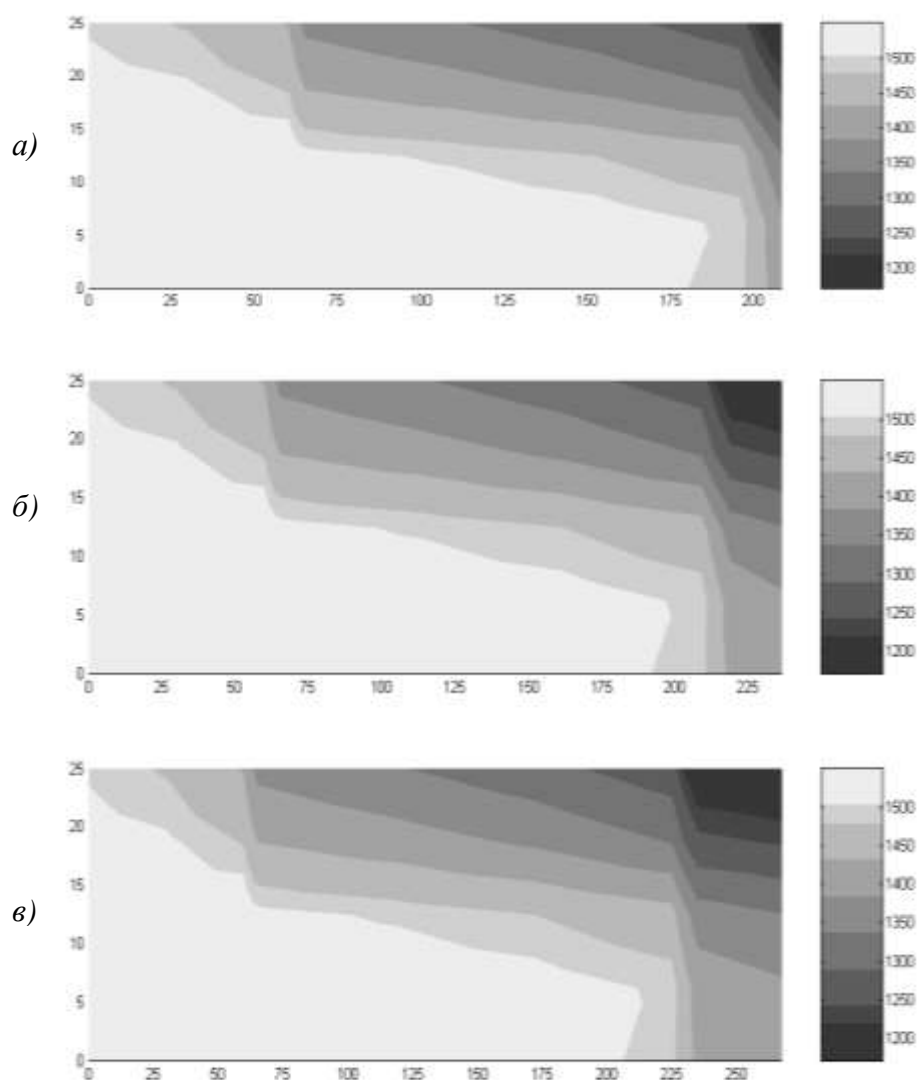


Рис. 4. Распределение значений температурных полей ($^{\circ}\text{C}$) в центральном сечении НМ при угле поворота эксцентрикового вала в сечении:

a – $\alpha = 30^{\circ}$; *б* – $\alpha = 90^{\circ}$; *в* – $\alpha = 150^{\circ}$

Библиографический список

1. Патент №2041011 SU. Устройство для непрерывного литья заготовок / В.И. Одинок. Оpubл. 09.08.1995 Бюл. № 22.
2. **Одинок, В.И.** Численное исследование процесса деформации материалов бескоординатным методом / В.И. Одинок. – Владивосток: Дальнаука, 1995. – 168 с.

*Дата поступления
в редакцию 06.04.2010*

S.J. Sklyar, V.I. Odinokov, N.S. Lovizin.

**DECISION OF THE HEAT PROBLEM FOR PROCESS OF THE METAL GOODS
PRODUCTION IN THE VERTICAL TYPE CASTING-FORGING MODULE**

Complex technological process of continuous metal goods production with use the casting-forming module is simulated. Algorithm of the decision of the heat problem, describing given process was presented. The results of the numerical simulation of researching were presented.

Key words: foundry, temperature, crystallizer, casting-forming module, metal goods, simulation, orthogonal.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 620.193.8

Д.В. Белов¹, М.В. Челнокова¹, Т.Н. Соколова¹, А.А. Калинина¹,
В.Ф. Смирнов², В.Р. Карташов¹

ВЛИЯНИЕ АДСОРБИРОВАННЫХ НА ПОВЕРХНОСТИ ФЕНОЛОВ И РОДСТВЕННЫХ ИМ СОЕДИНЕНИЙ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ КОРРОЗИЮ ЦИНКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
НИИ химии Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского²

Выявлены эффекты усиления и ингибирования ранних стадий биокоррозии цинка, что проявляется в участии фенолов и родственных им соединений, адсорбированных на поверхности металла, образованием экзогенных активных форм кислорода.

Ключевые слова: активные формы кислорода (АФК), биокоррозия металлов, микроскопические грибы, фенолы, супероксид анион-радикал.

Интенсивные исследования причин разрушения металлов под воздействием микроорганизмов начались в 50–60-е годы прошлого столетия [1]. К настоящему времени сформировалась отдельная область науки – биологическая коррозия, объектами исследования которой являются системы «металл – микроорганизм».

Несмотря на многочисленность экспериментальных фактов, их оказывается недостаточно для создания теоретического фундамента, на котором могли бы базироваться наши представления и знания о причинах, определяющих коррозионный процесс, и факторах, позволяющих влиять на динамику коррозионного разрушения.

Ранее, при изучении воздействия широкого ряда микроорганизмов на различные металлы, нами было выдвинуто предположение, что одной из первопричин инициирования коррозии могут быть активные формы кислорода (АФК), в том числе супероксид анион-радикал $O_2^{\cdot -}$, которые образуются и выделяются в окружающую среду в процессе жизнедеятельности микромицетов [2]. Пути образования АФК в клетке и их влияние на развитие микроскопических грибов описаны достаточно подробно, в том числе и в обзорных работах [3].

Известно также, что жизнедеятельность микромицетов, их устойчивость к внешним факторам и окислительным стрессам определяются, в первую очередь, состоянием компонентов антиоксидантной защиты клетки – ферментов супероксиддисмутазы (СОД) и каталазы, которые способны непосредственно снижать уровень клеточных АФК – супероксид анион-радикала $O_2^{\cdot -}$ и перекиси водорода H_2O_2 . Вместе с тем, наряду с главными антиоксидантными системами, большую роль в защитной функции могут играть и некоторые соединения, например, фенолы, которые способны ингибировать многие свободнорадикальные процессы, иницируемые в клетке АФК [4]. Более того, известен антиокислительный эффект замещенных фенолов и “in vitro”. На этом основано их широкое использование как антиокислителей в пищевой, косметической промышленности и других производствах.

Ранее в одной из работ [5] на примере ионола нами были предприняты попытки выявить антиоксидантные свойства замещенных фенолов при коррозионном воздействии на

цинк микромицета *Aspergillus terreus*. Однако, вместо ожидаемого ингибирования коррозии, была обнаружена ее активация, сопровождаемая более глубокой деструкцией металла. Было сделано предположение, что причиной усиления коррозионного разрушения может быть дополнительная генерация свободных фенольных радикалов, а в щелочной среде и супероксид анион-радикала $O_2^{\cdot-}$ [5–7].

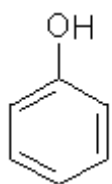
В настоящей работе расширен круг как исследуемых микроскопических грибов, воздействующих на поверхность цинка, так и адсорбированных на поверхности производных фенола, некоторые из которых широко известны как антиоксиданты.

В качестве тест-организмов использовали штаммы следующих видов микроскопических грибов: *Aspergillus niger* ВКМ F-1119, *Aspergillus terreus* ВКМ F-1025, *Aspergillus oryzae* ВКМ F-2096, *Chaetomium globosum* ВКМ F-109, *Fusarium moniliforme* ВКМ F-136, *Gliocladium roseum*, *Paecilomices variotii* ВКМ F-378, *Penicillium ochro-chloron* ВКМ F-1702, *Penicillium chrysogenum* ВКМ F-245, *Penicillium martensii* ВКМ F-310, *Penicillium cyclopium* ВКМ F-265, *Penicillium brevi-compactum*, *Trichoderma viride* ВКМ F-1117. Все микроорганизмы были предоставлены Всероссийской коллекцией микроорганизмов (г. Пущино Московской области).

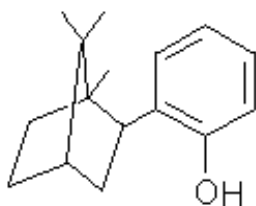
Опыты проводили в чашках Петри на плотной питательной среде Чапека-Докса на семисуточных культурах микроскопических грибов при температуре $(27 \pm 2)^\circ\text{C}$. Подготовку поверхности образцов цинка осуществляли в соответствии с ГОСТ 9.905-82 [8].

Коррозионную стойкость металлических образцов оценивали в баллах по интенсивности коррозионного воздействия микроскопических грибов по ГОСТ 9.048-89 [9]. Каждому образцу присваивали балл коррозионной стойкости.

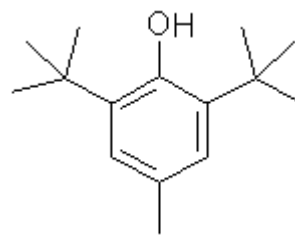
Цинковые образцы обрабатывали 0,01 М растворами фенола, производных фенола и родственных ему соединений. В качестве растворителей использовались следующие вещества – для соединений I, IX – этиловый спирт, IV – VIII, X – ацетон, II, III – гексан. Адсорбцию проводили в течение 12 ч, после чего образцы извлекали из раствора, высушивали на воздухе при температуре 25°C и помещали на газон микромицетов. Динамику коррозии обработанных образцов изучали в сравнении с коррозией необработанных (контрольных) образцов. Каждый опыт проводили в четырех повторностях.



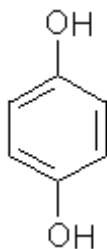
I
фенол
(оксибензол)



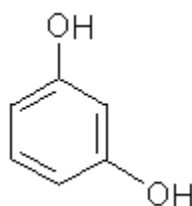
II
орто-изоборнилфенол
(1,7,7-экзотриметил-2-экзо
(2-гидрокси)бицикло[2,2,1]гептан)



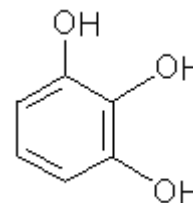
III
ионол
(2,6-ди-трет-бутил-4-
метилфенол)



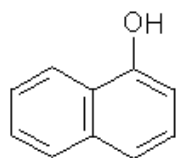
IV
гидрохинон
(1,4-диоксибензол)



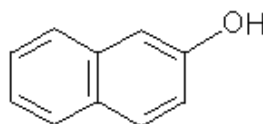
V
резорцин
(1,3-диоксибензол)



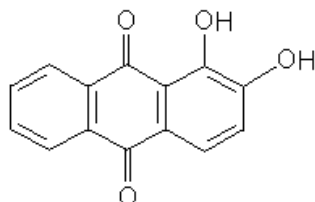
VI
пирогаллол
(1,2,3-триоксибензол)



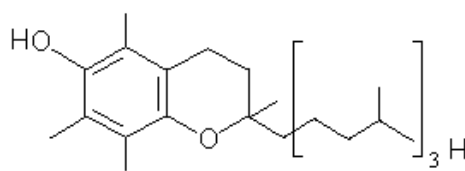
VII
α-нафтол
(1-оксинафталин)



VIII
β-нафтол
(2-оксинафталин)



IX
ализарин
(1,2-диоксиантрахинон)



X
токоферол
(2,5,7,8-тетраметил-2-(4,8,12-триметилтридецил)-6-оксихроман)

В ходе проведенных исследований было однозначно показано, что адсорбция всех производных фенола (I) – (X) приводит к более глубоким разрушениям металла при экспозиции более 14 суток в сравнении с контрольными образцами, вне зависимости от вида микромицета. На рис. 1 в качестве примера приведены гистограммы динамики коррозии при обработке поверхности цинка β-нафтолом (VIII), фенолом (I) и ализарином (IX).

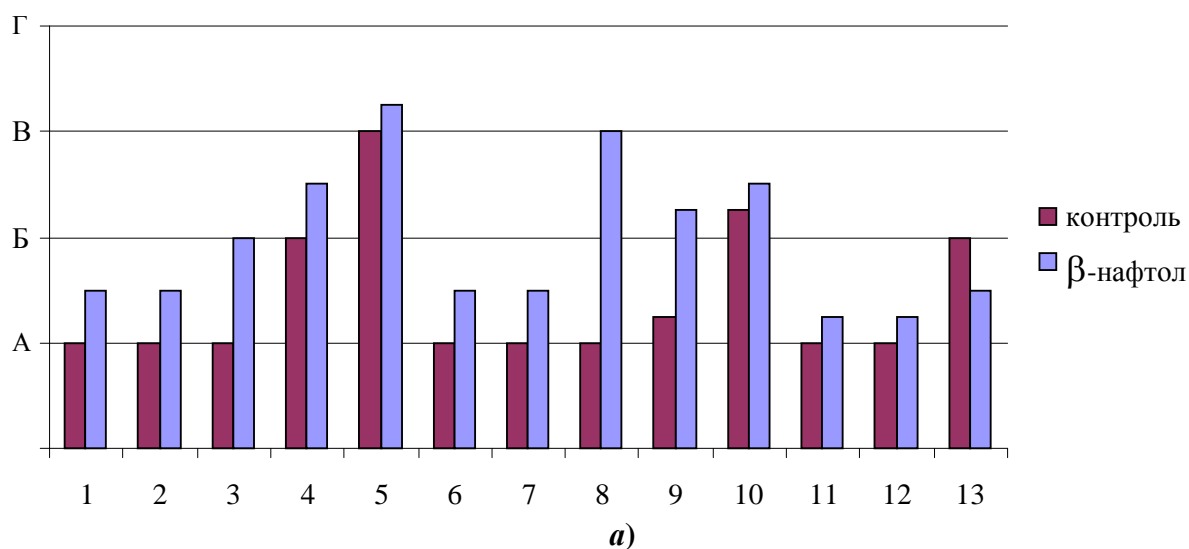


Рис. 1. Гистограммы динамики коррозионного разрушения образцов цинка на трое суток:
a – с адсорбированным β-нафтолом; *б* – с адсорбированным фенолом;
в – с адсорбированным ализарином;

* А – потускнение поверхности металла после появления экссудата в виде прозрачной жидкости, преимущественно с торцов и на гранях металла; Б – образование специфических матовых пятен неправильной формы в местах скопления экссудата; В – гелеобразование, превращение прозрачного экссудата в подвижный полупрозрачный гель, который легко удаляется с поверхности металла; Г – кристаллизация геля с образованием продуктов коррозии оксидной природы; Д – появление специфических по цвету продуктов коррозии металла коричневого и серого оттенков; Е – коррозия металла по всей его поверхности с образованием продуктов коррозии, покрывающих более 50 % его поверхности.

Микромицеты: 1 – *A. niger*; 2 – *Paec. variotii*; 3 – *Trichoderma viride*; 4 – *A. terreus*; 5 – *A. oryzae*; 6 – *P. martensii*; 7 – *Gliocladium roseum*; 8 – *P. brevi-compactum*; 9 – *Fus. moniliforme*; 10 – *P. ochro-chloron*; 11 – *Chaet. Globosum*; 12 – *P. cyclopium*; 13 – *P. chrysogenum*

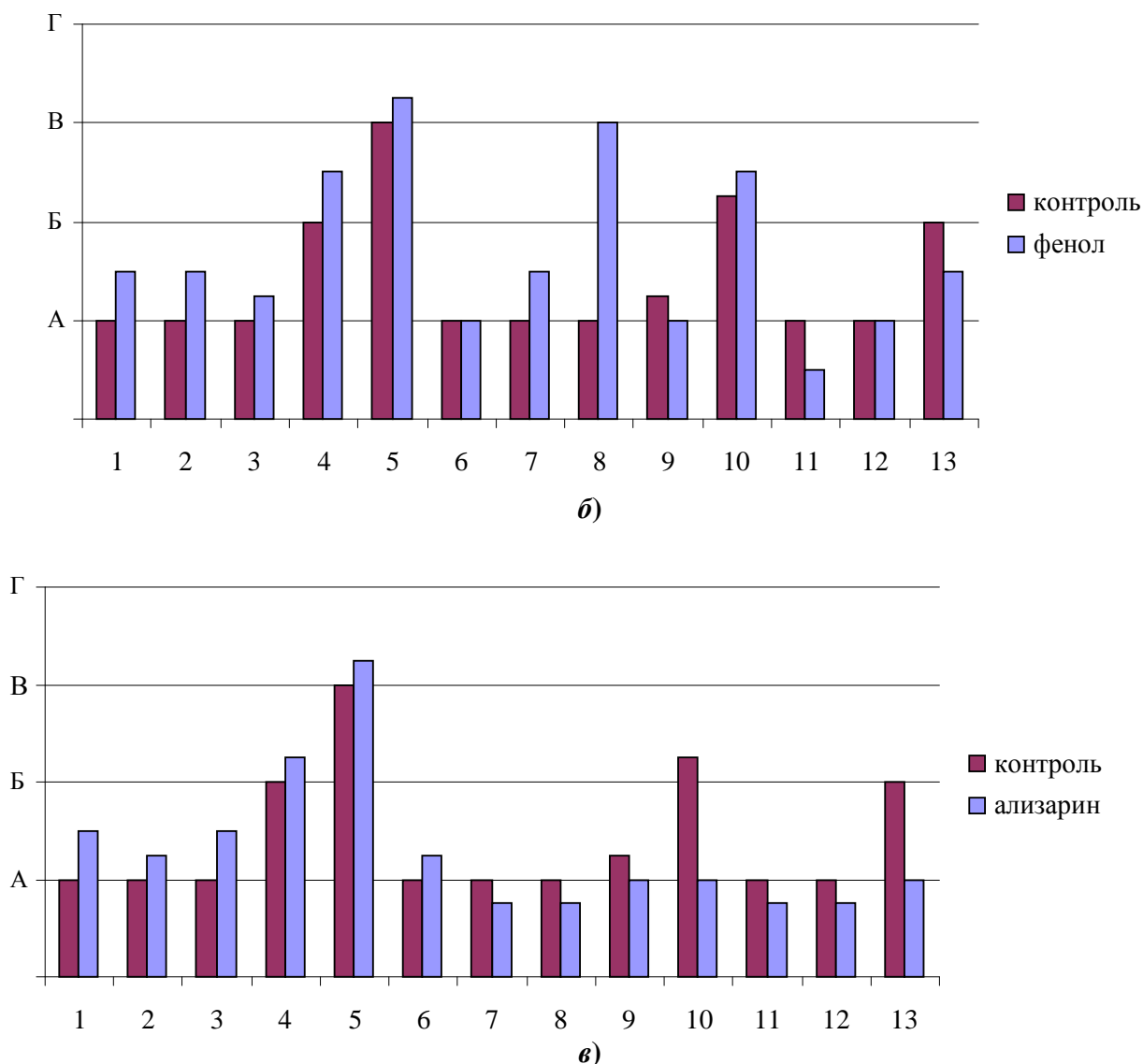


Рис. 1. (окончание)

В предложенной ранее схеме биокоррозии [6, 7] с участием O_2^- показательной, на наш взгляд, является ранняя стадия, когда на поверхности начинается образование жидкого экссудата с $pH > 7$ (для цинка 8,5 – 10,0). Чем раньше с начала экспозиции образуется экссудат, тем активнее микромицеты с точки зрения образования и выделения в окружающую среду АФК при оптимальных для микромицета условий жизнедеятельности.

Как следует, например, из гистограммы, представленной на рис. 1, б, фенол существенно усиливает образование экссудата только при воздействии микромицета *P. brevicompactum*, активацию можно наблюдать для микромицетов *A. oryzae*, *Paec. varioti*, *A. terreus*. Микромицеты *Chaet. globosum*, *P. chrysogenum* ингибируют начало коррозии, остальные микромицеты заметного действия фенола не испытывают.

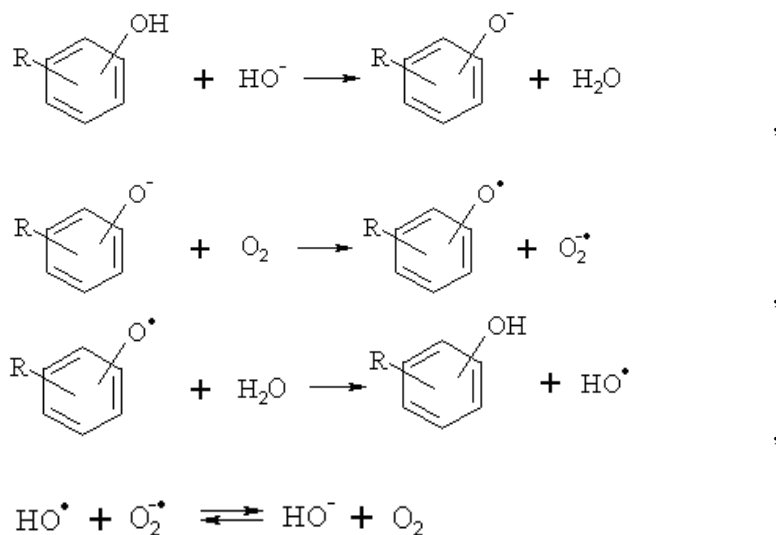
Адсорбция всех соединений исследуемого ряда приводит к усилению коррозии цинка на ранней стадии (3 сут. с начала экспозиции) под воздействием микроскопических грибов (1) – (5); и к ослаблению – под влиянием микромицета (13). В остальных случаях результаты не столь однозначны. Так, ализарин вызывает ингибирование начальной стадии коррозии цинка под воздействием более половины исследуемых микромицетов (7) – (13), а β -нафтол – только у микромицета *P. chrysogenum* (13).

Однако, несмотря на неоднозначность результатов, они не противоречат выдвинутой ранее концепции о влиянии АФК на коррозионный процесс. Для дискуссионного обсужде-

ния может быть представлено следующее предположение – радикальные частицы, в том числе и АФК, которые образуются вследствие химических свойств замещенных фенолов [10], особенно в основной среде экссудата, могут оказывать негативные воздействия не только на поверхность металла, но и на жизнедеятельность микроскопических грибов. Таким образом, возникает система взаимосвязанных процессов.

Метаболические окислительно-восстановительные процессы, процессы в митохондриальной электронно-транспортной цепи приводят к образованию и выделению [3, 4] не нейтрализованных в клетке АФК в окружающую среду; при наличии металла инициируется коррозионный процесс, сопровождающийся увеличением рН.

Выделение $O_2^{\cdot-}$ микромицетами, изменение рН среды, образование на поверхности металла экссудата способствуют развитию радикальных реакций с участием производных фенола, адсорбированных на поверхности. Возникают новые радикальные частицы, в том числе $O_2^{\cdot-}$ [5, 10, 11], концентрация АФК возрастает:



Микромицеты в зависимости от вида по-разному реагируют на изменение концентрации $O_2^{\cdot-}$ в окружающей среде.

В принципе АФК являются токсичными для всех типов клеток. Но можно предположить, что чувствительность и защитные свойства микромицетов от воздействия внешних АФК могут быть разными. В связи с этим, чем эффективнее протекают радикальные процессы адсорбированного производного фенола, тем заметнее может быть ингибирование начальной стадии коррозии в случае чувствительного к АФК микромицета. Например, такое развитие событий можно прогнозировать для *P. chrysogenum* при адсорбции на цинке соединений (I) – (X).

В то же время, можно допустить определенную устойчивость к незначительному изменению внешнего фона АФК таких микромицетов, как: *A. niger*, *Paec. variotii*, *Trichoderma viride*, *A. terreus*, *A. oryzae*, в результате коррозия на ранних стадиях активизируется.

Выводы

1. Показано, что адсорбированные на поверхности цинка фенолы и родственные им соединения усиливают инициирование коррозии под воздействием микроскопических грибов (1) – (5) *A. niger*, *Paec. variotii*, *Trichoderma viride*, *A. terreus*, *A. oryzae* и ослабляют при участии микромицета (13) *P. chrysogenum*.

2. Сделано предположение, что динамика биокоррозии на ранних стадиях связана с реакцией микромицетов на увеличение в окружающей среде АФК, образующихся дополнительно в свободнорадикальных процессах с участием адсорбированных фенолов.

Библиографический список

1. **Остаплюк, А.В.** Влияние грибов на коррозию металлов // Микология и фитопатология. 1970. Т. 4. №2. С. 193–197.
2. **Гесслер, Н.Н.** Активные формы кислорода в регуляции развития грибов (обзор) / Н.Н. Гесслер, А.А. Аверьянов, Т.А. Белозерская // Биохимия. 2007. Т. 72. №10. С. 1342–1364.
3. **Белозерская, Т.А.** Активные формы кислорода и стратегия антиоксидантной защиты у грибов (обзор) / Т.А. Белозерская, Н.Н. Гесслер // Прикладная биохимия и микробиология. 2007. Т. 43. № 5. С. 565–575.
4. **Метелица, Д.И.** Инициирование и ингибирование свободнорадикальных процессов в биохимических пероксидазных системах (обзор) / Д.И. Метелица, Е.И. Карасева // Прикладная биохимия и микробиология. 2007. Т. 43. № 5. С. 537–564.
5. О роли активных форм кислорода в инициировании коррозии металлов микроскопическими грибами / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2009. № 11. С. 43–48.
6. Коррозия алюминия и его сплавов под воздействием микроскопических грибов / Д.В. Белов [и др.] // Коррозия: материалы, защита. 2007. № 9. С. 36–41.
7. **Смирнов, В.Ф.** Микробиологическая коррозия материалов на основе алюминия / В.Ф. Смирнов, Д.В. Белов, Т.Н. Соколова // Прикладная биохимия и микробиология. 2008. Т. 44. № 2. С. 213–218.
8. ГОСТ 9.905-82 ЕСЗКС. Методы коррозионных испытаний. Общие требования. – М.: Стандарт, 1999. – 6 с.
9. ГОСТ 9.048-89 ЕСЗКС. Изделия технические. Методы лабораторных испытаний на стойкость к воздействию плесневых грибов. – М.: Госстандарт, 1989. – 22 с.
10. **Ершов, В.В.** Пространственно-затрудненные фенолы / В.В. Ершов, Г.А. Никифоров, А.А. Володькин. – М.: Химия, 1972. – 352 с.
11. **Nagai, F.** DNA cleavage by metabolites of butylated hydroxytoluene / F. Nagai, K. Ushiyama, I. Kano // Arch. Toxicol. 1993. 67. 552–557.

*Дата поступления
в редакцию 29.03.2010*

D.V. Belov, M.V. Chelnokova, T.N. Sokolova, A.A. Kalinina, V.P. Smirnov, V.R. Kartashov

INFLUENCE OF ADSORBED ON THE SURFACE OF PHENOLS AND RELATED COMPOUNDS ON THE BIOLOGICAL CORROSION OF ZINC

Identified the effects of activating and inhibiting the early stages of corrosion of zinc, which are shown in the participation of phenols and related compounds adsorbed on the metal surface, the formation of exogenous reactive oxygen species.

Key words: reactive oxygen species (ROS), biological corrosion of metals, microscopic fungi, phenols, superoxidation radical.

УДК 547.789.6

А. В. Борисов¹, Ж. В. Мацулевич¹, В. К. Османов¹, Г. Н. Борисова¹,
Г. К. Фукин², В. А. Коршунова¹

НОВОЕ НАПРАВЛЕНИЕ РЕАКЦИЙ ДИОРГАНИЛДИСУЛЬФИДОВ С АЛКЕНАМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Институт металлоорганической химии им. Г. А. Разуваева РАН²

Реакции дигетарилдисульфидов (HetS)₂, где Het = 8-хинолил, 1,3-бензотиазол-2-ил, 4,6-диметил-2-пиримидил и 4,6-диметил-3-циано-2-пиридил, с норборненом в метиленхлориде в присутствии пентахлорида сурьмы приводят к образованию продуктов циклоприсоединения серосодержащего электрофила с замыканием цикла атомом азота тиогетарильного фрагмента.

Ключевые слова: диорганилдисульфиды, алкены, циклоприсоединение.

Важнейшее значение среди синтетических подходов к гетероциклическим системам приобрели реакции циклоприсоединения по кратным связям углерод-углерод и углерод-гетероатом – 1,3-диполярное циклоприсоединение, гетерореакция Дильса-Альдера, [2+2]-циклоприсоединение [1,2].

В последние годы при конструировании гетероциклических соединений широко используется циклообразование в реакциях непредельных соединений с электрофильными реагентами с замыканием цикла нуклеофильно активным фрагментом непредельного субстрата [3-7]. Примеры циклообразования такого типа весьма многочисленны, а в замыкании цикла могут участвовать различные электронодонорные центры – атомы кислорода, азота, серы и др., включенные в функциональную группу непредельного соединения. Альтернативный же вариант циклообразования в реакциях электрофильного присоединения по кратным связям, в котором в роли нуклеофильного партнера участвуют фрагменты исходного электрофила, так называемое "катионное полярное циклоприсоединение" [8,9], оказался исследованным в значительно меньшей степени, что связано с довольно ограниченным ассортиментом подходящих реагентов.

Как показано в наших работах, значительный интерес в плане реализации рассматриваемого альтернативного варианта синтеза гетероциклов представляют гетаренсульфенилхлориды, содержащие в гетарильном фрагменте потенциально нуклеофильные центры [10-16]. Нами синтезирован ряд новых гетаренсульфенилхлоридов – производных пиридина, пиримидина, хинолина, 1,3-бензотиазола и N-оксида пиридина; изучены их реакции с некоторыми непредельными соединениями; найдены условия, при которых происходят тандемные процессы присоединения – циклизации с замыканием цикла атомом азота или кислорода сульфенильного фрагмента; продемонстрированы эффективность и синтетические возможности предложенного подхода к синтезу N,S- и N,O,S-содержащих гетероциклов.

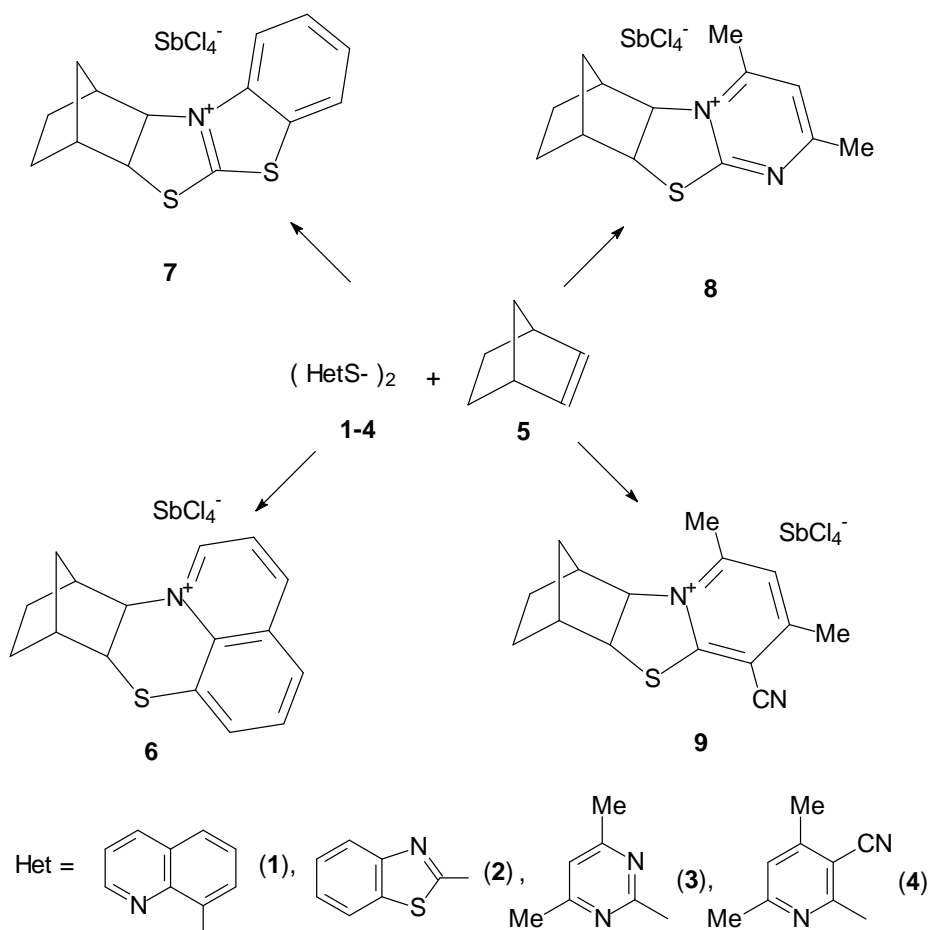
В настоящей работе в качестве потенциальных реагентов гетероциклизации использовались дигетарилдисульфиды (**1-4**), применявшиеся ранее нами как исходные соединения для получения уже указанных гетаренсульфенилхлоридов. Мы полагали, что вовлечение в процесс гетероциклизации непосредственно дигетарилдисульфидов позволит исключить одну из промежуточных стадий и таким образом упростить процедуру синтеза целевых гетероциклов. С другой стороны, решение данной задачи представляло, на наш взгляд, и значительный самостоятельный интерес, поскольку повышало синтетический потенциал реакций диорганилдисульфидов с алкенами в целом. Как известно, диорганилдисульфиды в обычных условиях вообще не реагируют с алкенами. Активация диорганилдисульфидов достигается действием на них кислот Льюиса – солей олова, железа, лития и др. [17-20], а также различ-

ных металлокомплексов [21, 22]. Указанные активирующие добавки стимулируют присоединение диарил- и диалкилдисульфидов к алкенам обычно с образованием продуктов дисульфенилирования – вицинальных дитиоэфиров. Так, в присутствии рутениевых комплексов дифенилдисульфид реагирует с алкенами, в том числе и норборненом, с образованием 1,2-бисорганилсульфидов [21]. Известны также примеры, когда при взаимодействии диорганилдисульфидов с непредельными соединениями в условиях активации кислотами Льюиса образуются продукты сопряженного присоединения или внутримолекулярной циклизации за счет нуклеофильного участия функциональных групп исходного непредельного субстрата [23, 24].

В качестве модельного субстрата в работе использовался норборнен (**5**), а кислоты Льюиса – пентахлорид сурьмы.

Мы установили, что при взаимодействии дигетарилдисульфидов (**1-4**) с алкеном **5** в метилхлориде в присутствии пентахлорида сурьмы при 0 °С реализуется принципиально новое для реакций диорганилдисульфидов с алкенами направление. В этих условиях образуются продукты аннелирования норборнанового остова – полициклические системы **6-9** с выходами 85, 81, 83 и 87% соответственно (схема 1).

Схема 1



Строение полученных соединений доказано методами спектроскопии ЯМР ^1H и ^{13}C , ИК спектроскопии и подтверждено данными элементного анализа. Отнесение сигналов в спектрах ЯМР проводилось с использованием экспериментов COSY, HSQC, HMBC и NOESY. В спектрах ЯМР ^1H соединений **6-9** протоны фрагментов CHS и CHN^+ проявляются в виде дублетов с $\text{KCCB } ^3J = 8,0-8,3$ Гц. Такой характер сигналов, в соответствии с литературными данными [25], свидетельствует об эндорасположении указанных атомов водорода.

Молекулярное строение соединения **6** доказано методом РСА (рис. 1). Длины связей и валентные углы в соединении **6** (табл. 1) имеют ожидаемые значения [26].

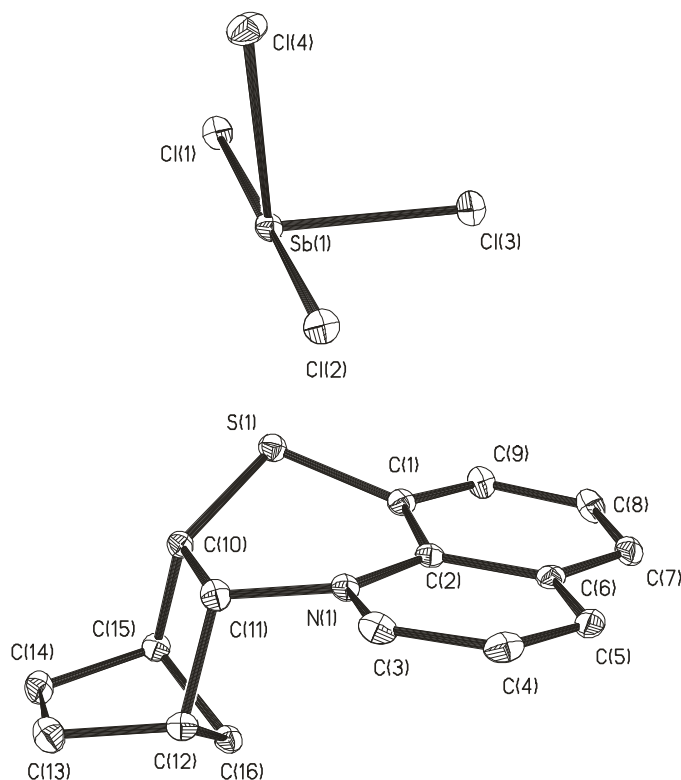


Рис. 1. Строение соединения **6** (атомы водорода не показаны).
Тепловые эллипсоиды приведены с вероятностью 30%

Таблица 1

Длины связей d и валентные углы ω в молекуле соединения **6**

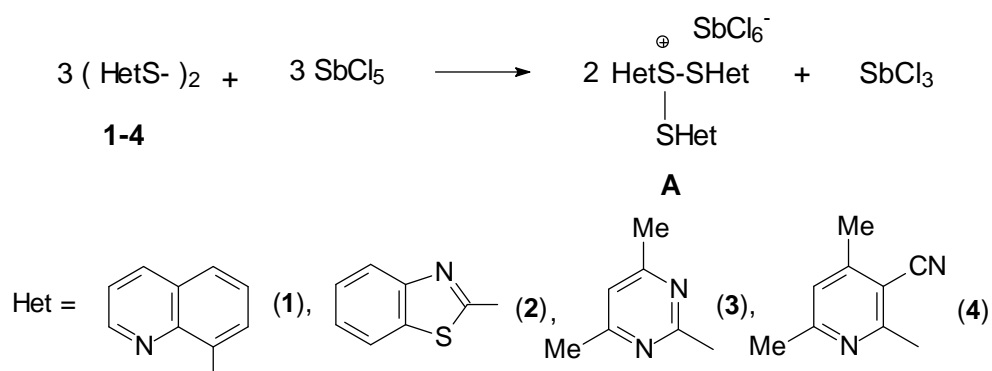
Связь	d ,	Угол	ω , град.
1	2	3	4
Sb(1)-Cl(4)	2.400(8)	Cl(4)-Sb(1)-Cl(3)	96.07(3)
Sb(1)-Cl(3)	2.406(9)	Cl(4)-Sb(1)-Cl(2)	90.10(3)
Sb(1)-Cl(2)	2.557(8)	Cl(3)-Sb(1)-Cl(2)	90.88(3)
Sb(1)-Cl(1)	2.697(8)	Cl(4)-Sb(1)-Cl(1)	88.15(3)
S(1)-C(1)	1.744(3)	Cl(3)-Sb(1)-Cl(1)	90.30(3)
S(1)-C(10)	1.795(3)	Cl(2)-Sb(1)-Cl(1)	177.98(3)
N(1)-C(3)	1.338(4)	C(1)-S(1)-C(10)	101.26(15)
N(1)-C(2)	1.380(4)	C(3)-N(1)-C(2)	119.9(3)
N(1)-C(11)	1.506(4)	C(3)-N(1)-C(11)	114.7(3)
C(1)-C(9)	1.379(5)	C(2)-N(1)-C(11)	125.2(3)
C(1)-C(2)	1.418(4)	C(9)-C(1)-C(2)	119.4(3)
C(2)-C(6)	1.429(4)	C(9)-C(1)-S(1)	117.9(2)
C(3)-C(4)	1.385(5)	C(2)-C(1)-S(1)	122.0(2)
C(4)-C(5)	1.359(5)	N(1)-C(2)-C(1)	122.4(3)
C(5)-C(6)	1.414(4)	N(1)-C(2)-C(6)	118.9(3)
C(6)-C(7)	1.406(5)	C(1)-C(2)-C(6)	118.7(3)
C(7)-C(8)	1.371(5)	N(1)-C(3)-C(4)	122.8(3)
C(8)-C(9)	1.401(5)	C(5)-C(4)-C(3)	119.3(3)
C(10)-C(11)	1.548(4)	C(4)-C(5)-C(6)	120.0(3)
C(10)-C(15)	1.550(4)	C(7)-C(6)-C(5)	121.7(3)
C(11)-C(12)	1.543(4)	C(7)-C(6)-C(2)	119.7(3)

Окончание табл. 1

1	2	3	4
C(12)-C(16)	1.533(4)	C(5)-C(6)-C(2)	118.6(3)
C(12)-C(13)	1.534(5)	C(8)-C(7)-C(6)	120.5(3)
C(13)-C(14)	1.558(5)	C(7)-C(8)-C(9)	120.0(3)
C(14)-C(15)	1.519(5)	C(1)-C(9)-C(8)	121.5(3)
C(15)-C(16)	1.531(5)	C(11)-C(10)-C(15)	104.2(2)
		C(11)-C(10)-S(1)	116.7(2)
		C(15)-C(10)-S(1)	115.3(2)
		N(1)-C(11)-C(12)	108.7(3)
		N(1)-C(11)-C(10)	117.8(3)
		C(12)-C(11)-C(10)	101.2(2)
		C(16)-C(12)-C(13)	102.7(3)
		C(16)-C(12)-C(11)	100.7(3)
		C(13)-C(12)-C(11)	108.5(3)
		C(12)-C(13)-C(14)	103.5(3)
		C(15)-C(14)-C(13)	102.2(3)
		C(14)-C(15)-C(16)	101.5(3)
		C(14)-C(15)-C(10)	106.2(3)
		C(16)-C(15)-C(10)	102.6(2)
		C(15)-C(16)-C(12)	94.2(2)

На основании полученных результатов можно сделать определенные суждения о схеме образования сера-, азотсодержащих гетероциклов при действии на норборнен системы диорганилдисульфид – пентахлорид сурьмы. Очевидно, что в результате взаимодействия диорганилдисульфидов (1-4) с пентахлоридом сурьмы генерируются новые электрофильные реагенты. С учетом литературных данных строение таких реагентов можно представить в виде структур типа (А) [27, 28] (схема 2).

Схема 2



Генерируемые таким образом S-центрированные электрофилы типа А далее вступают в Ad_E -реакции с алкеном 5, в результате которых и образуются продукты тандемной реакции присоединения – циклизации с замыканием цикла атомом азота тиогетарильного фрагмента.

Экспериментальная часть

Спектры ЯМР ^1H и ^{13}C получены на спектрометре «Bruker Avance-600» (рабочая частота 500 и 150 МГц соответственно) в ДМСО- d_6 . ИК спектры регистрировали на приборе «Shimadzu IR-Prestige 21» в таблетках KBr.

Взаимодействие норборнена с дигетарилдисульфидами 1-4 в присутствии пентахлорида сурьмы (общая методика). К раствору 15 ммоль дисульфида **1-4** в 200 мл метиленхлорида при 0 °С прибавляли раствор 15 ммоль SbCl_5 в 50 мл метиленхлорида и раствор 0,94 г (10 ммоль) алкена **5** в 20 мл метиленхлорида. Через 24 ч отфильтровывали образовавшийся осадок соединения **6-9**, который перекристаллизовывали из метиленхлорида.

Тетрахлорантимонит 8-тиа-1-азонийпентацикло[7.7.1.1^{3,6}.0^{2,7}.0^{13,17}]октадека-1(17),9,11,13,15-пентаена (6). Кристаллы оранжевого цвета, т.пл. 163-165 °С. Найдено (%): С, 36.96; Н, 3.04. $\text{C}_{16}\text{H}_{16}\text{Cl}_4\text{NSSb}$. Вычислено (%): С, 37.11; Н, 3.11. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1655, 1577, 1552, 1382, 1300, 842. Спектр ЯМР ^1H (δ , м. д., $J/\text{Гц}$): 1.40, 1.51 (оба м, по 1 Н, Н(5)); 1.46 (д, 1 Н, Н(18_{syn}), $J = 10.4$); 1.68 (м, 2 Н, Н(4)); 1.83 (д, 1 Н, Н(18_{anti}), $J = 10.4$); 2.53 (уш. с, 1 Н, Н(6)); 2.57 (уш. с, 1 Н, Н(3)); 3.96 (д, 1 Н, Н(7), $J = 8.0$); 5.45 (д, 1 Н, Н(2), $J = 8.0$); 8.03 (т, 1 Н, Н(11), $J = 8.0$); 8.21 (м, 1 Н, Н(15)); 8.20 (д, 1 Н, Н(12), $J = 9.0$); 8.28 (д, 1 Н, Н(10), $J = 8.2$); 9.28 (д, 1 Н, Н(14), $J = 9.4$); 9.78 (д, 1 Н, Н(16), $J = 5.4$).

Тетрахлорантимонит 10,12-дитиа-3-азонийпентацикло[12.2.1.0^{2,13}.0^{2,7}.0^{3,11}.0^{4,9}]гептадека-3(11),4(9),5,7-тетраена (7). Кристаллы желтого цвета, т.пл. 187-189 °С. Найдено (%): С, 35.98; Н, 2.62. $\text{C}_{14}\text{H}_{14}\text{Cl}_4\text{NS}_2\text{Sb}$. Вычислено (%): С, 32.09; Н, 2.69. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 2235, 1645, 1465, 1388, 1255, 775. Спектр ЯМР ^1H (δ , м. д., $J/\text{Гц}$): 1.39, 1.61 (оба м, по 1 Н, Н(15)); 1.44 (д, 1 Н, Н(17_{syn}), $J = 10.3$); 1.65 (м, 2 Н, Н(4)); 1.74 (д, 1 Н, Н(17_{anti}), $J = 10.3$); 2.68 (уш. с, 1 Н, Н(14)); 3.05 (уш. с, 1 Н, Н(1)); 4.72 (д, 1 Н, Н(13), $J = 8.1$); 5.25 (д, 1 Н, Н(2), $J = 8.1$); 7.36 (д, 1 Н, Н(8), $J = 8.6$); 7.57 (т, 1 Н, Н(7), $J = 8.0$); 8.07 (т, 1 Н, Н(6), $J = 8.0$); 8.25 (д, 1 Н, Н(5), $J = 7.6$).

Тетрахлорантимонит 4,6-диметил-9-тиа-3-азоний-7-азатетрацикло[9.2.1.0^{2,10}.0^{3,8}]тетрадека-3(8),4,6-триена (8). Кристаллы оранжевого цвета, т.пл. 159-161 °С. Найдено (%): С, 31.36; Н, 3.38. $\text{C}_{13}\text{H}_{17}\text{Cl}_4\text{N}_2\text{SSb}$. Вычислено (%): С, 31.42; Н, 3.45. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1634, 1537, 1463, 1375, 1282. Спектр ЯМР ^1H (δ , м. д., $J/\text{Гц}$): 1.40, 1.56 (оба м, по 1 Н, Н(12)); 1.46 (д, 1 Н, Н(14_{syn}), $J = 11.5$); 1.65 (м, 2 Н, Н(13)); 1.86 (д, 1 Н, Н(14_{anti}), $J = 11.5$); 2.55 (уш. с, 1 Н, Н(11)); 2.57, 2.76 (оба с, по 3 Н, 2CH_3); 2.88 (уш. с, 1 Н, Н(1)); 4.26 (д, 1 Н, Н(10), $J = 8.1$); 5.23 (д, 1 Н, Н(2), $J = 8.1$); 7.62 (с, 1 Н, Н(5)). Спектр ЯМР ^{13}C (δ , м. д.): 19.82 (CH_3); 24.10 (CH_3); 25.10 (C^{12}); 26.34 (C^{13}); 32.73 (C^{14}); 43.40 (C^{11}); 44.21 (C^1); 48.74 (C^{10}); 74.45 (C^2); 119.07, 161.42, 170.82, 174.93 (C^{Het}).

Тетрахлорантимонит 7-циано-4,6-диметил-9-тиа-3-азоний тетрацикло[9.2.1.0^{2,10}.0^{3,8}]тетрадека-3(8),4,6-триена (9). Кристаллы желтого цвета, т.пл. 172-173 °С. Найдено (%): С, 34.52; Н, 3.24. $\text{C}_{15}\text{H}_{17}\text{Cl}_4\text{N}_2\text{SSb}$. Вычислено (%): С, 34.58; Н, 3.29. ИК спектр, ν , cm^{-1} : 1642, 1575, 1480, 1390, 1255. Спектр ЯМР ^1H (δ , м. д., $J/\text{Гц}$): 1.39, 1.54 (оба м, по 1 Н, Н(12)); 1.45 (д, 1 Н, Н(14_{syn}), $J = 11.4$); 1.65 (м, 2 Н, Н(13)); 1.86 (д, 1 Н, Н(14_{anti}), $J = 11.4$); 2.54 (уш. с, 1 Н, Н(11)); 2.56, 2.76 (оба с, по 3 Н, 2CH_3); 2.87 (уш. с, 1 Н, Н(1)); 4.26 (д, 1 Н, Н(10), $J = 8.3$); 5.29 (д, 1 Н, Н(2), $J = 8.3$); 7.76 (с, 1 Н, Н(5)). Спектр ЯМР ^{13}C (δ , м. д.): 21.26 (CH_3); 21.49 (CH_3); 26.02 (C^{12}); 27.04 (C^{13}); 33.66 (C^{14}); 44.45 (C^{11}); 45.50 (C^1); 53.34 (C^{10}); 80.67 (C^2); 113.02 (CN); 105.04, 126.97, 157.68, 160.52, 162.67 (C^{Het}).

Рентгеноструктурное исследование соединения 6. Экспериментальные наборы интенсивностей измеряли на автоматическом дифрактометре Smart APEX (графитовый монохроматор, Mo-K_α излучение, ω - θ сканирование). Структуры решены прямым методом и уточнены методом наименьших квадратов по F^2_{hkl} в анизотропном приближении для всех неводородных атомов. Водородные атомы найдены из разностного синтеза Фурье и уточнены изотропно. Все расчеты проведены с использованием программного комплекса SHELXTL v.6.12 [29]. Кристаллы $\text{C}_{16}\text{H}_{16}\text{Cl}_4\text{NSSb}$ при температуре 100 К моноклинные, $a = 9.7599(5)$, $b = 10.1019(6)$, $c = 18.9310(10)$ Å, $\beta = 95.1380(10)^\circ$, $V = 1858.97(18)$ Å³, $Z = 4$, пространственная группа $P2(1)/c$, $d_{\text{расч}} = 1.850$ г/см³, $\mu = 2.168$ мм⁻¹, $2.10 \leq \theta \leq 26.0^\circ$, измерено 15315 отражений, из них 3640 отражений [$R_{\text{int}} = 0.0400$] независимых, $GOOF = 1.013$, $R_1 = 0.0360$, $wR_2 = 0.0847$ ($I > 2\sigma(I)$), $R_1 = 0.0488$, $wR_2 = 0.0889$ (по всем данным), остаточная электронная плотность 1.947 / -1.334 е.Å⁻³.

Библиографический список

1. **Джилкрист, Т.** Химия гетероциклических соединений / Т. Джилкрист. – М.: Мир, 1996. – 464 с.
2. **Джоуль, Дж.** Химия гетероциклических соединений / Дж. Джоуль, К. Миллс. – М.: Мир, 2004. – 728 с.
3. **Геваза, Ю.И.** Электрофильная внутримолекулярная циклизация олефинов / Ю.И. Геваза, В.И. Станинец, Н.С. Зефиоров. – Киев: Наукова думка. – 1990. – 156 с.
4. **Литвинов, В.П.** Химия тиенопиридинов и родственных систем / В.П. Литвинов, В.В. Доценко, С.Г. Кривоколыско. – Москва: Наука. 2006. – 407 с.
5. **Robin, S.** Electrophilic cyclization of unsaturated amides / S. Robin, G. Rousseau // *Tetrahedron*. - 1998. - V. 54. - P. 13681-13736.
6. **Li, Ch.-Le** Synthesis of heterocyclic and carbocyclic compounds via alkynyl, allyl, and propargyl organometallics of cyclopentadienyl iron, molybdenum, and tungsten complexes / Ch.-Le Li, R.-Sh. Liu // *Chem. Rev.* 2000. V. 100. № 8. - P. 3127-3161.
7. Halo- and selenolactonisation: the two major strategies for cyclofunctionalisation / S. Ranganathan [at al.] // *Tetrahedron*. 2004. V. 60. - P. 5273-5308.
8. **Schmidt, R.R.** Polar cycloadditions / R.R. Schmidt // *Angew. Chem. Internat. Edit.* 1973. V. 12. № 3. - P. 212-224.
9. **Bradsher, C.K.** Cationic polar cycloaddition / C.K. Bradsher // *Advances in Heterocyclic Chemistry*. 1974. V. 16. - P. 289-325.
10. Сульфенилгалогениды в синтезе гетероциклов. 1. Гетероциклизация в реакциях 1-фенил-5-тетразолилсульфенилхлорида с арилолефинами / А.В. Борисов [и др.] // *Химия гетероцикл. соединений*. 2001. № 6. С. 763-767.
11. Сульфенилгалогениды в синтезе гетероциклов. 2. Циклизация в реакциях гетаренсульфенилхлоридов с 3,3- диметил-1-бутеном / А.В. Борисов [и др.] // *Химия гетероцикл. соединений*. 2005. № 6. С. 893-900.
12. Аннелирование норборненового остова в реакциях гетарен-сульфенилхлоридов с норборнадиеном / А.В. Борисов [и др.] // *Химия гетероцикл. соединений*. 2005. № 6. С. 925-927.
13. Новое направление сульфенилирования диметилового эфира бицикло[2.2.2]окт-5-ен-эндо-2,эндо-3-дикарбоновой кислоты / В.К. Османов [и др.] // *Изв. АН. Сер. химическая*. 2008. № 12. С. 2552-2553.
14. Synthesis of condensed sulfur- and nitrogen-containing heterocycles *via* polar cycloaddition of heterarene sulfonyl chlorides to a C-C multiple bond / A.V. Borisov [at al.] // *Mendeleev Comm.* 2009. № 1. - P. 49-51.
15. **Османов, В.К.** Особенности реакции 3,4-дигидро-2*H*-пирана с 2-хлорсульфенил-1-пиридин-1-оксидом / В.К. Османов, Г. К. Фукин, А. В. Борисов // *Изв. АН. Сер. химическая*. 2009. № 3. С. 633-635.
16. **Османов, В.К.** Каскадная гетероциклизация в реакции тетрафторбензобаррелена с 3-метоксикарбонил-2-пиридинсульфенилхлоридом / В.К. Османов [и др.] // *Изв. АН. Сер. химическая*. - 2009.- № 3.- С. 637-638.
17. **Caserio, M. C.** Boron trifluoride catalized addition of disulfides to alkenes / M. C. Caserio, C. L. Fisher, J. K. Kim // *J. Org. Chem.* 1985. V. 50. - P. 4390-4393.
18. **Бодриков, И.В.** Реакция диметилдисульфида со стиролом / И.В. Бодриков, Л.И. Ковалева, Н.С. Зефиоров // *ЖОрХ*. 1976. Т. 12. № 11. С. 2476-2477.
19. **Мартынов, А.В.** Стереоселективное присоединение диорганилдихалькогенидов к циклогексену при катализе хлорным оловом / А.В. Мартынов, А.Р. Жинкин, С.В. Амосова // *ЖОрХ*. - 2006. Т. 42. № 2. С. 207-209.
20. **Yamagiwa, N.** Convenient method for the addition of disulfides to alkenes / N. Yamagiwa, Y. Suto, Y. Torisawa // *Bioorg. Med. Chem. Lett.* 2007. № 17. - P. 6197-6201.
21. First transition-metal complex catalized addition of organic disulfides to alkenes enables the rapid synthesis of vicinal-dithioethers / T. Kondo [at al.] // *J. Am. Chem. Soc.* 1999. V. 121. № 2. - P. 482-483.
22. **Ananikov, V.P.** Palladium-catalized addition of disulfides and diselenides to alkynes under solvent free conditions / V.P. Ananikov, I.P. Beletskaya // *Org. Biomol. Chem.* 2004. V. 2. - P. 284-287.
23. **Trost, B.M.** Hydroxysulfenylation of olefins. An olefin cleavage with functional group differentiation / B.M. Trost, M. Ochiai, P.G. McDougal // *J. Am. Chem. Soc.* 1978. V. 100. № 22. - P. 7103-7106.

24. **Abd El Samii, Z.** Regioselective hydroxysulfenylation of derivatives of allylic alcohols and amines / Z. Abd El Samii, M. Al Ashmawy, J.M. Mellor // Tetrahedron Letters. 1986. V. 27. № 43. - P. 5289-5292.
25. **Barraclough, D.** Studies in norbornene series. Part I. Elucidation of the structure of norbornene derivatives by use of the nuclear magnetic resonance shift reagent trisdipivaloyl-methanatoeuropium (III), the nuclear Overhauser effect and mass spectrometry / D. Barraclough, J.S. Oakland, F.J. Scheinmann // J. Chem. Soc. Perkin Trans. I. 1972. № 12. - P. 1500-1506.
26. Tables of bond lengths determined by X-ray and neutron diffraction. Part 1. Bond lengths in organic compounds / F.H. Allen [at al.] // J. Chem. Soc. Perkin Trans. 2. 1987.- P. 1-18.
27. **Weiss, R.** A convenient synthesis of methyl-bis-[methylthio]sulfonium hexachlor antimonate / R. Weiss, C. Schlierf // Synthesis. 1976. № 5. - P. 323-324.
28. **Laitinen, R.** The crystal structures of the hexachloroantimonate salts of $(\text{CH}_3)_2\text{SS}(\text{CH}_3)^+$, $(\text{CH}_3\text{S})_3^+$ and $(\text{CH}_3\text{Se})_3^+$ / R. Laitinen, R. Steudel, R. Weiss // J. Chem. Soc. Dalton Trans. 1986. - P. 1095-1100.
29. **Sheldrick, G.M.**, SHELXTL. V. 6.12, Structure Determination Software Suite, Bruker AXS, Madison, Wisconsin, USA. 2000.

*Дата поступления
в редакцию 20.04.2010*

**A.V. Borisov, Zh.V. Matsulevich, V.K. Osmanov, G.N. Borisova,
G.K. Fukin, V.A. Korshunova**

NEW DIRECTION OF REACTIONS OF ORGANYLDISULFIDES WITH ALKENES

The reactions of diorganyl disulfides $(\text{HetS})_2$, where Het = 8-quinolyl, 1,3-benzothiazolyl-2, 4,6-dimethyl-2-pyrimidyl and 3-cyano-4,6-dimethyl-2-pyridyl, with norbornene in methylenchloride in the presence of antimonium pentachloride lead to the formation of products cycloaddition of sulfur-containing electrophile with the ring closure by the nitrogen atom of the thiohetaryl fragment.

Key words: diorganyl disulfides, alkenes, cycloaddition.

УДК 621.791.3

В.В. Рогожин¹, А.Н. Москвичев², М.Г. Михаленко¹**ИССЛЕДОВАНИЕ КАТОДНОЙ СТАДИИ ПРОЦЕССА ЭЛЕКТРООСАЖДЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НИКЕЛЬ-БОР ИЗ ЭЛЕКТРОЛИТОВ С ДОБАВКОЙ ДОДЕКА-КЛОЗО-ДОДЕКАБОРАТА КАЛИЯ ($K_2V_{12}H_{12}$)**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Институт машиноведения им.А.А. Благоднарова РАН (Нижегородский филиал)²

Исследовано влияние добавки $K_2V_{12}H_{12}$ на катодную стадию процесса электроосаждения покрытий никель-бор. Показано, что включение бора происходит по химико-каталитическому механизму, при этом электроосаждение никеля осложняется диффузионными ограничениями, возможно связанными с формированием борсодержащего комплекса.

Ключевые слова: электроосаждение, покрытия никель-бор.

Добавка полиэдрического бората (ПЭБ) $K_2V_{12}H_{12}$ является аналогом дикарбаундекабората калия ($KC_2V_9H_{12}$) и декагидродекабората натрия -ДГБН ($Na_2V_{10}H_{10}$), которые используются при электроосаждении покрытий никель-бор.

Додека-клозо-додекабораты считаются наиболее устойчивыми из-за симметричного строения бороводородного каркаса аниона [1], что делает их весьма перспективными в технологиях электроосаждения сплавов никель-бор. Однако меньшая реакционная способность такой добавки требует достаточно больших ее количеств в электролите никелирования.

Процесс получения электролитического сплава металл – неметалл является весьма сложным, сопровождается рядом параллельных электрохимических и химических реакций, которые проходят в условиях адсорбции как исходных борсодержащих веществ, так и продуктов их разложения. Эти явления заметно осложняют катодную стадию процесса электроосаждения.

Для исследования катодной стадии процесса осаждения покрытий никель-бор были использованы методы хроновольтамперометрии, вращающегося дискового электрода (ВДЭ), метод снятия потенциостатических зависимостей и импедансные измерения [2].

Электроосаждение покрытий никель-бор с добавкой $K_2V_{12}H_{12}$ проводилось в стандартном сульфатном электролите никелирования при pH = 4,0-4,5 и температуре 40-45 °С.

Включение бора в никелевое покрытие при электроосаждении происходит за счет гетерогенной каталитической реакции распада борсодержащего соединения на свежесаженной поверхности катализатора – никеля [3-5] и зависит как от концентрации добавки, так и от применяемой плотности тока (рис. 1).

Характерной особенностью для электролитов с $K_2V_{12}H_{12}$ является наличие на поляризационных кривых (рис.2) в рабочей области плотностей тока перегибов при концентрации добавки в электролите 1,5÷2,5 г/л в интервале потенциалов 0,6-0,65 В по НВЭ, возможно связанных с появлением предельного тока. На поляризационных кривых в растворах с другими борсодержащими добавками появление предельного тока не наблюдается.

Поляризационные кривые прямого и обратного хода в электролите с добавкой $K_2V_{12}H_{12}$ не совпадают, при этом на кривой обратного хода перегиб отсутствует. Превышение токов кривой обратного хода над кривой прямого может свидетельствовать о необратимой адсорбции добавки при электроотрицательных потенциалах с облегчением процесса восстановления ионов никеля при обратном ходе кривых.

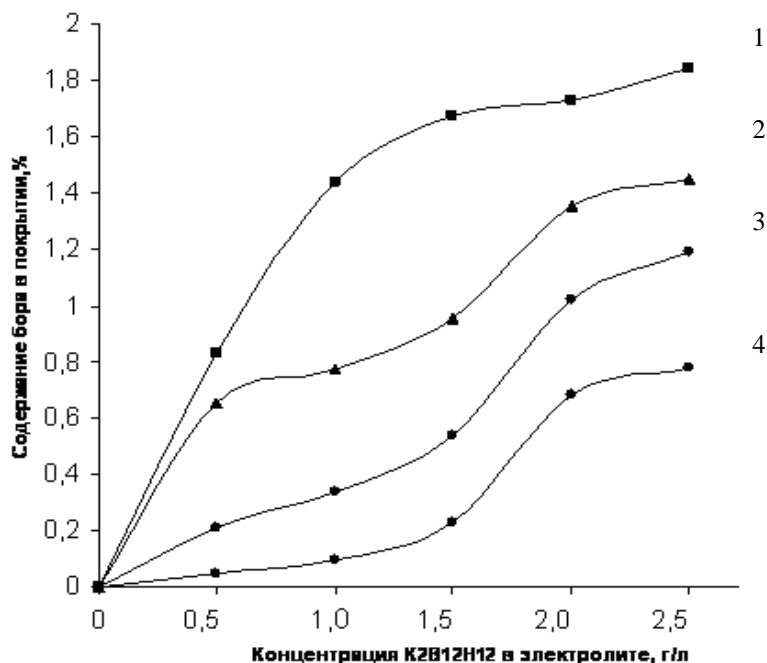


Рис. 1. Зависимость содержания бора от концентрации борсодержащей добавки при плотностях тока, А/дм²:
1 - 0,5; 2 - 1,0; 3 - 2,0; 4 - 4,0

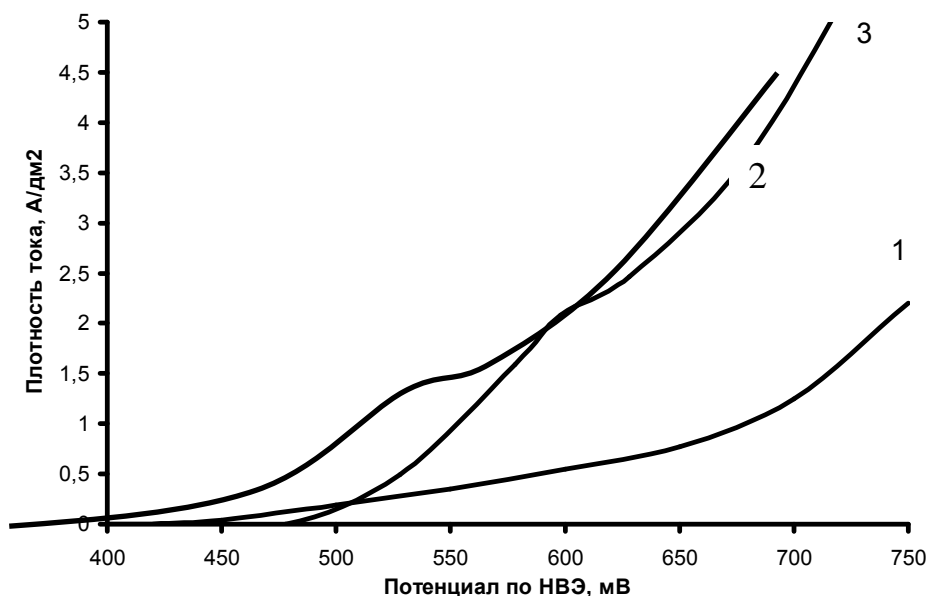


Рис. 2. Влияние концентрации $K_2B_{12}H_{12}$ на катодный процесс.
Концентрация $K_2B_{12}H_{12}$, г/л:
1 - 0; 2 - 2,0; 3 - 2,5

Пересчёт быстрых поляризационных кривых, снятых при различных скоростях развертки потенциала, из координат плотность тока (j) – потенциал (E), в координаты $Q=f(U)$, где U – скорость развертки потенциала, позволил определить количество электричества (Q), которое затрачивается при гистерезисе прямого и обратного хода поляризационных кривых. Через эту величину можно косвенно оценить количество адсорбированного вещества, участвующего в электродном процессе. Численное значение Q стабилизируется при скоростях развертки потенциала $U=8-20$ мВ/с, когда в этих условиях устраняется влияние диффузион-

ных процессов. При увеличении концентрации добавки $K_2V_{12}H_{12}$ пропорционально увеличивается и количество затраченного электричества с сохранением отношения этих величин около 0.01 моль/кул. Это может свидетельствовать о том, что при значительных рабочих концентрациях $K_2V_{12}H_{12}$ в электродных превращениях участвует примерно одно и то же количество борсодержащей добавки, а разряд ионов никеля идёт через борсодержащую плёнку при 100%-ном заполнении ею катодной поверхности.

Величина предельного тока возрастает с увеличением концентрации $K_2V_{12}H_{12}$ и температуры (рис. 3), что может быть связано с замедленностью концентрационных стадий процесса электроосаждения покрытий никель-бор в присутствии $K_2V_{12}H_{12}$.

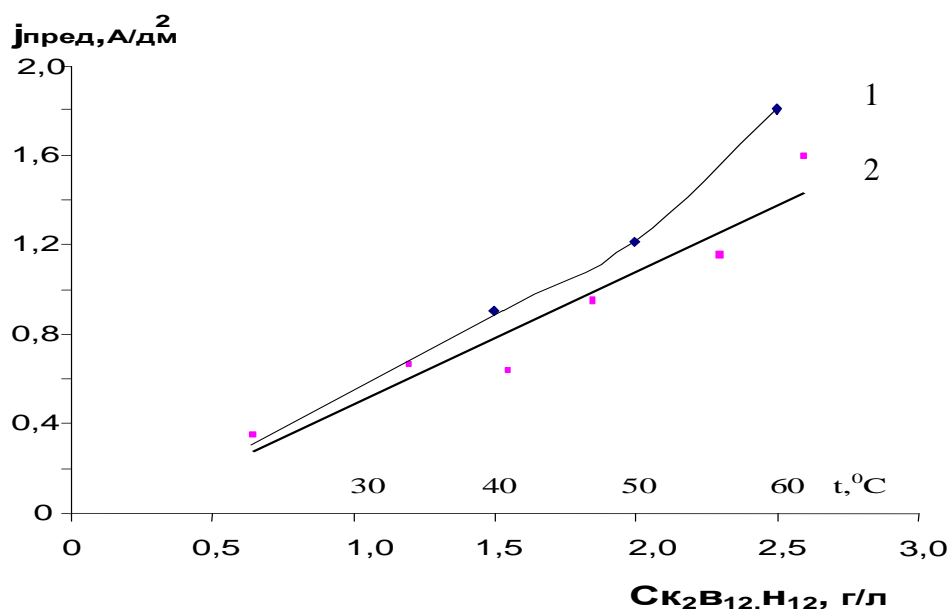


Рис. 3. Зависимость предельного тока от концентрации $K_2V_{12}H_{12}$ (1) и температуры электролита (2)

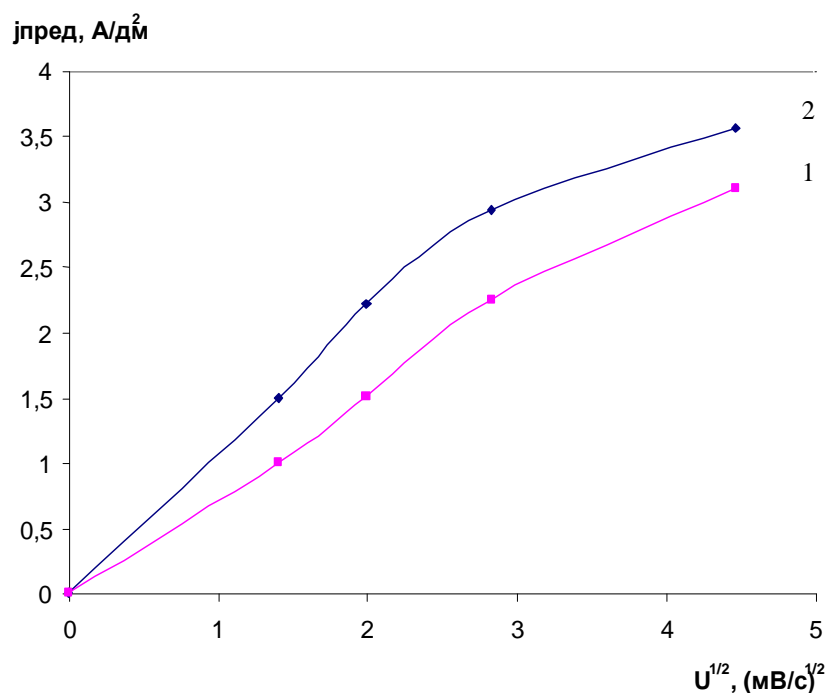
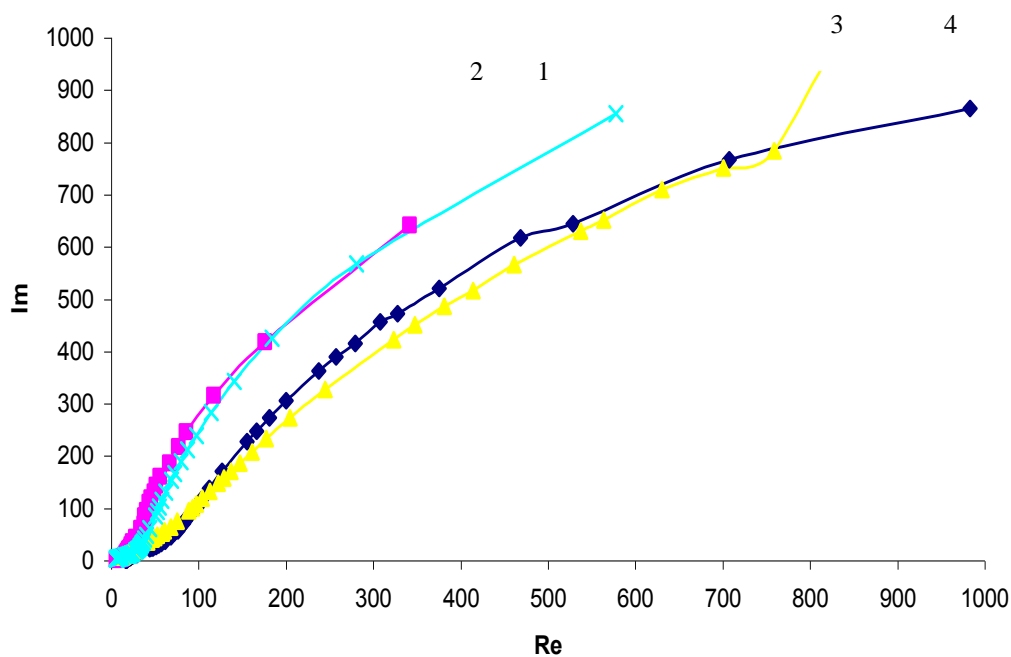
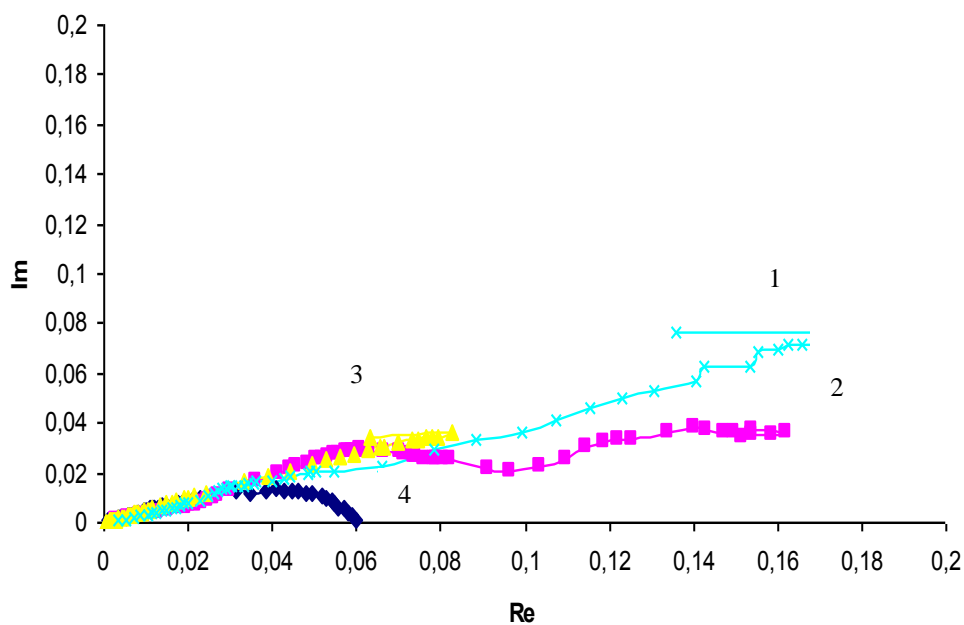


Рис. 4. Влияние скорости развертки потенциала на предельный ток при концентрации $K_2V_{12}H_{12}$, г/л: 1 - 1,5; 2 - 2,5

Величина предельного тока процесса осаждения покрытия в присутствии $K_2V_{12}H_{12}$ довольно сильно зависит от скорости развёртки потенциала (рис. 4) и экстраполируется в начало координат, что может указывать на диффузионные затруднения при разряде ионов никеля через адсорбированную пленку. Наличие диффузионных затруднений также подтверждает метод вращающегося дискового электрода.



a)



б)

Рис. 5. Импеданс (а) и адмитанс (б) Ni-V электрода в сульфатном электролите различного состава:

1 - электролит с добавкой ПЭБ-1,5 г/л; 2 - электролит без добавки; 3 - фоновый электролит с ПЭБ, но без соли никеля; 4 - фоновый электролит без добавки

Расчётный коэффициент диффузии, определенный по тангенсу угла наклона характеристических зависимостей, показал величину $(0,12-0,38) \cdot 10^{-6} \text{ см}^2/\text{с}$, что заметно ниже, чем для простых ионов никеля $(0,74 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с})$ [6].

Измерение импеданса никель-борного электрода в исследуемом электролите с помощью полуавтоматической установки, принципиальная конструкция которой описана в [7] в диапазоне частот от 0,01 Гц до 20 кГц, также подтвердило, что процесс переноса заряда лимитируется в основном диффузионной стадией. Частотные зависимости импеданса и адмитанса представлены на рис. 5 и имеют сложный вид. Различия в характере хода зависимостей импеданса и адмитанса при изменении частоты переменного тока и характерные элементы полуокружностей на графиках импеданса при линейном их ходе на графике адмитанса свидетельствуют о том, что на доминирующие диффузионные затруднения накладываются процессы, связанные, скорее всего, с наличием параллельно протекающих электродных процессов в этих условиях.

Расчет эквивалентных схем замещения никель-борного электрода по методике, представленной в [8], выявил, что наиболее характерная эквивалентная схема Ni-B электрода как с добавкой, так и без добавки $\text{K}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}$ имеет вид, представленный на рис.6, и содержит, кроме импеданса Вартбурга, сопротивление перехода и емкость адсорбции.

Анализ величин элементов такой эквивалентной схемы в условиях поляризации электрода до потенциалов, соответствующих предельному току (рис. 2), показал (табл. 1), что при введении добавки $\text{K}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}$ наблюдается заметное изменение величин элементов эквивалентной схемы. Несмотря на возрастание диффузионных затруднений (величина W в табл. 1), связанных, по-видимому, с изменением структуры приэлектродного пространства (уменьшается емкость ДЭС при одновременном возрастании псевдоемкости адсорбции), в присутствии добавки $\text{K}_2\text{B}_{12}\text{H}_{12}$ заметно облегчаются затруднения, связанные с процессом выделения никеля (величина R_3 в табл. 1). Наблюдающиеся закономерности мы связываем с адсорбцией и каталитическим разложением добавки полиэдрического бората на поверхности никеля в области катодной поляризации.

Таблица 1

Значения переменных для импеданса Ni-B электрода
в области предельного тока

Параметры	Обозначение на схеме	Без ПЭБ	С ПЭБ
R1, Ом	сопротивление электролита	14,93	13,09
C1, мкФ	емкость адсорбции	1,63	4,03
C2, мкФ	емкость ДЭС	7,16	4,86
W, Ом	импеданс Вартбурга	0,00	642,9
R2, Ом	сопротивление реакции для H_2	17,76	6,95
R3, Ом	сопротивление реакции для Ni	82,5	15,98

Следовательно, при использовании достаточно больших рабочих концентраций добавки ПЭБ и 100%-ной степени заполнения поверхности добавкой диффузия разряжающихся ионов никеля осложняется наличием приповерхностной борсодержащей плёнки.

Предельные токи проявляются при концентрации добавки порядка 0,01 г-ион/л $\text{B}_{12}\text{H}_{12}^{2-}$. В этих условиях возможно образование поверхностных комплексов ионов никеля, ад- атомов никеля с $\text{B}_{12}\text{H}_{12}^{2-}$, примерного состава $\text{NiB}_{12}\text{H}_{12}$, $[\text{NiB}_{12}\text{H}_{12}]^{2-}$ или с продуктами распада иона добавки $\text{B}_{12}\text{H}_{12}^{2-}$, например с нидо-анионом. Возможность образования таких комплексов доказана для ионов железа и кобальта [1], когда образуются структуры с вхождением иона металла внутрь пространственной структуры аниона (рис. 7).

Возрастание размеров и массы таких частиц должно сопровождаться ростом диффузионных затруднений и адсорбции. В тоже время можно предположить, что разряд такого комплекса идет с меньшими кинетическими затруднениями, чем простых, гидратированных ионов никеля.

В случае использования других полиэдрических добавок, их рабочие концентрации не достигали величин, достаточных для образования поверхностных комплексов с ионами или ад-атомами никеля. Поэтому появления предельных токов не наблюдали.

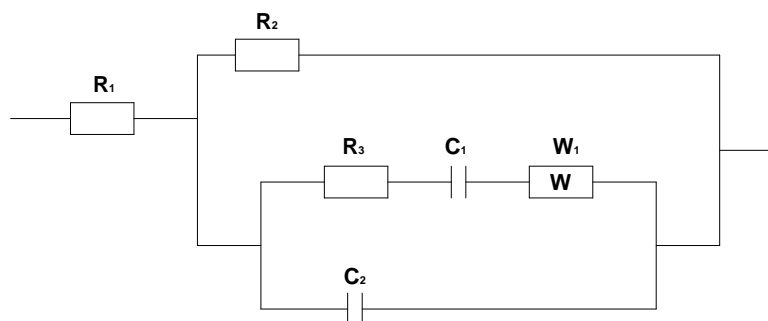


Рис. 6. Характерная эквивалентная схема Ni-B электрода в сульфатном электролите

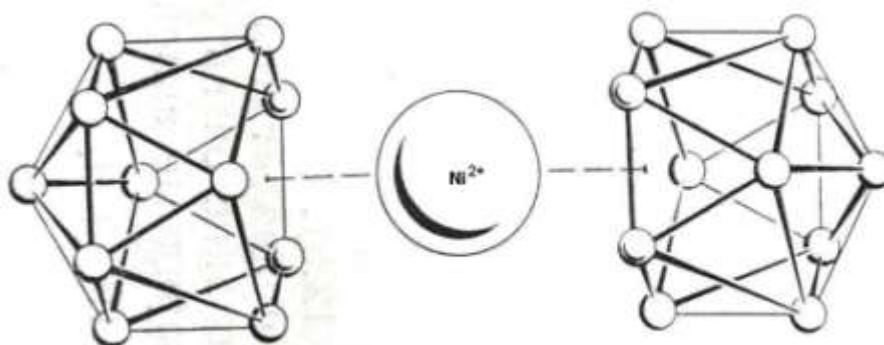


Рис. 7. Возможный комплекс с продуктами распада бордобавки вида нидо-аниона $[\text{Ni}(\text{B}_{11}\text{H}_{11})_2]^{2-}$

Библиографический список

1. Коттон, Ф. Основы неорганической химии/ Ф. Коттон, Дж. Уилкинсон .- М.: Мир, 1979. С. 287-291.
2. Флеров, В.Н. Основные положения и понятия теоретической электрохимии/ В.Н.Флеров, М.Г. Михаленко, В.В. Исаев / НГТУ. – Н.Новгород, 1991. – 118 с.
3. Некоторые особенности электроосаждения покрытий никель-бор из электролитов с добавкой карборана / В.А. Дягилев [и др.] // Гальванотехника и обработка поверхности. 1996. Т. 4. № 4. С. 22-27.
4. Грибанова, Ю.Н. Гальваническое осаждение покрытий никель-бор из электролитов с добавкой ДГБН / Ю.Н. Грибанова, В.В. Рогожин, В.Н. Флеров // Гальванотехника и обработка поверхности. 2000. Т. 4. №4. С. 22-27.
5. Садаков, Г.А. Механизм образования сплавов никель-бор из кислых электролитов / Г.А. Садаков, А.Я. Езикян, Ф.И. Кукоз // Электрохимия. 1980. Т. 16. №12. С. 1837-1840.

6. Сухотин, А.М. Справочник по электрохимии/ А.М. Сухотин. – Л.: Химия, 1981. – 488 с.
7. Низкочастотный комплекс импедансных измерений характеристик проводящих сред / А.В. Афанасьев [и др.] // Вестник Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского. 2008. №3. С. 60-64.
8. Бенсон, В.В. Автоматизированный анализ данных импедансометрии на примере окисления гидразина на золотом электроде / В.В. Бенсон, В.Н. Москвичев, А.Н. Москвичев // Изв. вузов. Химия и химическая технология . 1994. Т. 37. №3. С. 119-125.

*Дата поступления
в редакцию 20.04.2010*

V.V. Rogozhin, A.N. Mosckvichev, M.G. Michalenko

**RESEARCH OF CATHODE STAGE OF ELECTRODEPOSITION NICKEL – BORON
COATINGS FROM ELECTROLYTES WITH THE $K_2B_{12}H_{12}$ ADDITIVE**

The influence of the additive $K_2B_{12}H_{12}$ on cathode stage of electrodeposition nickel - boron coatings process is investigated. It is shown, that the actuation of a boron occurs on the chemical-catalytic gear, thus the electrodeposition of a nickel is complicated diffusion difficulties connected to formation of boron containing complex.

Key words: electrodeposition, nickel - boron coatings.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 338

С.Н. Яшин, Н.А. Мурашова

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ УПРАВЛЕНИЯ ИННОВАЦИОННОЙ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬЮ ПРЕДПРИЯТИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Существующие технологии инновационного развития предприятий региона не имеют четко выраженного системного подхода. В статье предложены методико-аналитические инструменты, позволяющие учитывать особенности экономических интересов предприятий, специфики и уровня развития региона, в котором находятся предприятия, а также информационная модель управления инновационным развитием предприятий региона, позволяющие осуществлять развитие государственной инновационной политики.

Ключевые слова: технология, методика; оценка; эффективность; инновации; инновационная деятельность; инновационное развитие, показатели; система; промышленные предприятия, регион, региональная политика.

В настоящее время развитие технологий управления инновационной деятельностью предприятий принимает первостепенное значение. Сегодняшнее развитие инновационного сектора экономики в условиях финансового кризиса не имеет четко выраженного системного характера, что противоречит принципам инновационного развития и свидетельствует о слабостью теоретической и практической разработанности технологии управления инновационным развитием. Создание экономических предпосылок для развития инновационной сферы заключается лишь в формировании некоторых элементов инновационной структуры (технопарков, бизнес-инкубаторов, венчурных фондов). Большинство политических и экономических мероприятий в рамках инновационных преобразований характеризуются слабым, низкоквалифицированным законодательным обеспечением. Проблематика инновационного развития экономики находит слабое отражение в социально-культурной сфере общества, инновационный менеджмент как учебная дисциплина нерационально встроена в систему российского образования. Политические, экономические, законодательные меры инновационного развития экономики проводят в отсутствие официально утвержденных определений базовых теоретических основ инновационной деятельности.

Для реализации цели и задач управления инновационным развитием предприятий необходима диверсифицированная гибкая система инструментов, позволяющих выполнять требуемые преобразования всех элементов инновационной сферы. Технология управления инновационным развитием предприятий – гибкая диверсифицированная система инструментов, методов, рычагов, организующая и стимулирующая разработку и внедрение новых знаний в производство.

Совершенствование исследуемой технологии предопределяет необходимость разработки методико-аналитических инструментов, позволяющих учитывать особенности экономических интересов предприятий, специфики и уровня развития региона, в котором находятся предприятия, соотношение технологических структур экономики.

Один из таких инструментов – оценка уровня инновационного развития предприятия. Для активизации процесса инновационного развития необходима информационная система, позволяющая отслеживать изменение уровня регионального инновационного потенциала. Наличие методики анализа структурных пропорций позволит принимать обоснованные управленческие решения в инновационной сфере в зависимости от целей и задач предприятий региона.

Развитие инновационной сферы требует регулирования процесса трансфера результатов научно-технической деятельности с учетом информации о стартовых условиях предприятий региона, состояния и структуры их инновационного потенциала. С помощью трансфера технологий знания эти технологии превращаются в новые продукты и услуги, что способствует экономическому росту и удовлетворению социальных потребностей. В настоящее время предлагается к использованию региональная система стимулирования трансфера, направленная на изменение экономических отношений в целях создания условий для коммерциализации инноваций.

Неоднородность регионов России по объему и структуре инновационного потенциала предопределяет использование различных методов управления в процессе реализации системы стимулирования трансфера, что, в свою очередь, приводит к необходимости диверсификации источников финансового обеспечения инновационного развития предприятий региона. Для эффективного развития инновационной деятельности предприятий региона, отличающегося комплексом инновационных целей и задач, необходима модель финансового обеспечения, учитывающая инвестиционную потребность инновационной сферы и инвестиционный потенциал региона.

Таким образом, технология управления инновационным развитием предприятий региона должна включать следующий набор инструментов:

- оценку уровня инновационного развития предприятий;
- региональную систему стимулирования трансфера результатов научно-технической деятельности предприятий;
- организационную модель финансирования инновационной деятельности предприятий.

Результатом функционирования технологии управления инновационным развитием предприятий должна стать комплексная, целенаправленная модернизация региональной инновационной сферы, выраженная в совершенствовании ее институциональной среды, инфраструктуры, системы финансирования, в укреплении социально-культурной основы и формировании эффективных рычагов управления, что будет способствовать повышению конкурентоспособности предприятий.

Определение сущности управления инновационным развитием региона и содержания технологии управления позволило предложить информационную модель управления инновационным развитием предприятий региона.

Предложенная модель носит системный характер, что подтверждается, во-первых, наличием четко выраженной цели. Данная модель позволяет определить характер взаимодействия участников процесса инновационного развития, установить порядок информационного обмена и последовательность использования инструментов, необходимых для эффективного становления инновационной сферы региона.

Определение сущности управления инновационным развитием предприятий региона и содержания технологии управления позволяет построить информационную модель управления инновационным развитием предприятий в соответствии с рис. 1.

Данная модель позволяет определить характер взаимодействия участников процесса инновационного развития, установить порядок информационного обмена и последовательность использования инструментов, необходимых для эффективного становления инновационной сферы региона.

Субъект управления (федеральные и региональные органы власти) оказывает целенаправленное воздействие на объект (региональную инновационную сферу) посредством последовательных методов (технология управления инновационным развитием предприятий региона).

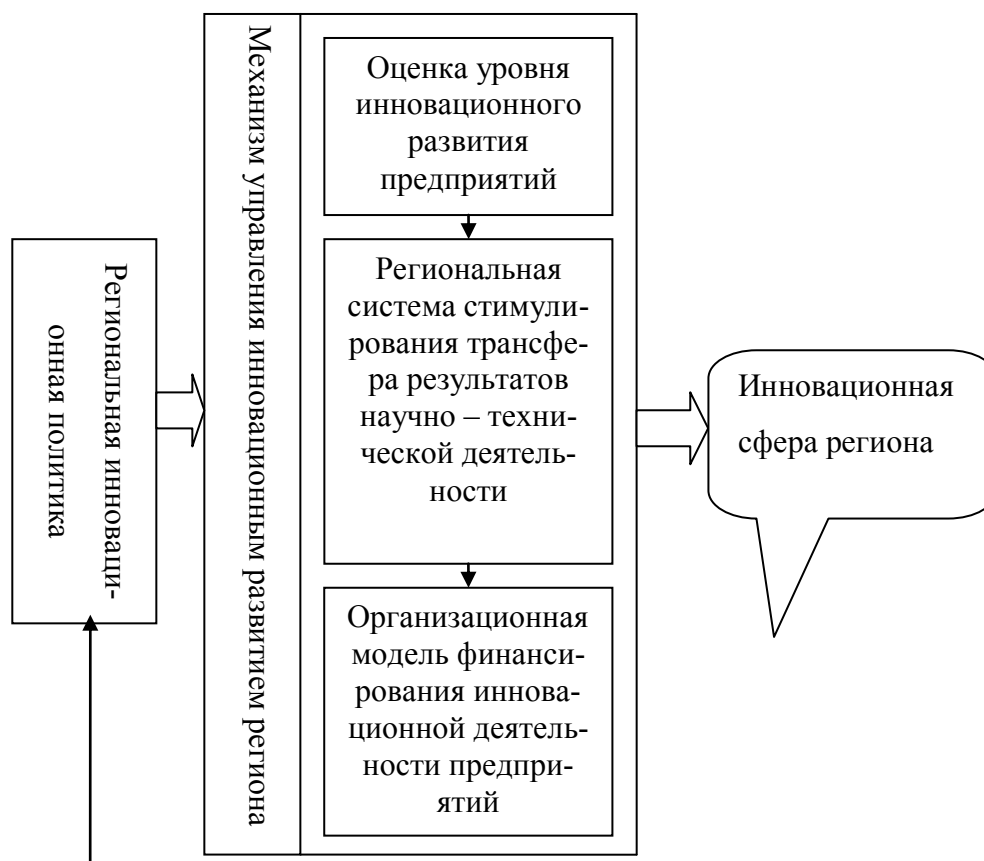


Рис. 1. Информационная модель управления инновационным развитием предприятий региона

Инновационное развитие предприятий региона основано на следующих принципах:

- 1) комплексность – комплексная модернизация всех форм общественных отношений, влияющих на формирование инновационной экономики;
- 2) системность – согласованное, целеориентированное, взаимосвязанное развитие политической, экономической, социально-культурной, законодательной общественных формаций с целью создания условий для инновационной экономики;
- 3) последовательность – последовательное проведение всех вышеуказанных процессов.

Модель управления инновационным развитием предприятий региона включает обратную связь, позволяющую скорректировать региональную инновационную политику.

Модель управления инновационным развитием предприятий региона – это совокупность институтов и система экономических взаимоотношений, организующих целенаправленное воздействие государственной инновационной политики на инновационную сферу мезоуровня посредством реализации технологии управления инновационным развитием предприятий региона.

Статистический анализ возможности инновационного развития предприятий регионов России по уровню инновационного потенциала (ИП) и возможности активизации его использования позволили разработать классификацию субъектов Российской Федерации (табл. 1) [1].

Таблица 1

**Классификация субъектов РФ по уровню инновационного потенциала
и возможности активизации его использования**

Группа и уровень ИП региона	Регионы, входящие в группу	Характеристика активизации инновационного потенциала
1-я группа, высокий ИП	<i>Города:</i> Москва и Санкт-Петербург <i>Области:</i> Московская, Самарская, Нижегородская, Калужская, Свердловская, Новосибирская, Томская, Челябинская, Воронежская	Регионы с инновационной самодостаточностью, обеспечивающей наиболее эффективное вложение государственных инвестиционных ресурсов в развитие их инновационного потенциала в настоящее время
2-я группа, средний ИП	<i>Республики:</i> Татарстан, Саха (Якутия) <i>Края:</i> Алтайский, Хабаровский <i>Области:</i> Владимирская, Белгородская, Тульская, Ярославская, Вологодская, Волгоградская, Ростовская, Пензенская, Пермская, Саратовская, Ульяновская, Тюменская, Иркутская, Омская	Регионы, требующие определенных затрат финансовых ресурсов и разработки комплекса мер государственной поддержки инновационной деятельности на текущий и краткосрочный периоды
3-я группа, ИП ниже среднего (низкий)	<i>Республики:</i> Башкортостан, Мордова <i>Края:</i> Красноярский, Приморский <i>Области:</i> Архангельская, Калининградская, Кемеровская, Ленинградская, Мурманская, Магаданская, Орловская, Тверская	Регионы, требующие больших затрат финансовых ресурсов и разработки специальных мер государственной поддержки инновационной деятельности на ближайшую перспективу
4-я группа, ИП очень низкий	<i>Республики:</i> Дагестан, Карелия, Коми, Марий-Эл, Удмуртия, Чувашская Республика <i>Края:</i> Краснодарский, Ставропольский <i>Области:</i> Амурская, Брянская, Ивановская, Камчатская, Кировская, Костромская, Курганская, Курская, Липецкая, Новгородская, Рязанская, Сахалинская, Смоленская, Тамбовская	Регионы, требующие очень больших затрат финансовых ресурсов и разработки особых мер государственной поддержки поэтапной организации и развития инновационной деятельности
5-я группа, ИП отсутствует	<i>Республики:</i> Адыгея, Бурятия, Ингушетия, Калмыкия, Кабардино-Балкарская, Карачаево-Черкесская, Чеченская, Северная Осетия, Тыва, Хакассия <i>Области:</i> Астраханская, Оренбургская, Псковская, Читинская; Еврейская автономная область; Чукотский автономный округ	Регионы, требующие индивидуальных программ и мер государственной поддержки развития

Проведенный анализ социально-экономической ситуации, сложившейся в настоящее время в регионах России, показывает, что стратегия инновационного развития и инновационного прорыва России, а также стратегия регионального устойчивого развития соответствует только для регионов, входящих в первую группу («регионы-лидеры»), а в перспективе – восемнадцати регионам второй группы.

Оставшимся 50-ти регионам, обладающим низким природно-ресурсным и достаточно

низким инновационным потенциалом, необходимо усилить использование человеческих ресурсов посредством формирования и развития индустрии знаний.

Основным интегральным индикатором реализации инновационно-устойчивого развития является развитие научно-технического и инновационного потенциалов региона (оцениваемое индексами НТП и ИП), а также оценка их динамики. Перечень показателей, определяющих данные индексы, методики их представления и определения достаточно широко освещены в научных источниках. В этой связи регионам III и IV групп, обладающих недостаточно высоким инновационным потенциалом, необходимо наращивать научно-технический и инновационный потенциал.

Следовательно, прежде чем разрабатывать модели технологии управления инновационной деятельностью предприятий региона необходимо разработать систему показателей, оценивающих результативность проводимых региональных мероприятий в сфере инновационного развития. Для оценки эффективности деятельности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, утвержденный Указом Президента Российской Федерации от 28 июня 2007 г. № 825 (в целях реализации положений Федерального закона от 6 октября 1999 г. № 184-ФЗ «Об общих принципах организации законодательных (представительных) и исполнительных органов государственной власти субъектов Российской Федерации»), нами предлагается перечень показателей уровня использования инновационного потенциала региона:

- уровень инновационной активности промышленных предприятий;
- доля инновационной продукции в общем объеме промышленной продукции.

В условиях ограниченности и повышении стоимости ресурсов при формировании технологий управления инновационным развитием регионов приоритетное значение имеет деятельность органов региональной власти, что соответствует современным мировым тенденциям возрастания роли территориальных органов власти.

Приоритет регионального уровня в формировании национальной инновационной системы определен возможностью интеграции между органами власти, корпоративным и научным сектором, на базе общих интересов и стремления региональных хозяйствующих субъектов к повышению своей конкурентоспособности. Это является основополагающим фактором инновационного развития территории.

Практические знания специфики региональной экономики и культуры, социально-экономических возможностей и потребностей региона позволяют органам власти регулировать бизнес-процессы институциональной сферы и принимать обоснованные управленческие решения.

Организационной формой партнерской работы государственного и частного сектора является частно-государственным партнерством [2], что дает возможность минимизировать бюрократические преграды. Сущность партнерства заключается во взаимодействии бизнеса с федеральными и региональными властями по созданию объектов инновационной инфраструктуры (технопарки, дизайн-центры, венчурные фонды); взаимодействие с федеральными и региональными фондами поддержки НИОКР и инноваций; подготовка кадров в университетах; участие в общественных объединениях, а также консультации в органах законодательной власти по выработке законов, направленных на развитие инновационной сферы.

Частно-государственное партнерство в инновационной сфере – это деятельность по разработке правовых и финансово-экономических технологий и инструментов формирования и реализации эффективной государственной инновационной политики.

Партнерские отношения представителей государственного и частного сектора экономики в инновационной деятельности способствуют повышению эффективности инновационных процессов за счет совместной деятельности в формировании нормативно-правовой базы,

регулирующей инновационную сферу, в разработке взаимовыгодных инновационных направлений, в принятии решений о реализации и управлении инновационными проектами, в построении эффективных схем финансового обеспечения инновационной деятельности. При организации такого рода взаимодействий необходимо учитывать интересы и возможности обеих сторон.

Следовательно, главной задачей региональных органов управления является развитие инновационной системы для повышения конкурентоспособности региональных предприятий (государственных и частных), что определяет необходимость стимулирования инновационных процессов путем создания благоприятных институциональных и инфраструктурных условий. Частный бизнес руководствуется целью повышения рентабельности реализуемых бизнес-процессов и организации новых бизнес-проектов.

Основными ресурсами органов власти являются государственные научно-исследовательские учреждения, обладающие запасом кадрового и материально-технического потенциала, бюджетные средства и рычаги государственного управления; корпоративный сектор обладает необходимыми предпринимательскими навыками в управлении бизнес-проектами и обширной сетью межрегиональных и международных экономических связей. Поэтому функцией частно-государственного партнерства является повышение эффективности инновационной деятельности региона посредством объединения возможностей обеих сторон с учетом выстраивания общей взаимовыгодной стратегии развития.

Поскольку основной интеллектуальный потенциал научно-исследовательских организаций сосредоточен в регионах, правильно построенная органами региональной власти инновационная политика позволит использовать этот потенциал в инновационном развитии региона. Государственное регулирование инновационной деятельности осуществляется путем создания нормативно-правовых актов, определяющих статусы инновационных институтов, предприятий, программные направления их деятельности и меры её стимулирования. Самоуправление реализуется за счёт самофинансирования и разнообразия организационных форм деятельности [1].

Государственная инновационная политика в базовых отраслях направлена на ускоренное промышленное освоение отечественных и зарубежных инновационных достижений мирового уровня, в частности, предусмотрены меры по воспроизводству природных ресурсов, минерального сырья, питьевых и промышленных вод, флоры и фауны и др.

В электроэнергетике инновационная политика направлена: на создание и использование новых экологически чистых поколений парогазовых и газотурбинных установок на твердом топливе; развитие малой и нетрадиционной энергетики, атомных энергоблоков нового поколения повышенной безопасности; решение проблем захоронения отходов АЭС; повышение эффективности системы передачи электроэнергии на большие расстояния.

Транспортный комплекс ориентирован на обновление парка транспортных средств; повышение технического уровня всех видов транспорта; внедрение транспортных средств на альтернативных видах топлива, навигационных систем, систем обеспечения безопасности движения.

В металлургическом комплексе – создание сквозных технологических циклов производства, обеспечивающих максимальную экономию сырьевых и энергетических ресурсов; расширение ассортимента и повышение качества металлопродукции.

В сталеплавильном производстве – введение прогрессивных наукоемких технологий кислородно-конверторной плавки, технологий совмещения литейного и прокатного процессов, технологий получения труб разного диаметра и профильного проката расширенной номенклатуры; применение технологии металлизированных брикетов и технологии производства металлизированных окатышей в реконструированных шахтных печах. Это позволит

снизить расход топлива на 60% и энергии до 8%.

В химической и нефтехимической промышленности инновационная деятельность направлена: на внедрение материало- и энергосберегающих технологий производства широкого спектра синтетических и композиционных материалов, в том числе новых поколений; технологии производства экологически чистых удобрений, химических средств защиты растений, ресурсосберегающих малотоннажных химических производств на базе автоматизированных блочно-модульных систем. Это обеспечит снижение расходов сырья на 15–20%, уменьшение энергозатрат на 20–40%.

В машиностроительном комплексе основными инновационными направлениями являются: технологическое перевооружение общемашиностроительных производств за счёт автоматизации процессов проектирования и изготовления продукции; применение прогрессивных методов высокоточной обработки конструкционных материалов и повышения качества поверхностей деталей и металлоконструкций; механизация и автоматизация сборочных процессов; развитие современных методов контроля и диагностики деталей и узлов в процессе изготовления и эксплуатации.

В лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности – внедрение технологии сортаментной заготовки и первичной переработки древесины; технологий производства экологически чистых биостимуляторов, консервантов, лекарственных препаратов и производства специальных видов бумажных материалов для обеспечения высоких технологий в химической промышленности, машиностроении, авиакосмической промышленности.

В легкой промышленности – технологическое перевооружение с использованием отечественного натурального сырья на предприятиях текстильной промышленности за счёт новой технологии переработки короткого волокна, технологии получения смесовых тканей и трикотажных изделий. В кожевенной, меховой и обувной промышленности – внедрение технологий производства высококачественных эластичных, натуральных кож на базе новых отечественных жирующих, дублирующих и отделочных материалов; производство водостойких натуральных кож с улучшенными гигиеническими и эластопластическими свойствами и механохимических технологий производства обуви на базе отечественных клеевых композиций из водных систем полиуретанов.

В пищевой промышленности – внедрение технологии углубленной переработки сырья; расширение ассортимента выпускаемой продукции с учетом требований потребителей; создание продукции повышенной биологической ценности; интенсификация процессов производства; внедрение стабилизаторов цвето-, вкусо-, аромато- и структурообразования выпускаемой продукции и качественной красочной упаковки; инструментальные средства для экспресс-методов оценки качественных характеристик сырья и производимой продукции.

В связи и информатике – внедрение высоких информационных технологий; развитие национальной инфраструктуры оптоволоконных каналов телекоммуникаций, спутниковых систем связи, мощных информационно-вычислительных центров на базе университетов; интеграция телекоммуникационных и информационных технологий; создание современного программного обеспечения, позволяющего работать с огромными информационными массивами; развитие индустриальных методов проектирования программного обеспечения.

Модель технологии управления инновационным развитием предприятий региона учитывает взаимодействие федерального и регионального уровней организации инновационной деятельности: в условиях самостоятельности региональных органов власти в способах реализации инновационной политики необходимым условием является их согласованность с основами инновационной политики федерального уровня. Федеральная инновационная политика, используя рычаги федеральной власти, оказывает комплексное воздействие на всю иннова-

ционную сферу государства и на основе анализа эффективности осуществления инновационной политики на региональных уровнях вносит необходимые коррективы в работу технологии управления инновационным развитием региона.

Библиографический список

1. Инновационный путь развития для новой России; отв. ред. В.П. Горегляд. – М.: Наука, 2005. – 343 с.
2. **Тихонова, С.А.** Частно-государственное партнерство в решении кадровых проблем развития инновационной деятельности в регионах // Материалы I Международного форума «От науки к бизнесу. Международный опыт развития инфраструктуры инновационной деятельности. 2007. Санкт-Петербург». – Тверь: Тверской Инно-Центр, 2008. – С. 253–258.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

S.N. Yashin, N.A. Murashova

SOME ASPECTS OF DEVELOPMENT MANAGEMENT TECHNOLOGY OF ACTIVITY ENTERPRISES INNOVATION

Exaction innovation development techno loges of the region enterprises have not got any efficient system approach. Some method and analytical tools which are proposed in that article allow take inlet consideration some specificity of interposes economical interests, specific ales and lawless of regions were enterprises are actuated, also and information model of innovation development management, allowing to exact the development of the state innovational police.

Key word: technology; technique; estimation; efficiency; innovations; innovative activity; innovative development; system; enterprises; region; the regional policy.

УДК 336.13, 339.721

М.Ю. Малкина

**УПРАВЛЕНИЕ ОФИЦИАЛЬНЫМИ МЕЖДУНАРОДНЫМИ РЕЗЕРВАМИ
ГОСУДАРСТВ В УСЛОВИЯХ ГЛОБАЛЬНЫХ РИСКОВ**

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Исследуется динамика международных резервов, уровень обеспеченности ими разных стран, показатели степени их достаточности, изменения структуры. Делается вывод, что в условиях приближающегося кризиса международной валютной системы управление иностранными резервами должно учитывать риски не только национального, но и глобального характера.

Ключевые слова: международные резервы, уровень обеспеченности резервами, уровень достаточности резервов, структура международных резервов, риски резервирования, управление международными резервами

В создании международных (золотовалютных) резервов государств есть своя внутренняя логика. Прежде всего, их нужно понимать как ликвидные запасы страны, выполняющие страховую функцию для государственных финансов, в частности и национальной экономики в целом. Эти запасы являются и одним из критериев экономической безопасности государства, и одновременно механизмом, ее обеспечивающим. В период кризиса 2008–2009 гг. резервы сыграли важную роль в предотвращении обвальной девальвации некоторых национальных валют. В то же время кризис обнаружил финансовые и экономические проблемы долговременного характера у самих эмитентов резервных валют (избыточная эмиссия, рост внешнего долга, дефицита госбюджета и рецессия в экономике), в связи с чем возник вопрос относительно качества накопленных международных резервов и необходимости выработки обоснованных подходов к управлению им в условиях глобальных рисков.

В первом десятилетии XXI в., вплоть до кризиса 2008–2009 гг., международные резервы в мировом масштабе росли увеличивающимися темпами. Только за период 2000–2007 гг. их рост составил 3,3 раза (а валютных резервов без учета золотой составляющей – 3,5 раза). За то же время мировой ВВП увеличился в 1,7 раза. Если в 1995 году отношение резервов к ВВП в мировом масштабе составляло 6,1 %, в 1999 году – 6,8%, в 2006 году – 11,5%, то в 2007 году – уже 13,9%.

В 2008 г., в связи с кризисом, снижением цен на нефть и использованием резервов для предотвращения обвальной девальвации национальных валют, рост официальных резервов стран заметно замедлился, составив лишь 8,3% по сравнению с 26,5% в 2007 г. и 19,8% в 2006 г.¹. Более того, в некоторых странах, например России, Саудовской Аравии, Индонезии, Украине, Беларуси, в этом году и вовсе наблюдалось значительное уменьшение официальных международных резервов. В тот же период уменьшались и резервы подавляющего большинства развитых государств – в части их незолотой составляющей (исключение составляет, пожалуй, только Италия), особенно большое сокращение наблюдалось во Франции, Великобритании, Южной Корее и на Мальте. Одновременно в других странах, таких как Китай, Таиланд, Гонконг, Алжир, наблюдался существенный прирост валютных резервов государств.

В разгар кризиса (особенно это касается 4-го квартала 2008 г.) увеличилась степень разброса темпов роста резервов у разных стран относительно общемирового значения, что от-

ражает показатель их среднего квадратического отклонения (рис. 1), рассчитанный нами по формуле

$$CKO = \sum_{i=1}^n (I_i - \bar{I}_i) f_i,$$

где I_i – темп роста международных резервов в стране I ; $\bar{I}_i = \sum_{i=1}^n I_i f_i$ – средний темп роста резервов в мире; f_i – доля i -й страны в международных резервах в соответствующем периоде. Со 2-го квартала 2009 г. темпы роста международных резервов стали снова расти (рис. 1).

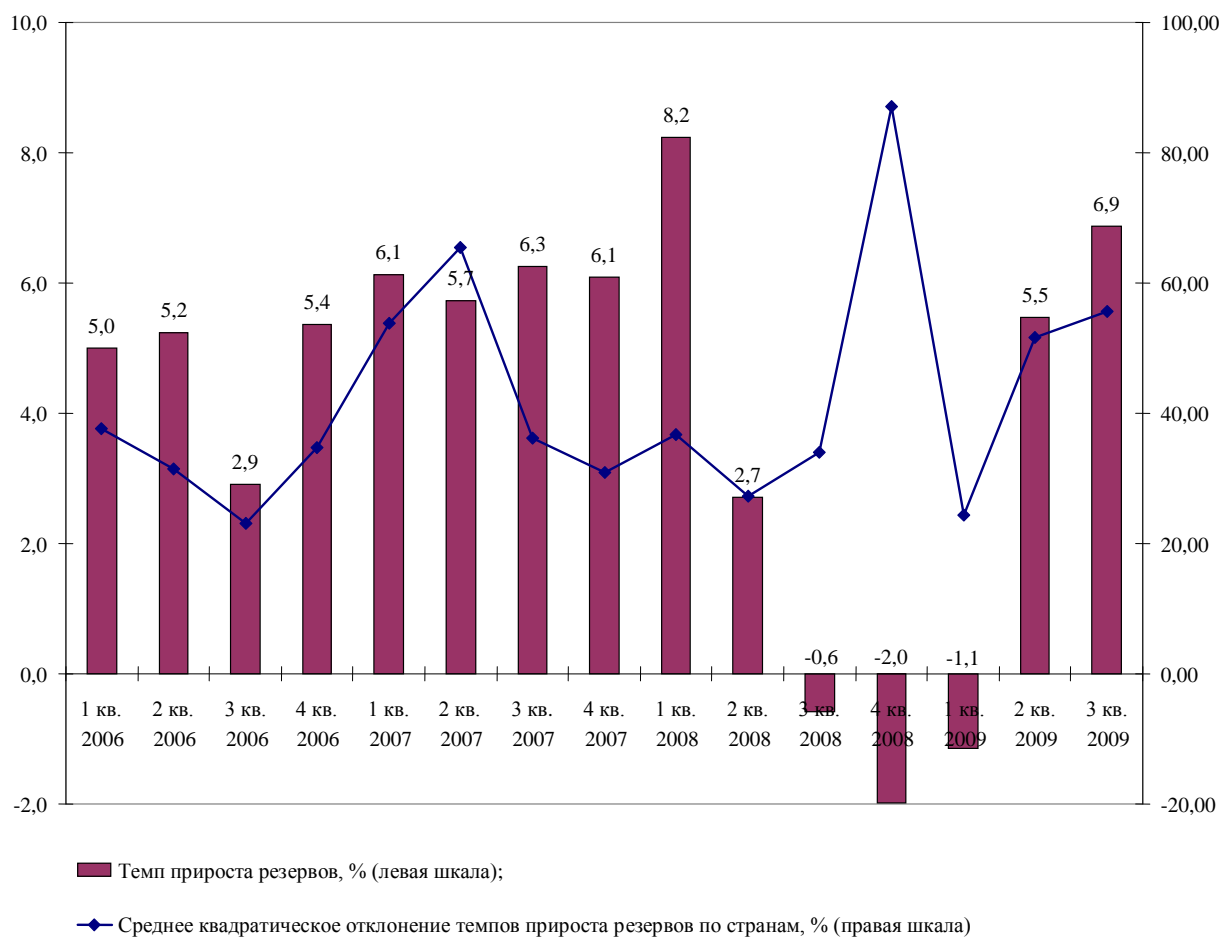


Рис. 1. Динамика и волатильность темпов роста международных резервов в 2006-2009 гг.

В настоящее время абсолютные и относительные объемы международных резервов остаются внушительными. Первое место среди стран по их абсолютному объему принадлежит Китаю, где в начале 2008 г. они составляли более 1,6 трлн долл. США, а на 01.09.2009 г. уже равнялись 2,3 трлн долл., это почти треть совокупных мировых резервов. Второе место у Японии, здесь размер резервов несколько превышает 1 трлн долл. И в последнее время он изменялся незначительно. Третье место занимает Россия: в начале августа 2008 г. объем ее международных резервов достиг рекордного за весь период ее существования значения – 598 млрд долл., за время кризиса он заметно снизился – на 36%, потом медленно рос и на 01.03.2010 г. составил 436,3 млрд долл. Заметим, что в России в составе международных резервов учитываются также средства Резервного фонда и Фонда национального благосостояния, инвестированные в иностранные активы. Сегодня большая часть международных резервов сосредоточена в Азии и находится в распоряжении развивающихся стран. Так, в начале 2009 г. на 9 азиатских стран (Китай, Японию, Тайвань, Южную Корею, Индию, Сингапур,

Гонконг, Малайзию и Индонезию) приходилось 62% мировых валютных резервов (без золотой составляющей). В то же время развитым странам принадлежало 37% валютных резервов, тогда как развивающемуся миру – 63% валютных резервов².

Однако в ситуации всеобщего признания слабости резервных валют и грядущего кризиса международной валютной системы накопление официальных иностранных активов государств вряд ли может расцениваться как свидетельство усиления роли мировых денег в функции сбережения. Более того, согласно кейнсианской теории, чистые сбережения являются вычетом из спроса и выступают фактором, сдерживающим экономический рост. Поэтому рост международных резервов в первом десятилетии XXI в. можно было рассматривать, прежде всего, в качестве провозвестника грядущей мировой рецессии. Во-вторых, в таких условиях США и европейские страны – члены еврозоны вырабатывали компенсаторные механизмы спроса, осуществляя опережающую (внутренние потребности экономики) эмиссию денег, что в долгосрочном плане ведет к серьезным дисбалансам в денежной сфере эмитентов резервных валют. В-третьих, неравномерный рост резервов отражает и межстрановые дисбалансы совокупного спроса и совокупного предложения. Некоторые страны, ориентированные на внешний спрос, на международном рынке товаров и услуг выступают в качестве нетто-кредиторов, а другие являются чистыми заемщиками. Все эти дисбалансы формируют новые глобальные риски резервирования, что требует пересмотра стратегий резервирования.

Прежде всего, встает вопрос о степени обеспеченности стран резервами и их достаточности для каждой конкретной страны. Для оценки степени обеспеченности экономики страны международными резервами можно использовать относительные показатели: «международные резервы на душу населения» и «процентное отношение международных резервов к ВВП».

Международные резервы на душу населения демонстрируют, насколько одновременно в среднем может быть увеличен доход гражданина страны, если предположить, что будет принято некое гипотетическое решение о проедании всех ликвидных запасов. Бесспорным лидером по этому показателю, идущим с большим отрывом от всех остальных государств, является Сингапур, где в 2006 г. резервов на душу населения было в 1,6 раза больше, чем в Гонконге, занимающем 2-е место по данному показателю, в 14,5 раз больше, чем в России, и в 38 раз больше, чем в Китае. Если «раздать» государственные резервы жителям Сингапура, каждый из них смог бы приобрести автомобиль класса Sedan. А если жителям Таджикистана, – то им хватило бы на обед в не самом дорогом ресторане [3, с. 12].

Отношение международных резервов к ВВП (в %) показывает, какое время страна может безбедно существовать при полностью разрушенном (неработающем) национальном хозяйстве, обеспечивая прежний уровень жизни, проедая накопленные запасы. По нашим расчетам, в 2006 г. резервов Сингапура было достаточно, чтобы поддерживать уровень жизни в течение года, заместив национальное производство импортным. Малайзии и Китаю этих резервов хватило бы более чем на полгода, России – чуть больше четырех месяцев, Беларуси – на 16 дней, Германии и Великобритании – на 13 дней, США – менее двух дней, Ирландии – на 1 день и 9 ч [3, с. 14].

В зарубежной и отечественной литературе международные резервы рассматриваются как страховые запасы, предохраняющие национальные экономики от внешних макроэкономических рисков. К таким рискам можно отнести: 1) риск обеспечения экономики страны необходимыми товарами и услугами; 2) риск внешней платежеспособности; 3) риск неуправляемого изменения денежной массы вследствие оттока или притока иностранного капитала. В связи с этим международными организациями, в частности МВФ и Всемирным Банком, для развивающихся экономик предлагается система показателей, оценивающих адекватность резервов [2, с. 414-415].

² Рассчитано автором на основе данных International Monetary Fund. <http://www.imf.org>.

Первый показатель – *международные резервы в месяцах импорта* – определяется по формуле $R_{mi} = \frac{R}{Im/12}$, где R – международные резервы страны, млрд долл. США, Im – годовой импорт, млрд долл. США. Нормальным значением данного показателя считается 3 месяца (минимум). Именно в течение этого времени страна может преодолеть импортную блокаду и наладить обеспечение (заключить контракты с другими странами, мобилизовать внутреннее производство и пр.). Особенно важным поддержание такого рода резервов является для стран, имеющих ограниченный доступ к мировым рынкам капитала. Как показывают наши расчеты, резервы в месяцах импорта у большинства стран с развивающимися рынками существенно превышают нормативное значение. Их значение в 2006 г. составляло: 22,2 мес. – в России, 18,6 мес. – в Китае, 16,2 мес. – в Японии, 3,5 мес. – в Словакии и Словении, 3,4 мес. – в Венгрии. В то же время у развитых индустриальных стран значение показателя резервов в месяцах импорта существенно ниже нормативного, что свидетельствует о более низкой оценке ими соответствующего риска и отсутствии необходимого страхового обеспечения (в США – 42 дня, в Германии – 45 дней, в Великобритании – 28 дней, в Ирландии – 4 дня) [4, с. 14].

Второй показатель – *отношение международных резервов к краткосрочному внешнему долгу страны* – демонстрирует способность экономики расплатиться по текущим внешним обязательствам (в расчет берется долг со сроком погашения до 1 года и обслуживание долгосрочного долга, выплата по нему процентов) за счет собственных ресурсов. Рассчитывается по формуле $R_{ed} = \frac{R \cdot 100000}{ED \cdot \alpha}$, где R – международные резервы страны, млрд долл. США,

ED (external debt) – внешний долг, млрд долл. США; α – доля текущего внешнего долга (short-run external debt) к общему внешнему долгу страны, %. Нормальным значением этого показателя считается 100%. Согласно нашим расчетам, существенное превышение данного норматива в последние годы наблюдается в странах Латинской Америки и Азии. Так, в конце I полугодия 2009 г. отношение официальных международных резервов к краткосрочному внешнему долгу составляло: в Уругвае – 4096%, в Бразилии – 590,5%, в Индии – 666,2%, в Китае – 608,4% (на конец 1-го квартала 2007 г.). В России оно равнялось 859,6%. В то же время в большинстве развитых стран значение этого показателя ничтожно: во Франции – 5,7%, в Германии – 9,8%, в США – 7,5%, в Великобритании – 1%, в Ирландии – 0,2%, что является свидетельством недооценки ими риска международной неплатежеспособности или наличия других способов защиты от него (в частности, эмиссии резервных валют). В Японии, где и резервы, и краткосрочный внешний долг составляют внушительную величину, их отношение равно 73,5% (все данные – на конец I полугодия 2009 г.). Полученные результаты закономерны. Данному показателю традиционно уделяется наибольшее внимание в странах Латинской Америки и Юго-Восточной Азии, где валютно-финансовые кризисы нередко были связаны именно с ростом необеспеченной внешней задолженности. Так, в Аргентине в 1982-1984 гг. и в Бразилии в 1982-1983 гг. отношение международных резервов к краткосрочному внешнему долгу составляло всего 20-30%, в Бразилии в 1990-1991 гг. – менее 40%, в Филиппинах в 1984-1985 гг. – менее 10%, в Индонезии в 1995-1997 гг. – менее 60%, в Перу в 1987-1990 гг. колебалось в пределах 25-37% [4, с. 14].

Третий показатель – *обеспеченность денежной массы валютными резервами* – играет большую роль в странах с несамостоятельными монетарными режимами (типа “*currency board*”), с привязкой слабых национальных валют к более сильным иностранным валютам. Считается, что такая привязка страхует слабые валюты от их дальнейшего обесценивания, а поддержание резервов играет стабилизирующую роль посредством подключения эффекта доверия к национальной денежной единице и дисциплинирующего эффекта в кредитно-денежной политике. Показатель обеспеченности денежной массы валютными резервами вы-

числяется как отношение международных резервов государства к денежному агрегату $M2$: $RM = \frac{R \cdot ER}{M2}$, где R – международные резервы (долл. США); ER – курс доллара США в национальной валюте (нац. д. ед./ долл. США).

Как показывают наши расчеты, большее обеспечение денежной массы резервами наблюдается у стран с более жесткими валютными курсами: режимами фиксации или управления валютным курсом. Из всех исследуемых стран, в 2006 г. только денежная масса Киргизии была на 100% обеспечена резервами, еще у семи государств (Армении, Сингапура, России, Перу, Боливии, Болгарии, Молдовы) обеспеченность составляла более 50%, у остальных – меньше 50% [4, с. 15-16].

В России соотношение резервных и находящихся в обращении денег в докризисный период постепенно росло, увеличившись с 68% на 01.01.2004 до 98,4% на 01.08.2008 г. Соотношение, близкое к 100%, стало ярким свидетельством того, что управление денежной массой в годы, предшествовавшие кризису 2008-2009 годов, в основном осуществлялось посредством валютного канала эмиссии. При этом обменный курс доллара выступал в качестве цены конвертации иностранной денежной массы в национальную. Его относительная стабильность, отсутствие серьезных спекулятивных атак также способствовали абсолютному покрытию денежной массы резервами. Кризис внес сбой в этот механизм. В последнем квартале 2008 г. и начале 2009 г. были задействованы другие каналы эмиссии денег, в частности, кредитный канал, в то время как валютные интервенции способствовали изъятию эмитированной денежной массы. В этот же период международные резервные валюты (доллар и евро) стали объектами спекулятивной атаки, что способствовало девальвации рубля. В силу этих обстоятельств в изменении национальной денежной массы и международных резервов России появилась заметная асинхронность. Неслучайно отношение международных резервов России к денежному агрегату $M2$, конвертированному в доллары США по официальному обменному курсу доллара к рублю, на 01.03.2009 г. составило 114%, а на 01.11.2009 г. оно уже сократилось до 91%³.

Качество международных резервов определяется их составом и структурой, а также гибкостью подходов к управлению ими. Структура резервов рассматривается с точки зрения их разделения на «золотую» и «бумажную» часть, распределения по валютам, инструментам и в страновом разрезе.

По данным на конец марта 2009 г., резервное золото в мире в целом составляло 29,7 тыс. т. В последние годы этот запас имел тенденцию небольшого сокращения. Из всего объема золотых резервов на долю стран приходилось 88,7%, остальное находилось в распоряжении международных организаций. В настоящее время золото составляет 10,5% всех международных резервов, и эта доля имеет тенденцию к росту вследствие удорожания золота на мировых рынках и его положительной переоценки. Наибольший золотой запас принадлежит США (8,133 тыс. т, или 31% золотых резервов стран), на втором месте Германия (3,413 тыс. т и 13%), далее Франция (2,487 тыс. т и 9,4%), Италия (2,451 тыс. т и 9,3%) и Швейцария (1,04 тыс. т и 3,9%). Всего развитые страны владеют 81,3% золотых запасов. Из стран, не входящих в разряд развитых, 1-е место по их абсолютному объему занимает Китай (1054 т), далее идет Россия (523,7 т), Венесуэла (363,9 т), Индия (357,7 т). Между тем только у Венесуэлы доля золотой составляющей международных резервов на 01.04.2009 г. была существенна (35,5%), в России она равнялась всего 4%, в Индии – 4,2%, в Китае – 0,9%. В то же время резервы развитых стран (хотя и не столь велики по масштабу) в основном состоят из золота. У США доля металла в резервах 78,9%, у Германии – 71,5%, у Франции – 72,6%. Лидерами являются Португалия и Греция, где она более 90%, хотя сами резервы незначи-

³ Рассчитано автором на основе данных Банка России. <http://www.cbr.ru>.

тельны⁴. Золото как объект резервирования имеет недостатки, и самым главным из них является низкая ликвидность и сильная чувствительность рынков золота к предложению и спросу на него. Его очевидным преимуществом является то, что оно остается реальным активом, на который существует спрос со стороны промышленности, в том числе ювелирной отрасли и высокотехнологических производств, и оно динамично растет в цене.

Информация о валютном распределении резервов у большинства стран отсутствует в открытом доступе, либо ее трудно получить вследствие нахождения на той части их сайтов, которая представлена на национальном языке. Международный валютный фонд периодически публикует обобщенную информацию по странам и их группам, свидетельствующую о том, что доля доллара в резервах плавно снижается. Между тем, и в настоящий момент страны держат в долларах 63% резервов, причем у развитых стран эта доля выше (66%), чем у развивающегося мира (59%). Обобщенные данные о валютной структуре резервов и их динамике представлены в табл. 1.

Таблица 1

Валютная структура международных резервов групп стран в динамике, %*

Валютная структура	1999 г.	2004 г.	2009 г. (II полугодие)
Весь мир	100,0	100,0	100,0
Требования, идентифицированные по валютам	77,43	70,83	62,78
– в долларах США	54,98	46,71	39,41
– в евро	13,86	17,57	17,24
– в фунтах стерлингов	2,24	2,39	2,71
– в японской иене	4,93	2,72	1,94
– в швейцарском франке	0,18	0,12	0,08
– в других валютах	1,24	1,33	1,40
Требования, не идентифицированные по валютам	22,57	29,17	37,22
Развитые страны	100,0	100,0	100,0
Требования, идентифицированные по валютам:	89,98	88,00	87,53
– в долларах США	63,32	59,68	58,02
– в евро	15,72	19,63	21,00
– в фунтах стерлингов	2,74	2,37	2,57
– в японской иене	6,57	4,28	3,86
– в швейцарском франке	0,12	0,16	0,15
– в других валютах	1,50	1,88	1,93
Требования, не идентифицированные по валютам	10,02	12,00	12,47
Развивающиеся страны и страны с развивающимися рынками	100,0	100,0	100,0
Требования, идентифицированные по валютам:	56,78	50,31	47,79
– в долларах США	41,27	31,21	28,15
– в евро	10,79	15,10	14,97
– в фунтах стерлингов	1,40	2,40	2,79
– в японской иене	2,25	0,85	0,78
– в швейцарском франке	0,27	0,07	0,04
– в других валютах	0,80	0,68	1,07
Требования, не идентифицированные по валютам	43,22	49,69	52,21

* Составлено на основе данных МВФ.

Банк России в плане раскрытия структуры резервов является более открытым. По его

⁴ Рассчитано автором на основе данных World Gold Council. <http://www.gold.org>.

данным, в России международные резервы на конец I полугодия 2009 г. на 46,8 % были представлены долларом, на 42,5% – евро, на 9,7% – английским фунтом и на 1% – японской иеной [8, с. 8]. Еще в середине 2006 г. доля доллара в резервах России составляла 51,5% [6, с. 23]. Она уменьшается как вследствие физической реструктуризации резервов, так и отрицательной переоценки доллара к евро. В последнее время также отмечается рост международных резервов России в английской валюте. Низкий интерес к японской иене обусловлен почти нулевыми процентными ставками по депозитам в этой валюте и политикой снижения ее курса по отношению к ведущим валютам, проводимой японским правительством с целью стимулирования экспорта и реально возможной в силу изначальной переоцененности иены.

Заметим, что в ходе кризиса повысился интерес государств также к канадскому и австралийскому доллару как резервной валюте: они продемонстрировали свою относительную стабильность. Китай активно продвигает идею о превращении своего юаня в резервную валюту и переводе расчетов с некоторыми странами, в частности с Россией, на национальные валюты. МВФ открыто заявляет о намерениях создания новой межнациональной валюты: «В качестве безотлагательной реформы можно предложить внедрение подкрепленной официальными гарантиями мультивалютной резервной системы. Хорошо продуманная многосторонняя финансовая система могла бы создать равные условия для всех сторон и помогла бы избежать несправедливой конкуренции, а также асимметричных последствий корректировки валютных курсов. Такая система также помогла бы усилить стабильность международной финансовой системы путем уменьшения вероятности кризиса, при котором отток капитала от единственной резервной валюты приводит к далеко идущим последствиям для всей мировой экономики» [5, с. 9]. Американский финансист Джордж Сорос [1] и профессор Гарвардского университета Джеффри Френкел [9] высказывают идею о том, что основой для проектирования межнациональной валюты может стать SDR.

По структуре активов международные резервы России на 01.07.2009 г. распределялись следующим образом: 84,4% – государственные ценные бумаги иностранных эмитентов с высоким рейтингом; 2,7% – негосударственные ценные бумаги, 7,7% – депозиты; 5,2% сделки РЕПО [8, с. 8]. Заметим, что для ценных бумаг к валютному риску добавляется риск изменения котировок вследствие неустойчивости финансовых рынков. Кроме того, любые номинальные активы подвержены риску инфляции, в связи с чем Банк России проявляет интерес к так называемым индексируемым облигациям [7, с. 12-17].

Таким образом, международные резервы играют страховую функцию в экономике. Самостоятельными проблемами являются определение степени их обеспеченности и достаточности в экономиках разного типа, а также оптимизации их структуры и эффективного управления. Последнее приобретает новое звучание в ситуации неустойчивости мировой валютной системы и воздействия рисков мирового масштаба.

Библиографический список

1. Идея новой резервной валюты встретит серьезное сопротивление со стороны США // Финанс. 27.03.2009. URL: <http://www.finansmag.ru/news/8890>.
2. **Киреев, А.П.** Прикладная макроэкономика: учебник / В.П. Киреев. – М.: Международные отношения, 2006. – 456 с.
3. **Малкина, М.Ю.** Анализ динамики объемов и структуры золотовалютных резервов государства: в поисках экономической стратегии / М.Ю. Малкина // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2008. № 4. С. 2-16.
4. **Малкина, М.Ю.** Анализ динамики объемов и структуры золотовалютных резервов государства: в поисках экономической стратегии // Финансовая аналитика: проблемы и решения. 2008. № 5. С. 12-24.

5. Мировое экономическое положение и перспективы на 2008 год (русский вариант) / Организация Объединенных Наций. – Нью Йорк, 2008. URL: <http://www.imf.org/external/russian/pubs/ft/weo/2008/02/pdf/sumr.pdf>.
6. Обзор деятельности Банка России по управлению валютными активами. – М., 2007. Вып. 1. – 28 с.
7. Обзор деятельности Банка России по управлению валютными активами. – М., 2009. Вып. 4(12). – 24 с.
8. Обзор деятельности Банка России по управлению валютными активами. – М., 2010. Вып. 1(13). – 28 с.
9. Финансы & развитие // МВФ. Вып. 46. № 3. Сентябрь 2009. URL: <http://www.imf.org/external/pubs/ft/fandd/rus/2009/09/pdf/frankel.pdf>.
10. Банк России. Официальный сайт. <http://www.cbr.ru>.
11. International Monetary Fund. Официальный сайт. <http://www.imf.org>.
12. World Gold Council. Официальный сайт. <http://www.gold.org>.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

M.Yu. Malkina

OFFICIAL FOREIGN RESERVES MANAGEMENT IN CONDITIONS OF GLOBAL RISKS

Article examines dynamics of foreign reserves in the world, level of their security in different countries, indicators of their sufficiency and changes in their structure. It is concluded that in situation of coming crisis of international monetary system foreign reserves management should take into consideration national as well as global risks.

Key words: official foreign reserves, level of reserves security, indicators of reserves sufficiency, structure of foreign reserves, risks of reserving, foreign reserves management.

УДК 339.9

А.Г. Чумаков, И.Б. Гусева

АНАЛИЗ ПРЕДПОСЫЛОК И ФАКТОРОВ РАЗВИТИЯ КОНТРОЛЛИНГА НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ АВИАСТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

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

В работе выполнен анализ предпосылок и факторов развития контроллинга научно-производственных предприятий авиастроительной отрасли. Рассмотрены цели создания службы контроллинга, его функции. Предложен перечень инструментов оперативного и стратегического контроллинга для реализации и использования в целях совершенствования управления научно-производственным предприятием в современных условиях хозяйствования.

Ключевые слова: контроллинг, научно-производственное предприятие, технология управления предприятием.

Отечественная экономика продолжает свое развитие под воздействием объективных и субъективных факторов, стремясь, с одной стороны, к свободному, рыночному типу, с другой – чутко реагирует на управляющие и регулирующие действия со стороны государства. Руководство страны сегодня продолжает ставить задачу роста экономики не только за счет ресурсного потенциала, но и роста её промышленной и научной составляющей, обновления технического и технологического парка, внедрения инноваций, применения новых знаний. «...Мы должны начать модернизацию и технологическое обновление всей производственной сферы. По моему убеждению, это вопрос выживания нашей страны в современном мире», – говорится в послании Федеральному Собранию Президента Российской Федерации Д.А. Медведева.

Локомотивами инновационного развития экономики должны стать производственные и научно-производственные предприятия, повышение эффективности управления которыми остается актуальной задачей. В этой сфере экономики необходимо ориентироваться как на накопленный опыт управления, так и современные управленческие технологии, которые позволяют вскрыть и исследовать неиспользованные резервы и невостребованный потенциал.

Контроллинг на предприятии – это гармоничное и оптимальное сочетание опыта и знания ведущих и главных специалистов с современными инструментами анализа, прогнозирования и подготовки вариантов управленческих решений.

Теория и практика контроллинга в научно-производственной среде авиастроительной отрасли является недостаточно изученной с точки зрения организации и методики внедрения. Рассмотрим основные факторы, влияющие на результативность данного процесса:

Предпосылки внедрения контроллинга

В современных условиях развития экономического потенциала России наукоемкие, нацеленные на внедрение прогрессивных технологий и инноваций научно-производственные предприятия авиастроительной отрасли позиционируются как основная движущая сила экономического роста данной отрасли промышленности. Нацеленность на достижение и удержание высокого уровня конкурентоспособности приобретает стратегическое значение как для данной ведущей отрасли, так и для экономики государства в целом.

За последние два десятилетия на большинстве научно-производственных предприятий подходы к организации управленческого процесса, стили, методы управления принципиально не менялись, несмотря на значительное изменение внутренних и внешних экономических условий. На предприятиях в составе корпораций со стопроцентным государственным акционерным капиталом имеет место расширение номенклатуры выпускаемой продукции и номенклатуры НИОКР. Одновременно увеличивается номенклатура комплектующих и материалов, происходит усложнение

и наращивание технологий, расширение производственных площадей, рост числа и уровня сложности оборудования, возрастание объемов выпускаемой продукции в количественном и денежном выражении, увеличение и усложнение отчетности, расширение внутрикорпоративных взаимоотношений, повышение требований к качеству и срокам поставок.

Таблица 1

**Предпосылки внедрения контроллинга
в научно-производственный сектор авиастроительной отрасли**

№ п/п	Предпосылки
1	Развитие общекорпоративной идеологии управления научно-производственным предприятием
2	«Консервативность» организационной структуры управления научно-производственным предприятием, даже при усложнении ведения бизнеса о в связи с вхождением его в состав корпорации (концерна, холдинга)
3	Разнонаправленность целей основных сегментов деятельности – научного и производственного
4	Неприспособленность традиционного бухгалтерского учета для выполнения детального финансового анализа результатов научной и практической деятельности
5	Дисбаланс соотношения затраты/результаты для научной и производственной деятельности, требующий регулярного мониторинга и управления
6	Недостаточная регламентация функций управления научной деятельностью
7	Недостаточность качественных критериев оценки эффективности управления научными разработками
8	Недостаточность мотивации производственного персонала в достижении целей научного направления
9	Отсутствие или неактуальность документированных методик при выполнении совместных задач и функций научного и производственного направлений
10	Ограниченность информационно-аналитической составляющей функции менеджмента бизнес-процессов научного и производственного направлений
11	Ограниченность применения современных управленческих инструментов, адекватных новым экономическим условиям
12	Жесткие требования к контролю и поддержанию системы качества авиастроительного научно-производственного предприятия в актуальном состоянии и её эффективного управления в соответствии со стандартами качества
13	Большой объем разнородной информации в связи с многовариантностью продукции для различных видов летательных аппаратов, условий их эксплуатации, поставки на экспорт или по госзаказу с различными тактико-техническими характеристиками
14	Большой объем информации, требующий обработки и анализа в связи с необходимостью отслеживания жизненного цикла продукции авиастроения
15	Широкий спектр специфических требований к качеству техпроцессов производства продукции, разрабатываемой и выпускаемой для авиастроительной отрасли
16	Внедрение на предприятиях отечественных и зарубежных информационных систем стандартов MRP, ERP, APS

Соответственно существенно возрастает объем информации о внешних и внутренних экономических факторах, усложняющих управление таким предприятием и требующих их мониторинга, группировки, обработки, оценки и анализа в целях выработки качественных управленческих решений.

Предприятия, ориентирующиеся на повышение эффективности научно-производственной и финансово-хозяйственной деятельности, сталкиваются с необходимостью внедрения современных управленческих методов, позволяющих эффективно и объективно оценивать результаты всех направлений деятельности. Для научно-производственных предприятий основными направлениями деятельности являются ведение НИОКР и производство готовой продукции.

Необходимость анализа результатов и координации деятельности предприятия в целом и отдельных его направлений в частности характерна практически для всех научно-

производственных предприятий. Без анализа и оценки эффективности бизнес-процессов и деятельности подразделений и служб такого предприятия невозможно качественно отслеживать и эффективно влиять на текущие результаты деятельности организации и тенденции её развития, выявлять оптимальные пути решения производственных задач, безошибочно задавать направление вектора научных исследований.

Для научно-производственных предприятий характерно сочетание высокой сложности и специфичности исследований и научных разработок с одновременным производством неотреботанных макетных и опытных образцов разрабатываемых изделий и серийных образцов продукции.

Эффективно реализовать управленческие функции на научно-производственном предприятии, где одновременно необходимо управлять бизнес-процессами, лежащими в различных плоскостях экономического развития, каждая из которых имеет свой жизненный ритм, свои характерные аспекты научно-производственной и финансово-хозяйственной деятельности, в сегодняшних экономических условиях весьма затруднительно.

Современное руководство, нуждаясь в новых подходах и методах управления и понимая, что без эффективной стратегии, без оптимально структурированной отчетности и сбалансированной системы анализа показателей невозможно результативно управлять, принимает попытки внедрения и развития инструментов контроллинга. При этом в отечественной теории и практике контроллинга на научно-производственных предприятиях недостаточно методических разработок, позволяющих безболезненно осуществлять его внедрение и использование его инструментов.

Выделим основные предпосылки внедрения контроллинга на научно-производственных предприятиях авиастроительной отрасли (табл. 1).

Цель и задачи службы контроллинга научно-производственного предприятия

Цель развития службы контроллинга – повышение качества управления научно-производственным предприятием за счет единой информационно-аналитической и методической платформы.

Основные задачи службы контроллинга:

- управление процессами текущего анализа плановых и фактических показателей в целях исключения или минимизации ошибок, отклонений и просчетов в управлении предприятием в настоящем и в будущем;
- своевременное определение и принятие противодействующих мер относительно негативных или критических отклонений;
- обеспечение оперативной и достоверной аналитической информацией Генерального директора, его заместителей и руководителей подразделений в целях принятия качественных и своевременных управленческих решений, направленных на повышение эффективности деятельности путем построения оптимальных взаимосвязей целей, ресурсов и результатов.
- развитие комплексной системы аналитической, информационной и инструментальной поддержки Генерального директора и его заместителей по направлениям в целях оптимального управления основными бизнес - процессами на предприятии: выпуском готовой продукции и выполнением НИОКР в их гармоничном сочетании.
- обеспечение своевременной, качественной отчетности на независимой основе перед соответствующими инстанциями (вышестоящими органами управления и контроля по формам и требованиям, получаемым по вертикали управления).

Функции службы контроллинга

Основными функциями службы контроллинга являются:

- сбор информации о развитии контроллинга в промышленности, отрасли, корпорации, обобщение и изучение указанных сведений, разработка методологических, организационных и технических мероприятий по развитию контроллинга на предприятии;

- участие в работах и координация работ по развитию комплексной информационной системы на предприятии, в т.ч. подсистем АСУП, САПР, АСУТП, системы электронного документооборота, внутренней управленческой отчетности и др. для развития и поддержания эффективности информационных каналов и потоков в целях контроллинга;
- разработка предложений в целях повышения эффективности применения компьютерных программ автоматизации учета и управления, в т. ч. вновь внедряемых, в целях обеспечения сбора, обработки, анализа и прогноза, согласования данных с финансово-экономическими службами, а также с другими поставщиками информации;
- разработка предложений, участие в разработке и внедрении системы мониторинга, контроля и регулирования текущих отклонений фактических результатов производства и НИОКР от запланированных показателей в разрезе объектов и субъектов контроля;
- выполнение анализа комплекса унифицированных показателей научно-производственной и финансово-хозяйственной деятельности предприятия в сравнении с показателями лидера отрасли (корпорации), разработка предложений по улучшению собственных указанных показателей;
- разработка методологии и выполнение основных видов анализа факторов и событий внешней среды, таких как анализу: анализ отраслевых и корпоративных факторов; конкурентной среды; региональных факторов; регионального рынка труда; рынка технологий; рынка материальных ресурсов; финансовых ресурсов; социально-политических факторов; а также и внутренней среды: анализ выпуска продукции и выполнения НИОКР; технических ресурсов; технологических ресурсов; материальных ресурсов и анализ затрат по направлениям НИОКР и производства; трудовых ресурсов; маркетинга; финансового состояния;
- исследование результатов анализа, формирование резюме и предложений по оптимизации деятельности подразделений и предприятия в различных разрезах, прогнозирование динамики результатов деятельности, выявление внешних и внутренних факторов позитивного и негативного влияния на развития научного и производственного направления и их взаимосвязи;
- составление прогнозов, прогнозных планов, прогнозных бюджетов по различным направлениям деятельности;
- составление отчетов и предоставление необходимой информации в различных аналитических разрезах для выработки управленческих решений руководством предприятия с учетом экономического взаимодействия с корпорацией и её субъектами;
- разработка предложений к утверждению развернутой системы показателей оценки научного направления, производственного направления, а также показателей оптимального взаимодействия указанных направлений;
- разработка и внедрение методов и утверждение критериев оценки показателей собственно управления по направлениям деятельности предприятия: научного и производственного;
- разработка предложений по развитию системы ответственности за качество управления по направлениям деятельности предприятия;
- участие в построении и развитии системы сбалансированного управления затратами на НИОКР и выпуск готовой продукции по государственному заказу и коммерческим контрактам, ее информационно-методическая поддержка;
- формирование объективной оценки репутации, финансового и технического состояния поставщиков и подрядчиков в целях обеспечения качества поставок;
- формирование объективной оценки покупателей и заказчиков в целях обеспечения гарантированной и своевременной оплаты поставок готовой продукции и выполнения НИОКР;
- разработка методических инструкций и стандартов предприятия.

Инструменты контроллинга

В процессе работы могут использоваться следующие инструменты оперативного и стратегического контроллинга [1]:

- нерегламентированные сводные отчеты в различных разрезах бизнеса;
- CVP-анализ (анализ соотношений затраты/объем/прибыль);
- ABC-анализ (объемно-стоимостной анализ с классификацией объектов);
- XYZ-анализ (анализ структуры потребления с классификацией объектов);
- стоимостной анализ;
- финансовый анализ;
- CF-анализ (анализ потоков денежных средств);
- анализ предельных издержек;
- анализ величин в точке безубыточности;
- маржинальный анализ;
- анализ конкуренции;
- анализ рисков;
- разработка сценариев и прогнозов развития;
- прогнозное планирование;
- прогнозное бюджетирование;
- анализ потенциала;
- анализ «собственное производство / поставки со стороны»;
- анализ затрат по центрам ответственности;
- анализ загрузки мощностей;
- анализ показателей эффективности по подразделениям;
- GAP-анализ (комплексный анализ позиций предприятия на рынке);
- SWOT-анализ (комплексный анализ сильных и слабых сторон, возможностей и угроз);
- STEP-анализ (анализ социальных, технологических, экономических и политических факторов);
- бенчмаркинг (сопоставление с эталоном или лидером отрасли/корпорации и предложение путей развития до показателей лидера).

Порядок создания отдела контроллинга

Предлагается следующий порядок создания отдела [3]:

- определение: целей создания отдела, пользователей и заинтересованных лиц;
- определение статуса отдела и его основных функций, необходимых для достижения поставленных целей;
- назначение начальника отдела (примечание: подпункты, указанные выше, реализуются в приказе по предприятию);
- формирование внутренней структуры и штатного расписания отдела;
- разработка должностных инструкций и положения об отделе, в которых подробно отражаются цели, задачи и функции;
- создание схемы взаимодействия отдела с другими звеньями системы управления предприятием;
- разработка стандартов предприятия по направлениям работы отдела;
- подбор и обучение персонала.

Персонал отдела контроллинга

Количественный состав отдела индивидуален для каждого предприятия, в качестве ведущих специалистов привлекаются инженеры-программисты, инженеры-экономисты в сфере автоматизации учета и управления производственной и финансово-хозяйственной деятельностью предприятия, имеющие способность к аналитическому и логическому мышлению.

Желательны опыт и знания специалистов отдела контроллинга в области бухгалтерского и налогового учета, организации управления предприятием, планировании, бюджетировании, финансовом анализе, основах построения комплексных информационных систем предприятия, основах математического моделирования экономических процессов, технической специфики продукции, специфики технологических и производственных процессов [2].

Подчинение отдела контроллинга

Как показывает первая отечественная практика, отдел контроллинга чаще всего находится в непосредственном подчинении Генерального директора или заместителя Генерального директора по экономике и финансам.

Таким образом, являясь разработчиком «технологии» эффективного управления, служба контроллинга призвана обеспечить эффективное достижение стратегических и оперативных целей научно-производственного предприятия.

В современных условиях система управления научно-производственным предприятием авиастроительной отрасли трансформируется в соответствии с новыми условиями хозяйствования. Результатом такой трансформации и является внедрение технологий и инструментария контроллинга, который находится на стыке учета, контроля и координации, связывает и интегрирует воедино эти области, но при этом не подменяет собой управление предприятием, а лишь позволяет повысить качество управления.

Библиографический список

1. **Гусева, И.Б.** Инструментальная база контроллинга. Ч. 1 // Контроллинг. 2007. № 4 (24). С. 20–29.
2. **Фалько, С.Г.** Контроллинг для руководителей и специалистов / С.Г. Фалько. – М.: Финансы и статистика, 2008. – 272 с.
3. **Хорохордин, Н.Н.** Служба внутреннего аудита: этапы создания, цели и задачи // Аудиторские ведомости. 2007. №10. – СПС «Консультант плюс» версия 40000.00.14 [электронный ресурс]

*Дата поступления
в редакцию 06.04.2010*

A.G. Chumakov, I.B. Guseva

BACKGROUND AND FACTOR ANALYSIS OF THE CONTROLLING DEVELOPMENT FOR RESEARCH-AND-PRODUCTION ENTERPRISE OF THE AIRCRAFT BRANCH

The background and factor analysis of the controlling development for research-and-production enterprises of the aircraft branch is carried out. The purposes for establishing service and its functions are considered. The operative and strategic controlling tool set for implementation and use for purpose of a research-and-production enterprises control improvement under modern management conditions is offered.

Key words: controlling, research-and-production enterprise, technology of management enterprise.

УДК 338.242.2

О.В. Глебова, О.Ю. Мельникова

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ МЕТОДОЛОГИИ СТРАТЕГИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

Рассматриваются этапы развития методологии стратегического менеджмента. Особое внимание при этом уделено концепции ресурсного подхода. Также выявлены тенденции дальнейшего развития методов стратегического управления предприятием. Предлагается типология динамических способностей.

Ключевые слова: стратегическое управление, менеджмент, ресурсный подход, бизнес-портфель, стратегия.

Введение

Характерной чертой современного управления предприятием является усиление внимания к стратегическим аспектам менеджмента. Это связано с решением проблемы постоянного развития предприятия в соответствии с непрерывно изменяющейся внешней средой. Предметом дальнейшего рассмотрения являются современные концепции стратегического управления.

Этапы развития методов стратегического управления

В современной литературе авторы в основном делают акцент на эволюционном развитии концепции стратегического управления, например, в работе [6] выделяются следующие этапы ее развития:

1. Первоначально (в 1960-х годах) стратегия фирмы рассматривалась как результат процесса определения долгосрочных целей компании в условиях ограничений внутреннего и внешнего окружения. Состыковка факторов внутренней и внешней среды рассматривалась в качестве источника конкурентного преимущества. Единственным подходом к организации стратегического управления рассматривалось долгосрочное планирование.

2. Второй этап, который относится к 1980-м годам, сформировался под влиянием работ таких ученых, как Ф. Котлер, М. Портер, Дж. Траут и др. Благодаря работам М. Портера, фокус исследований несколько сместился: основное внимание стало уделяться не состыковкам и соответствиям внутренней и внешней сред, а конкурентным преимуществам фирмы. В рассматриваемый период во многом под влиянием «отцов-основателей» теории маркетинга сформировался так называемый «рыночный подход», в рамках которого конкурентное преимущество рассматривалось с позиции его рыночной трактовки.

3. В начале 1990-х годов в методологии стратегического управления наметился третий этап, который можно назвать доминирующим, по крайней мере, в зарубежной литературе и по сей день. На первое место вышла так называемая «ресурсная парадигма». Согласно ей, основными источниками конкурентных преимуществ признаются внутренние факторы организации, а именно: *организационные способности и ресурсы* компании. В отличие от рыночного подхода, организационные способности и ресурсы рассматриваются как источники долгосрочных, устойчивых конкурентных преимуществ, так как основаны не на «маркетинговых ходах», которые могут быть легко реплицированы конкурентами, а на труднокопируемых сочетаниях ресурсов.

Отметим, что указанные подходы не следует считать альтернативными, то есть взаимоисключающими: при разработке стратегии должны приниматься базовые решения как по «состыковкам» с внешней средой (по портфелю бизнесов компании), так и по «ресурсам» как источникам устойчивых, относительно независимых от рыночной конъюнктуры конкурентных преимуществ, и по видению будущего компании и ее стратегическим целям. Такой

подход объединяет результаты всех трех отраженных выше этапов развития стратегического управления.

Таким образом, методология стратегического управления развивалась как бы «нарастающим итогом» (рис. 1).

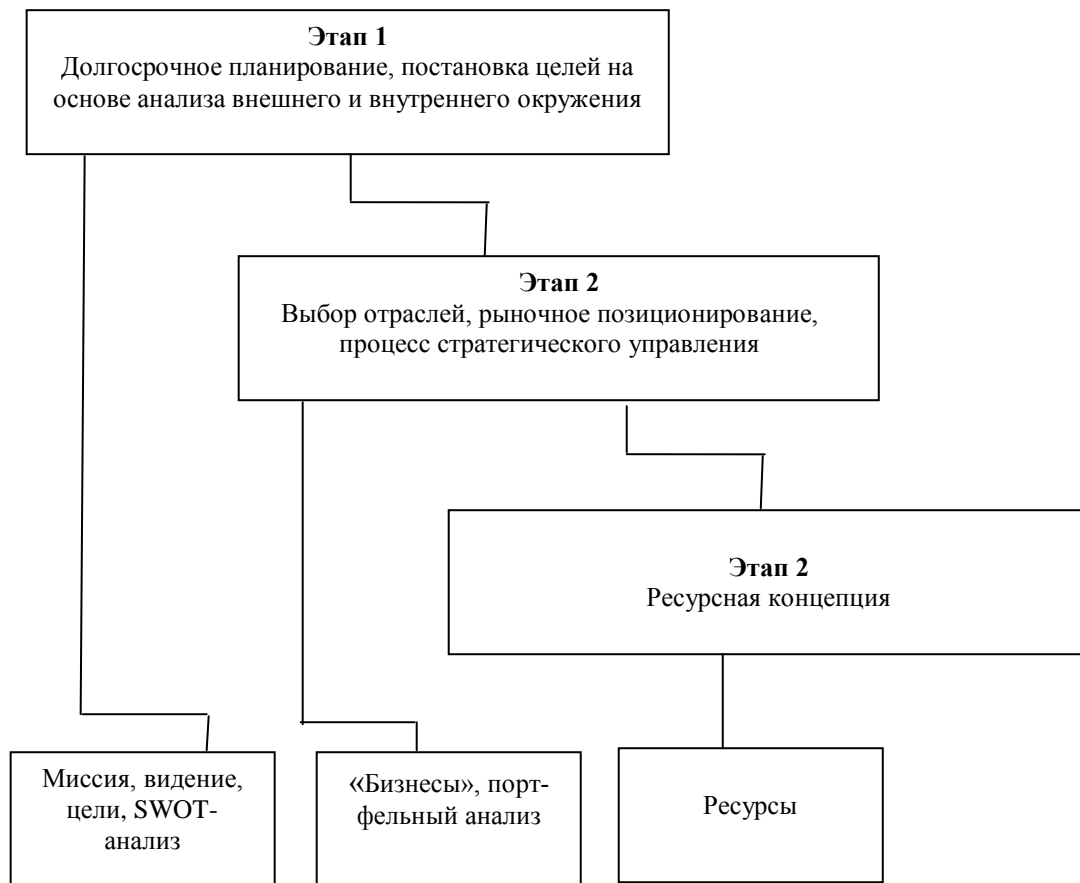


Рис. 1. Развитие методологии стратегического управления «нарастающим итогом»

Как видно из рис. 1, в современной методологии стратегического управления нашли отражение все три этапа.

Концепция ресурсного подхода

Отличительной характеристикой ресурсного подхода является концентрация на внутренних факторах компании. Как отмечается в литературе, ресурсный подход (resource-based view) предполагает наличие связи между ресурсами компании и ее успехом в конкурентной среде [1]. В рамках ресурсного подхода компания рассматривается как комплекс соответствующих ресурсов, генерирующих ренты.

Таким образом, основная особенность ресурсного подхода заключается в том, что он рассматривает внутренние источники конкурентоспособности и повышенной рентабельности капитала компании (иными словами – внутренние источники рента) [1]. При этом издержки, связанные с переносом (копированием) ресурсов одной организации другой организацией, могут быть высокими, иногда – запретительно высокими: организации, работающие в одном секторе экономики, могут быть неидентичны с позиции ресурсов, которые они контролируют; сами ресурсы могут быть непереносимы от одной организации к другой; вследствие чего такие ресурсные различия могут носить постоянный характер. На практике, ресурсы часто связаны с результатами управленческой деятельности и потому могут быть вообще непереносимы между компаниями.

В этой связи необходимо несколько более подробно рассмотреть понятие ресурсов – в

той трактовке, в которой оно используется в рамках ресурсного подхода. В одной из работ представлено следующее определение данной концепции: «Материальные и нематериальные активы, которые на относительно постоянной основе связаны с компанией» [5]. Данное определение может создать ложное впечатление о том, что ресурсы могут приобретаться на открытом рынке, и что они должны сопровождаться инвестированием средств для создания соответствующих активов. Но это не совсем так, в рамках ресурсного подхода в качестве ресурсов, являющихся основой конкурентных преимуществ, вовсе не всегда должны выступать именно активы.

Вместе с тем, в работах некоторых авторов присутствует более четкое разделение ресурсов и способностей организации. В частности, в одной из работ предлагаются следующие трактовки. Ресурс – это актив или вход производственного процесса (материальный или нематериальный), которым организация владеет, который она контролирует или имеет доступ на относительно постоянной основе. Способность – это физическая возможность организации выполнять набор взаимосвязанных задач, используя ресурсы, с целью достижения практического результата [3]. Кроме того, в отдельную категорию ресурсов выделяются бизнес-процессы – так называемые организационные рутины, или процедуры. Под ними понимаются регулярные, отработанные схемы скоординированных действий персонала организации.

Ресурсы должны соответствовать четырем требованиям, и в таком случае они могут рассматриваться как источники конкурентных преимуществ компании:

- ценность (value);
- редкость (rare);
- невозможность точной имитации (imperfectly imitable);
- незаменимость, или отсутствие заменителей (non-substitutable) [2].

В англоязычной литературе совокупность этих качеств ресурсов обозначается аббревиатурой «VRIN».

Ценность ресурса имеет место в том случае, когда он способен генерировать ренты, которые могут быть присвоены фирмой. Редкость означает, что данный ресурс не является распространенным среди компаний-конкурентов, что позволяет обеспечивать либо более высокую маржу, либо объем продаж за счет его использования [2]. Невозможность точной имитации ресурса предполагает трудности для конкурирующих компаний его репликации; чем более трудно копируемым является ресурс, тем в большей степени он может рассматриваться как источник присваиваемой ренты [2]. Незаменяемость – ресурс может быть назван незаменимым в случае, если он не может быть легко заменен другим ресурсом, дающим аналогичный эффект.

Развитие методологии ресурсного подхода на этом не остановилось. Дело в том, что само по себе представление компании не как административной единицы, а как комбинации ресурсов, обладает некоторой статичностью: сами по себе комбинации ресурсов могут обеспечить текущую конкурентоспособность; вместе с тем, в условиях динамично меняющейся среды, высококонкурентных рынков остро встает вопрос управления будущей конкурентоспособностью организации.

В частности, в научной литературе отмечается, что в его классическом виде ресурсный подход не учитывает следующих факторов современной бизнес-среды:

- 1) высокий темп технологических изменений;
- 2) рост ожиданий клиентов;
- 3) развитие стандартов качества в глобальном масштабе;
- 4) рост ожиданий сотрудников относительно автономии принятия решений.

Концепция динамических способностей

Следующим шагом в развитии методологии стратегического управления становится появление концепции динамических способностей. Действительно, если деятельность компании по обеспечению долгосрочных конкурентных преимуществ рассматривается как создание или приобретение трудно копируемых ресурсов и способностей, возникает задача об-

новления этих ресурсов и способностей, которые могут устаревать в результате действия тех или иных факторов – технического прогресса, развития конкурентов и др. Следовательно, в рамках исследований аспектов «будущей» конкурентоспособности компании объективно назрела необходимость введения новой концепции, которая бы отражала способности компании к обновлению ресурсов.

Таким образом, можно говорить об особом типе организационных способностей – способностей, которые не используются непосредственно в производственном процессе продукции, но связаны с умением организации превентивно управлять развитием факторов своей конкурентоспособности.

Д. Тис с соавторами одним из первых ввел в научный оборот понятие динамических способностей, под которыми подразумеваются «способности компании к интеграции, формированию и реконфигурации (совершенствованию) внутренних и внешних компетенций для того, чтобы обеспечить соответствие быстрым изменениям внешней среды» [7].

Позднее Тис несколько конкретизировал свою научную позицию касательно сущности динамических способностей: «Динамические способности включают труднокопируемые способности предприятия, связанные с адаптацией к изменяющимся возможностям рынка и технологии. Они также включают способность компании влиять на систему, в которой она существует, развивать новые продукты и процессы, разрабатывать и внедрять жизнеспособные бизнес-модели» [4].

В одной из современных работ Д. Тис [4] указывает понятие динамических способностей может быть декомпозировано на следующие составляющие:

- 1) способность выявлять возможности и угрозы;
- 2) способность использовать возможности;
- 3) поддержание конкурентоспособности через улучшение материальных и нематериальных активов.

Важным является упоминание способности выявлять возможности и угрозы. Фактически, управление рисками рассматривается Тисом как один из компонентов динамических способностей.

На наш взгляд, учитывая сущность динамических способностей, как способностей к обновлению или созданию конкурентных преимуществ, можно выделить следующие их типы:

1. Связанные с менеджментом организации:
 - в области стратегического управления;
 - в области оперативного управления и совершенствования бизнес-процессов.
2. Связанные с инновациями:
 - в области НИОКР;
 - в области продуктовых инноваций;
 - в области организационного обучения.
3. Связанные с формированием альянсов.

Некоторыми авторами предпринимались попытки выделения исчерпывающих составов ключевых концепций ресурсного подхода. Д. Тис предложил следующую типологию:

- факторы производства: ресурсы, которые доступны для открытого приобретения на рынке;
- ресурсы: трудновоспроизводимые (либо вообще невозпроизводимые) активы компании. Включают материальные и нематериальные активы (в т.ч. опыт);
- компетенции: отличительные организационные рутины, которые осуществляются с использованием соответствующих активов;
- ключевые компетенции: труднокопируемые способности; определяют успех компании в основной сфере ее деятельности;
- продукты: следствие использования компанией ее компетенций;
- динамические способности: определяют возможности компании в плане адаптации к изменяющимся условиям внешней среды [4].

Выводы

Проведенное в данной статье исследование позволяет сделать выводы.

В настоящее время формируется следующий этап теории стратегического менеджмента, основанный на динамической концепции. Недостатком ресурсного подхода является отсутствие задачи обновления ресурсов предприятия. Наиболее эффективным способом обеспечения долгосрочного выживания предприятия на рынке являются способность компании не только создавать уникальные конкурентные преимущества, но иметь способность к их изменению в быстроизменяющейся внешней среде.

В связи с этим в данной работе предлагается типология динамических способностей как способностей создания и обновления конкурентных преимуществ:

- связанные с менеджментом;
- связанные с инновациями;
- связанные с формированием альянсов.

Библиографический список

1. Barney, J. Firm resources and sustained competitive advantage // Journal of Management, 1991, 17 (1). P. 99-120.
2. **Bowman, C.** Competitive and Corporate Strategy / C. Bowman, D.O. Faulkner . - IRWIN, 1997. P. 2-4.
3. **Helfat, С.Е.** The dynamic Resource-Based View: Capability Lifecycles / С.Е. Helfat, М.А. Peteraf // Strategic Management Journal. 2003. 24 (10). P. 997-1010.
4. **Teece, David J.** Dynamic Capabilities and Strategic Management / David J .Teece. – Oxford University Press Inc., New York, 2009. P. 299.
5. **Wernerfelt, В.** A resource-based view of the firm // Journal. 1984. (5).
6. **Каткало, В.С.** Эволюция теории стратегического управления: монография / В.С. Каткало. – 2-е изд., исправ. и доп. - СПб: Изд-во «Высшая школа менеджмента»; Издат. дом С.-Петерб. гос. ун-та, 2008. – 548 с.
7. **Тис, Д.Дж.** Динамические способности формы и стратегическое управление / Д.Дж. Тис, Г. Пизано, Э. Шуен // Вестн. С.-Петерб. ун-та. Сер. Менеджмент. 2003. Вып. 4. С. 133-185.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

O.V. Glebova, O.J. Melnikova

MODERN PROGRESS OF METHODOLOGY OF STRATEGIC MANAGEMENT TRENDS

The stages of development of methodology of strategic management are examined in the article. The special attention is here spared to conception of resource approach. Further progress of methods of strategic management an enterprise trends are also educed. The types of dynamic capabilities are offered.

Key words: strategic management, management, resource approach, dusiness bref-case, strategy.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 572

И.В. Комадорова, Н.Д. Пономарева

КОНТИНУИТИВНОСТЬ ГЕОМЕТРИЧЕСКОГО И ФИЛОСОФСКОГО СТИЛЕЙ МЫШЛЕНИЯ (ЭПИСТЕМОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ СРЕЗА «КЛАССИКА-ПОСТКЛАССИКА-ПОСТНЕКЛАССИКА»)

Камская государственная инженерно-экономическая академия

Статья посвящена проблемам поиска новых путей в области научно-философских исследований в начале XXI в. В центре внимания авторов процесс обогащения традиционных моделей науки идеями и методами специально-научных дисциплин, превращение философии науки в междисциплинарную область исследования. С этой целью анализируется извечный параллелизм философского и геометрического стилей познания в контексте становления типов научной рациональности. Авторы предпринимают попытку обоснования континуитивности геометрии и философии для обогащения эпистемологической методологии.

Ключевые слова: параллелизм, стиль познания, философский и геометрический стили, континуум, эпистемология, этика, априоризм.

В современном гуманитарном знании актуальной становится проблема поиска новых путей в области научно-философских исследований. В связи с чем следует обратиться к этимологии термина «континуум»[1]: континуум (от лат. *continuus* – сплошной, непрерывный) – непрерывная совокупность. Таким образом, континуитивность (непрерывность) может быть охарактеризована как постоянная, неразрывная связь, а также переход одного в другое. В нашем случае – это неразрывная связь геометрии и философии, являющая собой атрибутивную характеристику теоретико-познавательных (эпистемологических) процессов. Отметим, что термин «континуум» употреблялся и в древнегреческой философии, и в трудах средневековых схоластов, т.е. в период формирования доклассического типа рациональности, хронологически охватившего время от античности до эпохи Ренессанса. Принцип континуума противоположен принципу атомизма, предполагающего прерывность, дискретность [2].

Философский подход к объяснению явлений действительности в качестве извечной проблемы любого мировоззрения обозначает выявление первенства либо мира, либо человека. Современный этап формирования научной системы знаний предполагает снятие противопоставления субъекта и объекта: «...больше не существует деления на поле реальности (мир), поле репрезентации (книга) и поле субъективности»[3]. Поливариантность существующих как в философии, так и в геометрии методов вселяет уверенность в дальнейшем успешном продвижении философии науки к одной из своих целей, которая может быть обозначена, к примеру, так: способствовать поддержанию интереса к вопросам как? и почему? возможна реальность и ее понимание, а значит, максимальное приближение к истине.

Интересна трактовка истины, данная Б. Шоу, – истина не знает супружеской верности: ее объятия всем; согласимся в данной связи с мнением американского философа Р. Рорти о

том, что реальность одна, описаний ее множество. На каждом уровне познания мира человек постигает все новые грани своей природы и назначения, а, по мнению М. Сера, эпистемология и гносеология покоятся в антропологии – в отношениях между обществом и миром, культурой и природой [4]. Каждый человек (субъект познавательной деятельности) многомерен и многосложен, чем обуславливается и специфика его взглядов на мир; так, американский философ А. Уоллес применяет понятие «лабиринт» для обозначения полной структуры индивидуального познания о себе, окружающем мире, включая память, абстрактное знание и правила мышления [5]. Это означает на деле, что каждый индивид являет собой местоположение сложноорганизованного набора восприятия, мышления и его результатов, т.е. обладает уникальным познавательным кодом, описать который непросто в силу его сложной организации. Заметим, что память (в частности, как иллюстрация априорного знания), абстрактное знание (как иллюстрация сапиенсности и результатов «предварительного просмотра будущих событий», как определил воображение А. Эйнштейн) и правила мышления (как иллюстрация, в частности, бытующих в конкретный момент времени рационалистических установок) вкуче есть не что иное, как теоретико-познавательный (эпистемологический) арсенал, данный человеку.

Сопоставляя философский и геометрический стили мышления нельзя не заметить имманентно присущего им акта воображения, которое носит эвристический (а значит, методологический) характер. Оно выступает как познавательная деятельность, осуществляемая на основе мысленной программы, фиксирующей цели и задачи субъекта и позволяющей формировать как наглядные образы, так и понятия посредством синтеза чувственного и логического. Деятельность воображения связана проблемной ситуацией. Ее разрешение состоит в создании некоторого предвосхищения искомого решения путем построения гипотез, планов. Важные функции принадлежат здесь воображению, выступающему средством формирования нового знания. Роль воображения в процессе творческого познания можно определить как один из имеющихся у человека способов получения новых знаний, как перенос знаний с одной области на другую.

Думается, что трудно не согласиться с бытующим мнением о том, что философия и математика (геометрия) являют собой пример извечного параллелизма сосуществования, в частности, в силу их методологической дополняемости: философия исследует качественные бытийственные характеристики, а математика (геометрия) – количественные. Все восточные доктрины без исключения, равно как и древние доктрины Запада, утверждают превосходство умозрения над действием, превосходство того, что неизменно, над тем, что подвержено изменению. Свидетельством тому служат слова Плотина о том, что геометрия, принадлежа к умопостигаемому, должна быть помещаема там, поскольку она – более высокая мудрость, имеющая дело с бытием.

Выявление общего в философском и геометрическом стилях мышления, иллюстрируется, в частности, тем, что в геометрии существуют исходные положения, способные стать отправной точкой для последующего процесса познания (к примеру, так называемые «начала», взятые в качестве названия главного труда Евклида). Доказательный геометрический порядок, привлекавший многие философские умы, достаточно вспомнить «Этику, доказанную в геометрическом порядке» Спинозы, а также воображение, обладающее колоссальным диалектическим зарядом, способны составить логичную (благодаря доказательному порядку) и красивую (благодаря воображению) систему философских умозаключений [6].

Обратимся далее к иллюстрации стойкой приверженности геометрическому базису философов из обозначенной вначале нашей статьи триады становления научной рациональности. Так, в классический период приверженцами идеалистической концепции реализма, начало которой было положено еще Платоном, явились Г. Лейбниц, И. Ньютон. Продолжателями идей математического эмпиризма, фундамент которого был заложен Аристотелем, стали Р. Декарт, Д. Дидро, Гельвеций, Кондорсе, Р. Бэкон, Т. Гоббс, Д. Локк; также близки были данные взгляды математикам XIX в. – Лобачевскому, Гауссу, Риману. Отметим, что основ-

ной философский вопрос математики – об отношении математики к реальной действительности – возродил к жизни два «лагеря» (платоников и аристотеликов). Приверженцы первого считают математические объекты помещенными между миром чувственно воспринимаемых вещей и миром идей (Платон различал арифметику и геометрию в соответствии с природой их понятий: числа для Платона относятся к миру идей, в то время как геометрические объекты являются идеальными только наполовину, так как они связаны с чувственными образами и поэтому занимают промежуточное положение между миром идей и реальным миром); приверженцы аристотелизма трактуют математические понятия как отвлеченные (абстрагированные) от реальных вещей [7].

Взгляды Канта (априоризм) на природу математики были очень популярны до середины XIX в., отдельные положения кантовского учения разделялись А. Пуанкаре и К. Р. Поппером. Так, К.Р. Поппером выдвигается концепция «трех миров», согласно которой «математика и... весь третий мир созданы человеком» [8]. Здесь представителем постпозитивизма, в частности, затрагивается и наглядность (*ad hoc*) как важная черта геометрического метода: объекты математики (геометрии) являются продуктами творческой деятельности математиков, подчиняются они, однако, собственным закономерностям, поддающимся анализу независимо от деятельности, в результате которой они появились.

Дж. Берли и Д. Юм рассматривали математику с позиций субъективного идеализма, т.е. понятия и законы геометрии и математики являются продуктами свободного мышления людей. Позитивизм в математике, включая его третью (неопозитивизм) и четвертую (постпозитивизм) стадии, нашел свое отображение, в частности, в трудах Р. Карнапа и Л. Витгенштейна. Кризис математики начала XX в. породил такие направления, как логицизм (Г. Фреге, Б. Рассел), формализм (Д. Гильберт) и др.

На наш взгляд, впечатляющий характер носит ряд философских персоналий, чье творчество сопряжено с опорой на поиск философских оснований геометрии: Д. Беркли, Л. Витгенштейн, И. Кант, А. Пуанкаре, А. Эйнштейн др. Континуитивность геометрии и философии далее будет прослежена по работам Д. Беркли и А. Пуанкаре. Почему именно они? Ответим таким образом: эпоха Нового времени отмечена особенно тесным взаимодействием философии и математики, ярким примером чего являются выводы Д. Беркли, что математика издавна была объектом философского внимания. Что касается взглядов А. Пуанкаре, то основная тематика, волнующая его в контексте иллюстрации континуитивности философии и геометрии следующая: французский философ и математик в качестве проблемного поля избирает не логицизм, а эпистемологию [9]. Подход Пуанкаре к математике фундаментализирует связь ее с познанием внешнего мира.

Позиция Беркли противоположна аристотелизму (см. выше). Доктрина абстрактных объектов, с его точки зрения, есть следствие ложных представлений о языке и значении языковых выражений, т.е. абстрактный объект есть невозможный объект, так как его невозможно описать. В конечном итоге, данное обстоятельство позволило Беркли трактовать математику как науку о воспринимаемых чувствами, а не об абстрактных объектах. Объектом геометрии он называет протяжение, причем, как нетрудно догадаться, это протяжение носит не абстрактный характер. Если принять во внимание сенсуалистическую позицию Беркли, увидим, что она привела его к противостоянию с наукой геометрией, причем его не смущает тот факт, что из принятых им философских принципов исходит невозможность корпуса евклидовой геометрии. Однако в дальнейшем (и этим доказывается истинная приверженность избранному философскому поприщу, аналогичную приверженность проиллюстрировал и Л. Витгенштейн, который, как известно, в работе «Философские исследования» почти полностью опровергает положения своего первого труда «Логико-философский трактат»), он осознает необходимость разработки своих собственных исходных философских установок с целью избавления от противоречий с принятым геометрическим знанием и, используя теорию репрезентации, достигает возможности одновременного признания и принципов своей гносеологии, и основных предложений геометрии

[10]. Итак, отношение Беркли к геометрии таково: геометрия носит инструменталистский характер, причем с подчеркнутой полезностью, т.е. геометрия должна быть наукой о чувственно воспринимаемых протяженных количествах.

Несмотря на многочисленную критику идей Беркли, его заслугой можно считать: а) отсутствие пиетета по отношению к философии математики: им выдвинут лозунг «свободомыслия» в математике; б) смелость, последовательность в отстаивании эмпиризма в философии математики, и, как следствие, отбрасывание абстрактных идей и трактовка геометрии как практически полезной системы манипуляций с символами («чертеж есть сложный символ, который может представлять конкретную ситуацию отчасти по условию, отчасти потому, что подобен ей в каких-то отношениях. Этот сложный символ может использоваться как модель конкретной ситуации для получения дополнительных знаний об этой ситуации») [11].

Таким образом, приведенные соображения Беркли по поводу природы геометрического знания, могут быть резюмированы. В качестве промежуточного вывода данной статьи – континуитивность философии и геометрии являет собой и способ построения новых цепочек символов, и извлечение дополнительной информации из символических структур. Уместным здесь будет очередное упоминание неопозитивиста Л. Витгенштейна, который математику трактовал как совокупность символических исчислений, что в контексте нашей работы иллюстрирует последовательный эмпиризм в философии математики ведет от Дж. Беркли к Л. Витгенштейну (заметим, что последний не был эмпириком): оба критичны и независимы по отношению к принятым взглядам и остро осознают границы возможностей эпистемологии (научного познания).

Выше уже упоминалось, что отдельные положения кантовского априоризма разделялись А. Пуанкаре, переход к рассмотрению взглядов которого после анализа взглядов Беркли в данной работе носит последовательный характер. Пуанкаре трактует математическое доказательство как дедуктивный вывод, опирающийся на особый (не строго логический) аспект взаимосвязи посылки и заключения. По мнению М. Детлефсена (США), Пуанкаре согласился бы, что с любым математическим доказательством может быть сопоставлено логицистское. Однако оно не будет являться адекватным эпистемологическим отображением исходного (математического) доказательства в силу утратой им важнейших эпистемологических характеристик [12].

Итак, никакое подлинно математическое доказательство не может быть данным в логицистском виде, потому что математическое рассуждение (и здесь Пуанкаре последовательный кантианец) – это не логическое отношение между предложениями, а эпистемическое отношение между суждениями. Напомним, что по Канту (и, следовательно, для Пуанкаре), синтетичность вывода, т.е. «новостная» информация, связана с синтезирующей деятельностью сознания. Таким образом, синтезирующая деятельность является условием приобретения математического знания. Еще один аспект рассуждений Пуанкаре по поводу природы математического знания связан с необходимостью вчувствования в структуру рассматриваемой области, что принципиально отличает математическое знание от просто логического. И в этом, на наш взгляд, в очередной раз мы находим свидетельство континуитивности философского и геометрического стилей мышления.

Дальнейший ход рассмотрения взглядов Пуанкаре необходимо предполагает уточнение моментов согласия Пуанкаре с учением Канта об априорном синтетическом характере евклидовой геометрии. Как известно, к концу XIX в. кантовские представления устарели. Следуя Канту, Пуанкаре говорит о том, что математика синтетически априорная наука, однако никакая геометрия не является таковой и заявляет о том, что арифметическая интуиция есть эпистемологическое основание для множества математических принципов, любые построенные логицистов предполагают математическую интуицию. Однако учение конвенционалиста Пуанкаре об интуиции содержит еще один пласт, а именно геометрическую интуицию, или интуицию континуума [13]. Он был ориентирован на строгость и точность в математике, ко-

торая невозможна без интуитивного обоснования математики. Аксиомы должны опираться на интуицию: интуитивные «образы» нужны, так как благодаря им обнаруживается соприкосновение с реальным миром. Интуитивно приемлемые аксиомы обнаруживают, что нет принципиальных препятствий для нашей возможности математического доказательства и тем самым признается, что не существует математических истин, выходящих за пределы нашей познавательной способности. В целом, не принимая во внимание гипотетичность новой системы его воззрений, задуманной незадолго до смерти, отметим, что познание по Пуанкаре требует как интуиций, так и понятий, и в этом еще одна связь с воззрениями Канта [14].

Таким образом, Пуанкаре близка срединная между интуиционизмом и платонизмом позиция именно в силу различия им двух типов интуиции – арифметической и геометрической, а значит, как и Кант, он видит в познании результат взаимодействия рассудка (арифметической интуиции) и чувственного познания, связанного с интуицией геометрической. Перманентное видение связи математики с познанием внешнего мира иллюстрирует особенность еще одной позиции Пуанкаре: он считал, что идея «четвертого измерения», идея «многомерного пространства» указывает путь, по которому можно прийти к расширению нашего понятия о мире, и ввел время как четвертую мнимую координату.

Таким образом, мы видим, что сила принудительного стереотипа мышления («благодаря» которой, к примеру, зарождающаяся научная мысль средневековья должна была согласовывать свои умозаключения с догматами церкви, а неклассическая, даже отчасти постнеклассическая наука, – с классическим типом рациональности) долго держала многих ученых мужей в шорах своей предубежденности. Те же, в числе которых А. Пуанкаре, Н.И. Лобачевский и др., кто не упрямялся в своем невежестве, двигали научную мысль, отпочковавшуюся как все мы обязаны помнить от философской, вперед. Как отмечает Л.А. Микешина, эпистемология XXI в. должна основываться (вбирать в себя) не только идеалы естествознания, но и богатейший опыт наук о культуре, художественного видения мира [15], а значит, добавляем мы, здесь незаменимый характер будет носить и методология геометрического мировидения. Что же касается континуитивной связи геометрического и философского стилей мышления, то, на наш взгляд, она может иметь междисциплинарный характер и читаться как отдельный курс в цикле «История и философия науки» (однако необходимо учесть следующее: «... Преждевременное неметодическое сгущение может погубить всю дальнейшую работу» [16]).

Библиографический список

1. Философский энциклопедический словарь. – М.: ИНФРА-М, 2007. С. 220.
2. Философия эпохи постмодерна. – Мн., 1996. С. 29.
3. **Сокулер, З.А.** Зарубежные исследования по философским проблемам математики 90-х гг. Научно-аналитический обзор / З.А. Сокулер. – М., 1995. С. 9.
4. **Комадорова, И.В.** Американская культурная антропология о факторах социокультурной динамики / И.В. Комадорова. – М.: Academia, 2005. С. 294.
5. **Пономарева, Н.Д.** О взаимосвязи геометрического и философского мышления (на примере математических школ античности) // Социум: проблемы, анализ, интерпретации: сб. науч. тр. – М.: МПГУ. 2006. Вып. V. С. 431-433.
6. **Перминов, В.Я.** Философия и основания математики / В.Я. Перминов. – М.: Прогресс-традиция, 2001. С. 106.
7. **Перминов, В.Я.** Философия и основания математики / В.Я. Перминов. – М.: Прогресс-традиция, 2001. С. 94.
8. **Сокулер, З.А.** Зарубежные исследования по философским проблемам математики 90-х гг. Научно-аналитический обзор / З.А. Сокулер. – М., 1995. С. 35.
9. **Dauben, J.** Appendix (1992): Revolutions revisited // *Revolutions in mathematics*. – Oxford, 1992. – P. 72-82.

10. **Sherry, D.** Don't take me half the way: On Berkeley on mathematical reasoning // Studies in history a.philosophy of science. – Oxford; Elmsford, 1993. V. 24. N. 2. – P. 207-225.
11. **Detlefsen, M.** Poincare'vs. Russell on the role of logic in the mathematics. – Philosophia mathematica. Ser. 3. – N.Y.: Ontario, 1993. V. 1. N. 1. – P.24-49.
12. **Сокулер, З.А.** Зарубежные исследования по философским проблемам математики 90-х гг. Научно-аналитический обзор / З.А. Сокулер. – М., 1995. С. 27.
13. **Сокулер, З.А.** Зарубежные исследования по философским проблемам математики 90-х гг. Научно-аналитический обзор / З.А. Сокулер. – М., 1995. С. 41.
14. **Микешина, Л.А.** Значение идей Бахтина для современной эпистемологии / Философия науки // Философия науки в поисках новых путей. – М., 1999. Вып. 5.
15. Лекции и выступления М.М.Бахтина 1924–1925 гг. в записях Л.В. Пумпянского; Публ. Н.И.Николаева// М.М.Бахтин как философ. – М., 1992. С. 241.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

I.V. Komadorova, N.D. Ponomareva

**CONTINUOUVITY OF GEOMETRICAL
AND PHILOSOPHICAL STILES OF THINKING
(EPISTEMOLOGICAL ASPECT OF CLASSIC,
POST-CLASSIC, POST-NON-CLASSIC)**

The article is devoted to issues of new ways in the field of scientific-philosophical researches at the beginning of XXI century. The authors accentuate the process of enrichment of traditional models in science with new ideas and methods of specially-scientific disciplines; transformation of Philosophy Science into interdisciplinary field of study. For this purpose eternal parallelism of philosophic and geometric cognition styles is examined in context of types-of-scientific-rationality formation. The authors attempt to substantiate continuation of geometry and philosophy for enrichment of epistemological methodology.

Key words: parallelism, style of knowledge, philosophical and geometrical styles, continuum, epistemology, ethics, apriorism.

УДК 37.013.77

Е.Е. Щербакова, С.С. Савичев

**РАЗВИТИЕ КОММУНИКАТИВНЫХ СПОСОБНОСТЕЙ
СТУДЕНТОВ С ПОЗИЦИИ КОМПЕТЕНТНОСТНОГО ПОДХОДА**

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет»

Статья посвящена развитию коммуникативных способностей у студентов в русле компетентностного подхода. Особое внимание уделяется педагогическим условиям формирования коммуникативных компетенций у студентов вуза

Ключевые слова: способности, коммуникативная компетентность, учебный процесс в вузе.

В современных условиях наиболее актуальными в педагогике являются проблемы содержания и качества образования. В настоящее время для повышения качества образования одним из востребованных становится компетентностный подход.

Как отмечает И.А. Зимняя, в России происходит переориентация оценки результата образования с понятий «подготовленность», «образованность», «общая культура» на понятия «компетенция», «компетентность» [2].

Повышение качества образования является одной из актуальных проблем для всего мирового сообщества. Решение этой проблемы связано с модернизацией содержания образования, оптимизацией способов и технологий организации образовательного процесса и, конечно, переосмыслением цели и результата образования. В общем контексте европейских тенденций глобализации Совет Культурной Кооперации (СДСС) высшего образования для Европы определил те основные ключевые компетенции, которые в результате образования должны освоить молодые специалисты. Соответственно и цель образования стала соотноситься с формированием ключевых компетенций, что отмечено в «Концепции модернизации российского образования на период до 2010 года» [3]. И одной из основных компетенций является коммуникативная компетентность, которая рассматривается как способность человека действовать в конкретной жизненной ситуации, выстраивать общение и взаимодействие с другими людьми.

Коммуникативная компетентность относится к базовым компетентностям современного человека. Можно выделить несколько составляющих: лингвистическая (языковая), социолингвистическая (умение использовать языковой материал в соответствии с контекстом), социокультурная (умение пользоваться знаниями истории, культуры, традиций и обычаев стран изучаемого языка), дискурсивная (умение организовать речь, поддержать разговор, слушать собеседника, учитывать его точку зрения), стратегическая (умение ставить задачи, добиваться цели, устанавливать контакт с собеседником), и социальная – умение поставить себя на место другого и способность справиться со сложившейся ситуацией.

В основу формирования коммуникативной компетенции у студентов на занятиях иностранным языком положен деятельностный подход, так как он развивает самостоятельную творческую активность каждого учащегося. Обучение предполагает на первоначальном этапе совместную образовательную деятельность под руководством педагога, а затем самостоятельную, уделяя большое внимание практической стороне вопроса.

Развитие коммуникативной компетенции – процесс длительный и достаточно сложный. Особую сложность в преподавании иностранного языка представляет соотнесение предметного курса и реального речевого опыта студентов, процесс приобретения знаний о языке и процесс овладения языком.

Выбор методов формирования и становления коммуникативной компетентности дол-

жен обуславливаться целями обучения, содержанием учебного материала, профессиональной мотивацией студентов, необходимостью выработки коммуникативных навыков и умений, нужных в практической деятельности. Такими методами формирования и становления коммуникативной компетентности могут быть: чтение проблемных лекций и докладов с активным участием будущих специалистов и иностранных студентов, проведение деловых игр, тестирование, анкетирование, индивидуальные беседы и тренинги, работы парами, в командах и т.п.

Пути реализации коммуникативной компетенции учащихся состоят в том, что формы, методы и приемы работы направлены на то, чтобы содержание учебного материала было источником для самостоятельного поиска решения проблемы.

Коммуникативная компетенция обеспечивает:

- совершенствование умений и способностей общения в учебно-научной, социально-бытовой, социально-культурной, официально-деловой сферах общения;
- овладение формами речевого общения в процессе различных видов деятельности;
- развитие умения и способностей работы с учебным научным текстом, другими источниками информации;
- совершенствование умений интерпретации информации в соответствии с самостоятельно найденным и заданным основанием.

Коммуникативные компетенции формируются на основе общеучебных умений и навыков, а также предметных учебных умений, навыков и способов деятельности.

Мы предполагаем, что можно выделить четыре уровня коммуникативной компетентности:

- неосознанная;
- репродуктивная;
- продуктивная;
- творческая.

Каждый из выделенных уровней характеризуется определенными критериями.

Критерием первого уровня мы считаем несамостоятельную деятельность студента, построенную на подсказках педагога, когда он доминирует в учебной деятельности и требует исключительно правильных ответов от ученика, не признавая его права на ошибку и диалог. Такая ситуация имеет место в том случае, когда не повезло с педагогом или учащийся испытывает большие трудности в формировании общих учебных понятий и способов учебной деятельности.

Критерием второго, репродуктивного, уровня является наличие лингвистических знаний у студента при недостаточном умении их применять, репродуктивная деятельность выполняется по памяти или по заданному алгоритму, педагог ожидает от учащегося успешного выполнения задач, требующих простых мыслительных операций с данными, а также организует обмен независимыми высказываниями между студентами.

Критерием третьего, продуктивного, уровня выступает достаточное владение учениками лингвистическими умениями: методами анализа, синтеза, сравнения, обобщения; при этом синтез лингвистических знаний и умений используется как инструмент познания. Для учащихся этого уровня характерна уже самостоятельная продуктивная деятельность, выполняемая по самостоятельно созданному алгоритму или принятому типовому алгоритму, преобразованному в ходе самого действия. Мыслительная деятельность опосредована словесно-логической формой. Педагог организует самораскрытие, взаимопонимание и стремление к взаимораскрытию учеников, достигая высокого уровня социальной реализации студентов как в деятельности общения и обучения, так и в создании индивидуального культурного продукта учебной деятельности (письменного текста).

Критерием четвертого, творческого, уровня является самореализация компетентной личности, способной к самостоятельной творческой учебной деятельности на базе обретенных знаний, умений, ценностей и смыслов. Студент ставит и решает задачи, требующие обобщения данных и творческого мышления, стремится к пониманию другого с целью поис-

ка новой истины, вступает в «партнерство» (В.Я. Ляудис), транслируя социальную ответственность – высший уровень социализации [4].

Среди выделенных нами четырех уровней сформированности коммуникативной компетентности языковой личности наивысшим является четвертый уровень – творческая компетентность. Студенты, вышедшие на четвертый, творческий, уровень коммуникативной компетентности, не только успешны в учебе и социально реализованы, но и ориентированы на взаимопомощь другим студентам, на партнерство – высшую ступень. Ученик готов нести ответственность за совместно созданный в учебной деятельности продукт (текст), который высококультурен и по лингвистическим, и по смысловым показателям.

В практике общения каждый речевой акт выступает как та или иная типологическая разновидность, поэтому при обучении речевому общению необходимо говорить о типологии или жанре текста (определенной модели, имеющей внешние признаки, закрепленные традицией). Тексты, предлагаемые студентам на занятиях по иностранному языку, разнообразны по жанру: эпизоды художественных произведений, научно-популярные, проблемные статьи.

В ходе работы с литературным текстом или текстом о культуре педагогу необходимо создать развивающую речевую среду, побуждающую студента вступить в диалог не только с конкретным текстом о культуре, но и с текстом культуры, подобно тому, как в коммуникативном пространстве культуры текст вступает в диалогические отношения с другими текстами.

Развивающая речевая среда может быть создана на любой лекции, но особое значение приобретают лекции интегрированного типа, которые позволяют соединить лингвистический и культурологический подходы к анализу текста. В результате такой работы с текстом происходит формирование культуры общения с произведениями искусства, воспитание эстетического чувства слова и желание выразить словом свои мысли и переживания. Таким образом, достигается единство процесса обучения и воспитания.

В качестве педагогических условий формирования коммуникативной компетентности нами были предложены следующие: внедрение в педагогический процесс соответствующего элективного курса; направленность учебно-воспитательного процесса на установление личностно ориентированного взаимодействия; применение активных методов обучения, интеграция в массовую культуру страны изучаемого языка.

Система элективных курсов позволяет в более углубленной, развернутой форме вооружать студентов теми знаниями и умениями, которые необходимы для эффективной жизнедеятельности обучающегося, но не входят в обязательную, инвариантную часть содержания образования.

Направленность учебно-воспитательного процесса на установление личностно ориентированного взаимодействия – следующее, на наш взгляд, педагогическое условие развития коммуникативной компетентности.

Основываясь на разработках И.С. Якиманской [1, С. 56], мы полагаем, что проектирование личностно ориентированной системы обучения подразумевает: признание студента субъектом педагогического процесса; развитие индивидуальных способностей обучающегося, в частности, развитие коммуникативной компетентности, применяя те методы обучения, которые активизируют деятельность каждого студента.

Исходя из этого, следующим педагогическим условием, способствующим развитию коммуникативной компетентности студентов, является применение в педагогическом процессе активных развивающих методов обучения.

И наконец, для успешного овладения языковой практикой, и преодоления межнациональных барьеров необходима интеграция в массовую культуру страны изучаемого языка, под которой мы понимаем активные методы речевой коммуникации со студентами-иностранцами, изучение не только исторической (классической), но и современной массовой культуры страны через просмотр кинофильмов, спектаклей, статей в зарубежных СМИ, обсуждение актуальных молодежных тем на факультетах иностранных языков с привлечением студентов с кафедры ЮНЕСКО и т.д.

Большинство научно–практических трудов свидетельствуют о том, что коммуникативную компетентность ученика удобнее всего рассматривать по продукту его учебной деятельности – по письменным текстам, созданным самостоятельно. В то же время коммуникативная компетентность ученика выступает как состоявшееся личностное качество, несущее определенную смысловую нагрузку характеристики субъекта. Многие ученые согласны с тем, что определяющим условием для формирования коммуникативной компетентности учащихся является организация в учебном процессе коммуникативных ситуаций, при которых педагог создает коммуникативное взаимодействие с учениками и между учениками, оценивая результаты работы через учебный продукт – текст или высказывание (в устной и письменной формах).

Коммуникативная компетентность включает в себя знание основных лингвистических понятий речи (стили, типы речи, композиционная основа описания, рассуждения, повествования, способы связи предложений в тексте, а также синтаксические и пунктуационные основы языка), умения и навыки анализа текста как критического разбора текста заданного жанра и стиля и, наконец, собственно коммуникативные умения, то есть умения и навыки речевого общения применительно к различным сферам и ситуациям общения с учетом личностных характеристик адресата и стиля общения: делового, научного, разговорного. Работу по лингвистическому анализу текста необходимо организовывать на каждом занятии по иностранному языку, так как цели и задачи этой работы способствуют формированию важнейших коммуникативных умений у учеников – умения создавать свой собственный устный и письменный текст, отвечающий ожиданиям оппонентов, умения отразить в тексте гуманистические ценности, свежесть и новизну суждений, высокий уровень языковой культуры.

Особенно значимыми в обучении являются специальные уроки, на которых осуществляется комплексный анализ предложенных ученикам текстов. Такие уроки органичны при повторении, обобщении и систематизации изученного (в начале, в конце учебного года, семестра, после изучения темы, раздела). К таким текстам обязательно прилагаются разноуровневые задания, и особенно важно, что студент имеет возможность выбора (можно выполнять не все задания к тексту). Разноуровневые вопросы и задания к одному тексту удобны для организации работы в группах, по вариантам. Принцип тематического единства, на основе которого происходит организация работы на каждом уроке, также важен для формирования развивающей среды, способствующей приобщению студентов к культуре речевого самовыражения через создание активной деятельностной социальной среды.

Коммуникативная компетенция – это владение определенной суммой сведений языкового материала, умение соотносить языковые средства с задачами и условиями общения, а также способность организовать речевое общение с учетом социальных норм поведения и коммуникативной целесообразности высказывания. В учебном процессе решающее значение приобретает тот факт, что изучающий иностранный язык должен овладеть им как средством межкультурной коммуникации, что предполагает необходимость формирования у него лингвострановедческой компетенции, являющейся неотъемлемой частью коммуникативной компетенции.

Коммуникативное обучение иностранным языкам представляет собой преподавание, организованное на основе заданий коммуникативного характера, т. е. общения. Коммуникативно-ориентированное обучение имеет целью научить иноязычной коммуникации, т. е. общению на иностранном языке, используя все необходимые для этого (не обязательно только коммуникативные) задания и примеры.

Конечной целью обучения иностранным языкам является обучение свободному ориентированию в иноязычной среде и умению адекватно реагировать в различных ситуациях, то есть общению.

В практике реализации коммуникативно-ориентированного обучения иностранному языку до сих пор актуальны поиски технологий, способных увязать обучение языку с обучением культуре, обслуживаемой этим языком. Чтобы научиться общению на иностранном

языке, нужно создать реальные, настоящие жизненные ситуации (т.е. то, что называется принципом аутентичности общения) посредством современной массовой культуры, близкие и понятные студентам, которые будут стимулировать изучение материала и вырабатывать адекватное поведение.

Цель коммуникативного подхода состоит в том, чтобы заинтересовать обучаемых в изучении иностранного языка посредством накопления и расширения их знаний и опыта. Обучаемые должны быть готовы использовать язык для реальной коммуникации вне занятий, например, во время посещения страны изучаемого языка, во время приёма иностранных гостей дома, при переписке, обмене аудио- и видеокассетами, результатами заданий и т. п. При этом термин коммуникативность «не сводим только к установлению с помощью речи социальных контактов, к овладению туристическим языком. Это приобщение личности к духовным ценностям других культур – через личное общение и через чтение» (И. Л. Бим). Этот подход привлекает обучаемых путем сосредоточения на интересующих их темах и представления им возможности выбора текстов и задания для достижения целей программы. Коммуникативная способность обучаемых развивается через их вовлечение в решение широкого круга значимых, реалистичных, имеющих смысл и достижимых задач, успешное завершение которых доставляет удовлетворение и повышает их уверенность в себе.

Коммуникативный подход, с одной стороны, включает в себя обучение языку, а с другой, дает определенные сведения о стране и культуре изучаемого языка. В процессе обучения иностранному языку в этом аспекте элементы страноведения сочетаются с языковыми явлениями, которые выступают не только как средство коммуникации, но и как способ ознакомления обучающихся с новой для них действительностью. Образовательная же ценность лингвострановедческого компонента заключается в том, что знакомство с культурой изучаемого языка происходит путем постоянного сравнения имевшихся ранее знаний и понятий с вновь полученными, со знаниями и понятиями о своей стране.

Лингвострановедческий компонент, как это понимают Е.М. Верещагин и В.Г. Костомаров, – культуроведение, ориентированное на задачи и потребности изучения иностранного языка, важная составляющая преподавания иностранного языка, интегрирующая в междисциплинарном курсе историю, культурологию, литературу и т.п.

Изучающие иностранный язык должны знакомиться с языковыми единицами, наиболее ярко отражающими национальные особенности жизни народа-носителя языка и среды его существования.

Творческий элемент коммуникативного подхода позволяет организовать в учебном процессе применение иностранного языка в продуктивной деятельности, включая общение, сферу обслуживания, бизнес, менеджмент, юриспруденцию, занятие искусством, самообразование. В этом слиянии речевого и экстраречевого аспектов проявляется онтологическая сущность речевого общения, которое с необходимостью включается в продуктивную деятельность обучающихся.

В то же время многие специалисты подчеркивают, что обучение иностранному языку должно происходить с учетом требований, предъявляемых будущей профессиональной деятельностью обучаемого. Для этого используют профессионально-ориентированное общение на иностранном языке, осуществляемое с помощью устно-речевой деятельности и/или коммуникативной деятельности. Проблема профессионально-ориентированного общения рассматривается в работах С.Ф. Шатилова, М.Е. Дуранова, О.Ю. Искандаровой, Л.В. Коломиец, Л.В. Макар, А.Л. Мирзоян, Н.И. Прокопьевой, В.А. Сырецкой и др.

Рассмотрим наиболее общие современные концептуальные принципы коммуникативного обучения иностранным языкам с учётом как российской, так и зарубежной теории.

Принцип 1. Коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам в условиях деятельностного подхода.

Коммуникативное обучение иностранным языкам носит деятельностный характер, поскольку речевое общение осуществляется посредством «речевой деятельности», которая, в

свою очередь, служит для решения задач продуктивной человеческой деятельности в условиях «социального взаимодействия» общающихся людей. Участники общения пытаются решить реальные и воображаемые задачи совместной деятельности при помощи иностранного языка. Этот принцип детализируется в следующих принципиальных положениях:

1.1. Деятельностная сущность коммуникативно-ориентированного обучения иностранным языкам осуществляется через «деятельностные задания». Они реализуются с помощью методических приёмов и создают упражнения.

1.2. Деятельностные задания для коммуникативно-ориентированного обучения иностранным языкам строятся на основе игрового, имитационного и свободного общения.

1.3. Деятельностная сущность коммуникативно-ориентированного обучения иностранным языкам реализуется в положении «здесь и теперь». (Положение «здесь и теперь» осуществляется, если на уроке: создаются условия для речемыслительного творчества учащихся; процесс иноязычного речемышления осуществляется непосредственно в момент развития речевой ситуации; иноязычное общение представляет собой спонтанный опыт).

1.4. Деятельностная сущность коммуникативно-ориентированного обучения иностранным языкам повышает важность методической организации процесса обучения. (Дело в том, что коммуникативные задания не редко выполняются в условиях повышенной речевой и физической активности, оживление учащихся, свободного их передвижения по классу и непроизвольного усвоения ими учебного материала. В этих условиях особенно важна тщательно продуманная организация коммуникативно-познавательной деятельности в виде строго определённой процедуры. Практически любое задание может выполняться (и это повышает эффективность работы) в три этапа: подготовительный; исполнительный; итоговый).

1.5. Деятельностная сущность коммуникативно-ориентированного обучения иностранным языкам реализуется в условиях гуманистического подхода к обучению. (Гуманистический подход предполагает обучение, центрированное на ученике. Это означает, что студент, а точнее, взаимодействующие между собой студенты являются центром познавательной активности на занятии).

Принцип 2. Формирование у студентов коммуникативной компетенции.

В понятие компетенции был вложен смысл о том, что высказыванию присущи свои правила, которым подчиняются правила грамматики, и усвоение которых обеспечивает способность пользоваться языком в процессе коммуникации. Наиболее подробное описание коммуникативной компетенции принадлежит Л. Ф. Бахману. Автор относил сюда языковую, дискурсивную, разговорную, прагматическую (практическую), социально-лингвистическую, стратегическую и мыслительную компетенцию.

Рассмотрим подробнее принципиальные положения, вытекающие из принципа формирования у обучаемых коммуникативной компетенции:

2.1. Важным компонентом коммуникативной компетенции является лингвистическая компетенция, представляющая собой готовность использовать иностранный язык как орудие речемыслительной деятельности.

2.2. Существенным компонентом коммуникативной компетенции является прагматическая компетенция, представляющая собой готовность передавать коммуникативное содержание в ситуации общения.

2.3. Необходимым компонентом коммуникативной компетенции является когнитивная компетенция, представляющая собой готовность к коммуникативно-мыслительной деятельности.

2.4. Значимым компонентом коммуникативной компетенции является информативная компетенция, то есть владение содержательным предметом общения.

2.5. Коммуникативная компетенция формируется во всех видах речевой деятельности – слушании и говорении, чтении и письме, что обеспечивает их осуществление.

Принцип 3. Коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам возможно в условиях аутентичного процесса социализации студентов.

В данном контексте понятие «аутентичный» предполагает не только использование на уроке взятого из жизни учебного материала, но и создание методически целесообразных условий естественного учебного общения. Для этого в учебных условиях обеспечивается «репетиция реального употребления языка».

Рассмотрим данный принцип подробнее в принципиальных положениях:

3.1. Аутентичное коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам осуществляется с применением заданий речевого взаимодействия. (Задания построены так, что их невозможно выполнить без партнёра или партнёров. Они выполняются в парах или малых группах.)

3.2. Аутентичное коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам осуществляется с применением заданий, предполагающих «информационное неравенство» учеников.

3.3. Аутентичное коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам осуществляется с применением проблемных речемыслительных заданий. (Задания могут быть основаны на следующем: последовательности действий, догадке, классификации, нахождении сходств и различий, исключении лишнего и т. д.)

3.4. Аутентичное коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам осуществляется с применением организованного ролевого общения, (которое реализуется в ролевой игре – виде учебного общения, организуемого в соответствии с разработанным сюжетом, распределёнными ролями и межролевыми отношениями.)

3.5. Аутентичное коммуникативно-ориентированное обучение иностранным языкам осуществляется с применением спонтанного общения, имеющего следующие особенности: его содержание не всегда предсказуемо; возможны переходы от одной темы к другой; требуются незнакомые или забытые слова, грамматика; иностранный язык используется в реальном действии.

Итак, мы рассмотрели основные концептуальные принципы коммуникативного обучения иностранным языкам. Они сведены всего к трём ключевым формулировкам: «о деятельности на основе коммуникативного обучения», «о формировании коммуникативной компетенции» и «об аутентичных формах обучения».

В практике преподавания иностранных языков на современном этапе обучения используются следующие технологии: 1) обучение в малых группах сотрудничества (cooperative learning); 2) дискуссии; 3) мозговые атаки (brain storming); 4) ролевые игры проблемной направленности; 5) метод ситуационного анализа (case-study); 6) метод проектов; 7) «портфель студента» (E-Portfolio) 8) информационные технологии.

Умение вести дискуссию, отстаивать свою точку зрения, подкреплённую аргументами, лаконично излагать свою мысль, умение слушать и слышать оппонента – важные умения, необходимые для формирования коммуникативной и социокультурной компетенций.

На занятиях по устной практике английского языка очень часто итоговыми являются дискуссии по проблемам определённой тематики.

В настоящее время преподавателями широко применяются ролевые игры проблемной направленности для моделирования реальной ситуации общения на уроке иностранного языка. Ролевая игра используется для решения комплексных задач усвоения нового материала, развития творческих способностей, а также формирования коммуникативной и социокультурной компетенций. В отличие от дискуссии, в ролевой игре ее участники принимают на себя роли персонажей, как бы «вживаются» в роль. Это помогает им лучше понять суть проблемы, проникнуться особенностями массовой культуры чужой страны и найти разные способы выхода из данной ситуации от имени его персонажа.

При использовании проектной технологии обучения (метода проектов) иностранный язык в новой образовательной парадигме становится процессом самостоятельного овладения

учебной познавательной деятельностью. Комплексный интегративный характер проектной работы позволяет студенту выстраивать единую картину мира, используя для этого ранее полученные знания и навыки и приобретая новые.

Таким образом, формирование и становление коммуникативной компетентности студентов позитивно влияет на профессиональный уровень будущих специалистов, их творческую самореализацию, совершенствование их деятельности. Именно это необходимо будущим специалистам для адекватной ориентации во всех сферах общественной жизни. Изучение основ коммуникативной компетентности в вузе будет способствовать осмыслению будущими специалистами ее значимости для профессиональной деятельности.

Библиографический список

1. **Андреев, А.Л.** Компетентностная парадигма в образовании: опыт философско-методологического анализа // Педагогика. 2005. №4. С. 19-27.
2. **Зимняя, И.А.** Ключевые компетентности как результативно-целевая основа компетентностного подхода в образовании / И.А. Зимняя. – М.: Исследовательский центр проблем качества подготовки специалистов. 2004. – 40 с.
3. Компетентностный подход в педагогическом образовании; под ред. В.А. Козырева, Н.Ф. Радоновой, А.П. Тряпицыной. – СПб.: Изд-во РГПУ им. А.И. Герцена, 2005. – 391 с.
4. **Ляудис, В.Я.** Принципы психолого-педагогического проектирования инновационного обучения в школе / В.Я. Ляудис // Инновационное обучение: стратегия и практика. – М., 1994. С. 13-32.

*Дата поступления
в редакцию 30.03.2010*

E.E. Sherbakova, S.S. Savichev

DEVELOPMENT OF COMMUNICATIVE ABILITIES OF STUDENTS FROM POSITION OF THE COMPETENCE APPROACH

The article is devoted to the development of communicative abilities in students in a channel of the competence approach. The special attention is given to pedagogical conditions of formation of communicative competence at students of high school.

Key words: abilities, communicative competence, educational process of high school

УДК 37.013.32

Л.А. Шестакова, М.И. Золотарев

СОЦИАЛЬНО-ПЕДАГОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА ИНФОРМИРОВАНИЯ СТУДЕНТОВ В ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИХ ВУЗАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается социально-педагогическое обеспечение контроля качества информирования студентов в инженерно-технических вузах. Инженерно-технические вузы в современной России нуждаются в социально-педагогическом и информационном обеспечении учебного процесса, которое необходимо сопровождать обеспечением высокого уровня контроля качества.

Ключевые слова: социально-педагогическое обеспечение, учебный процесс, инженерно-техническая деятельность, инженерно-технический коллектив, контроль качества информирования студентов.

Социально-педагогическое обеспечение контроля качества информирования инженерно-технических вузов регламентируется государственными образовательными стандартами Российской Федерации и включается в общую систему организации учебного процесса. Основой социально-педагогического обеспечения учебного процесса инженерно-технических вузов является сложная система взаимодействия людей – участников инженерно-технического производственного процесса. Особенно важным здесь является социально-педагогический процесс передачи и получения информации, воспитательное воздействие и становление и развитие инженерно-технического сознания и формирования общей культуры студента. Являясь будущим участником инженерно-технического целостного производства и различных производственных процессов, студент должен обладать навыками обеспечения контроля качества информирования. Для этого необходимо привлекать все имеющиеся на сегодня инновационные технологии. К ним относятся ряд бально-рейтинговых, тестовых, опросных и контрольных заданий, которые широко применяются в современной учебной практике [1].

Феномен инженерно-технической деятельности определяется особенностями деятельности производственной. Инженер по роду своей деятельности включается в объективно существующие трудовые процессы, а значит, в социальное многоуровневое производственное взаимодействие. При этом в инженерно-технической деятельности особое значение имеет социально-производственное взаимодействие между людьми, в котором каждый человек получает определенное количество информации. При этом информация подвергается тщательному отбору, и для учебного процесса важен контроль качества информирования. Контроль информированности студента на разных уровнях его развития может осуществляться различными способами, в том числе с помощью компьютерного тестирования.

В рамках данной статьи в качестве исследования социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования инженерно-технических вузов предлагается рассмотреть опыт проведения социально-педагогического контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Такой контроль в вузе проводится на всех уровнях обучения. Это социально-педагогическая деятельность представляется весьма перспективной и важной для дальнейшего развития НГТУ в плане взаимодействия технического и гуманитарного направления современной науки.

Социально-педагогический контроль качества информирования проводится в ситуации, когда долгое время тест не считался методом социально-педагогического исследования. В результате в отечественном образовании сложилась такая ситуация, когда отстающее от требований времени и нужд практики научное обеспечение процесса тестового контроля знаний

стало одной из причин низкого качества тестов. Тестовые материалы не могли обеспечить требуемого уровня оценки и контроля знаний. Это явилось следствием того, что теория и технология разработки и использования тестовых материалов и методик проведения тестирования не получали должного развития.

Современный период измерений и оценки знаний является периодом интенсивного развития теории и практики педагогических измерений, характеризующихся широким использованием математических моделей, компьютеров, программно-инструментальных и программно-педагогических средств автоматизированного обучения, контроля и самоконтроля. Разумеется, всегда следует помнить, что тесты - не панацея от всех бед системы образования. Они могут только то, что могут, хотя уже могут достаточно многое. Однако при неправильной подготовке тестов или организации тестирования они оказываются очень опасным инструментом, позволяющим тиражировать невежество в огромных масштабах. Сейчас во многих школах и вузах находятся энтузиасты, слабо знакомые с современной теорией разработки тестов, которые создают так называемые тесты. Вот почему очень важно, чтобы используемые тестовые материалы и технологии тестирования сами проходили квалифицированную проверку, экспертизу, а их разработчики – соответствующее обучение.

Целью организованного социально-педагогического компьютерного обследования абитуриентов, студентов и выпускников является выяснения уровня информированности студента в определенной учебной сфере. Социально-педагогический контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников реализует в себе комплексный и системный подходы, сформировавшиеся в середине прошлого столетия. Комплексный и системный подходы позволяют видеть в тестировании любого уровня совокупность таких взаимосвязанных элементов, как студенты и преподаватели, различные структуры и технологии, необходимые для успешного проведения обследования в условиях быстро меняющейся современной обстановки. При этом важнейшей функцией контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников остается выполнение учебных задач, которые решает вся организация. Кроме того, особенностью организации контроля качества информирования является то, что в процессе инновационной учебной деятельности результат каждого отдельного действия осознается и переживается каждым участником инновационного проекта по-разному: как средство, как цель, как частичная цель или промежуточное средство для достижения результата. Контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников, таким образом, становится сегодня неотъемлемой частью учебной деятельности вузов.

Социально-педагогические основы организации контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников в социально-технических системах – важное направление современной педагогической науки. Проблема эффективной психологической работы в процессе контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников, как убедительно показывают современные исследователи, связана с целым комплексом педагогических проблем и использованием новейших информационных технологий. Они касаются исследования современной профессиональной и личностной деятельности подрастающего поколения. Кроме того, социально-педагогический контроль качества информирования связан также с проведением успешной коммуникации, носящей как общественно-коллективный, так и персонально-личностный характер и обусловленной установлением обратной связи между субъектами взаимодействия, в качестве которых выступают студент и вуз.

Социально-педагогический контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников дополняет эту связь наличием информационно-технических каналов взаимодействия. Это информационное взаимодействие, организованное в процессе контроля качества информирования, во многом обеспечивает решение многих психологических проблем в деятельности абитуриентов, студентов и выпускников вуза. Контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников содержит в себе элемент отслеживания этапов развития специфических способностей юношества, в котором сочетается два необходимых и, на первый взгляд, противоречивых, направления. С одной стороны, их склон-

ность к выполнению креативных, творческих, нетрадиционных задач, требующихся для выполнения учебных и развивающих заданий в процессе обучения. С другой – умение выполнять методичные действия по запоминанию необходимого материала.

Социально-педагогический контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников показывает их готовность принимать участие в учебном процессе. При этом необходимым для них является развития таких качеств, как установка на обучение, умение выполнять учебные задания, работать с большим количеством информации, взаимодействовать в процессе обучения с различными социальными группами, прежде всего, с сокурсниками и преподавателям. Контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников вуза выявляет также социально-педагогический уровень готовности их к принятию ответственных решений, их способность к сотрудничеству, готовность принять на себя роль организатора, сотрудника, а в отдельных случаях и подчиненного. Контроль качества информирования дает также возможность отследить возможность динамического сочетания творческой работы и традиционной учебно-организационной деятельности, в чем и состоит специфика учебного процесса и обучающей деятельности вуза.

Контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников технических вузов, являясь процессом организации социально-технических систем, сводится к организации учебного процесса, функций различных подразделений в этом процессе, регулированию их количества и качества деятельности, и к последовательности в общем процессе их учебной деятельности. То есть, с позиций социально-педагогического сопровождения учебного процесса, с одной стороны, имеется четко организованная управляемая социально-техническая учебная система с набором однотипных и воспроизводимых технологических учебных операций, обеспеченных психологической установкой на включение студента во всю эту систему учебной работы. А с другой – развитие индивидуального творчества студента в учебном процессе, которое обеспечивает не только овладением им умениями и навыками учебной деятельности и получение необходимых компетенций профессиональной деятельности, но и обеспечивает его личностный рост. Социально-педагогический контроль качества информирования позволяет с высокой степенью достоверности отследить этапы качественного процесса личностного достижения цели каждым конкретным студентом, включенным в определенные отношения и выполняющим определенные функции учебной деятельности. Социально-педагогический контроль качества информирования позволяет также проследить все этапы социально-педагогического сопровождения учебного процесса, который оказывается настолько сложным и информационно насыщенным, что превращает относительно простые функциональные отношения типа «студент – преподаватель», «студент-вуз» в многомерные взаимодействия типа «человек – человек», «человек – социально-техническая система».

Социально-педагогический контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников выявляет определенные закономерности, в которых технологические взаимодействия подчиняются, а иногда даже и замещаются личностными взаимодействиями. При этом цели, ради которых это взаимодействие и организовывается, должны, прежде всего, работать на повышение уровня профессиональной компетентности и личностного развития каждого студента. Организаторы контроля качества информирования, выступая в качестве организаторов и исполнителей этого социально-технического проекта, имеют дело со сложноорганизованной системой исполнительства, в которой техника выполняет свои функции, а специалисты решают свои задачи. Поэтому особое значение в компьютерном обследовании приобретает процесс интерпретации его результатов, а также овладение студентами навыками компьютерных технологий. Эти результаты показывают этапы получения базовых профессиональных компетенций, профессионального роста студентов, уровень их психологической комфортности и творческого развития в процессе стремления к достижению личностных целей. При этом с социально-педагогической точки зрения ограниченная, функциональная, структурная, строго нормированная тестовая деятельность студентов в процессе контро-

ля качества информирования провоцирует постоянное усиление рационального контроля как со стороны преподавателя – руководителя этой деятельностью, так и определяет специфику работы самого студента, вынужденного ограничиваться в своих ответах определенными словесными формулами.

Такая организация социально-педагогического контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников требует сложного контроля и постоянного обновления тестового материала, которое и приводит к желаемому результату. Вместе с тем, прогнозировать результаты социально-педагогического контроля качества информирования практически возможно только в небольшой мере. Заполняя бланки тестов, отвечая на предложенные вопросы, выполняя определенные задания, тестируемый студент нередко отвечает на них приблизительно, нехотя, неточно, психологически лишь отрабатывая необходимые навыки ответов на вопросы, не считаясь с необходимостью точного тестирования и не заботясь об общественной пользе результатов своего труда для развития данной учебной социально-технической системы. Занимая же активную социальную позицию, тестируемые студенты оказываются более подготовленными к точным ответам на вопросы, которые не только разнообразят психологические процессы взаимодействия в учебных социально-технических системах, но и существенно их дополняют.

Особенности социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования в процессе учебной деятельности студентов инженерно-технических вузов состоят в том, что результат каждого отдельного действия осознается и переживается каждым участником обследования по-разному: как средство, цель, частичная цель или промежуточное средство для достижения результата. Так, мелкие задачи и преследование частных целей вуза, превращаясь для студента в самоцель, могут привести к измельчанию самой его деятельности, что неизбежно сказывается на качестве его работы. Однако этого можно избежать, если студент и весь студенческий коллектив постоянно видят перед собой крупные задачи, вбирающие все частные, и главную цель, которой все они подчиняются. Целеустремленная деятельность, осознание перспективы развития, общий положительный эмоциональный настрой всего студенческого коллектива и каждого его члена – все это позволяет создать созидательный, творческий наполненный новый социально-педагогический контекст, в котором становится возможным решение любых учебных и производственных задач. Создание такого общего широкого и полного социально-педагогического контекста позволяет по-новому будущему специалисту осознать смыслы и внутреннее содержание инженерно-технической производственной деятельности и добиться наилучших ее результатов.

Социально-педагогическое обеспечение контроля качества информирования в учебном процессе в технических вузах с социально-педагогической точки зрения можно условно разделить на три основных направления:

- 1) профессиональное;
- 2) личностное;
- 3) творческое (креативное).

Все эти три направления основаны на развивающем принципе. Для современного инженера важно быть состоявшимся профессионалом в своей области, реализовавшей себя личностью и творчески развивающимся индивидом, способным к многосторонней креативной деятельности. Идеальным в этом процессе является совпадение личностных и общественных целей. При этом студент может даже выполнять задачи и не связанные непосредственно с решением данной проблемы, однако наличие общей цели любую его деятельность в коллективе делает личностно и общественно значимой и целенаправленной. У студента, как правило, в личностную деятельность вплетается социальный мотив – стремление выполнить свои обязательства и проявить себя, заслужив общественное признание [2, 9]. Этот аспект также учитывается в процессе социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования. Также большую роль в этом процессе играет оценка результатов обследования, посредством которой во многом осуществляется воздействие на личностный уровень информированности студента.

Оценка социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования, которая может быть как положительной, так и отрицательной, приобретает особое значение во взаимоотношениях в учебном коллективе. Вся деятельность студенческого коллектива и каждого отдельного его члена неизбежно зависит от оценочных моментов. При этом как положительная, так и отрицательная оценка может оказать благотворное действие, если она обоснована и мотивирована. Субъективное, эмоциональное влияние оценки деятельности, оказываемое на последующее развитие этой деятельности, огромно. Характерно, что независимо от того, кто эту оценку делает, она неизбежно влияет на результат деятельности. Поскольку человек – существо сознательное, он дает и предвидит оценку, оценка влияет, воздействует на его деятельность, направляя ее в ту или иную сторону, повышая или снижая ее уровень. Однако оценка все же совершается на основании результата деятельности: ее достижений или провалов, достоинств или недостатков, и поэтому она должна быть результатом, а не целью деятельности. Там, где оценка становится самостоятельной целью, где существует установка только на оценивание, человек идет, как бы минуя цель самого действия. В этом случае в деятельности наступают те или иные нарушения и отклонения.

Специфика социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования состоит в том, что характер воздействия оценки на этот вид деятельности обусловлен, прежде всего, тем, насколько правильно и благополучно она помогает делу. Вместе с тем, влияние установки на оценку как мотива учебной деятельности зависит и от характера отношения между действующим субъектом и оценивающим его деятельностью окружением. Доброжелательное окружение помогает добиваться более ощутимых результатов учебной деятельности. Недоброжелательное окружение может оказать значительное негативное действие. Попав в доброжелательную атмосферу, студенты, как правило, сразу находят себя и проявляют себя с самой положительной стороны. Следует отметить, что оценка, направленная непосредственно на действующего студента, воспринимается иначе, чем оценка, направленная на те или иные его действия. Даже резко отрицательная оценка и жестокая критика действия не особенно болезненно заденет человека, если не будет воспринята им в личностном плане. И всякая, даже относительно мягкая критика будет воспринята аффективно, если она будет представлена как оценка личности в целом [3, 15].

Положительная или отрицательная оценка в процессе социально-педагогического обеспечения контроля качества информирования того или иного студента будет воспринята по-разному, в зависимости от того, будет ли она проведена на фоне общего благожелательного или неблагоприятного отношения, будет исходить от человека, с которым установились те или иные отношения. Отрицательная оценка какого-нибудь поступка человеком, чье отношение в целом благожелательно, в известном смысле более действенна, поскольку, не задевая его личностные качества, она позволяет лучше и адекватнее оценить свои деловые и профессиональные качества. При общем отрицательном отношении такая оценка, как правило, имеет меньший эффект, так как может быть объяснена пристрастным отношением к этому человеку.

Таким образом, оценка качества информирования, направленная на то или иное действие, может иметь различный социально-педагогический эффект. Важно отметить и довести до сведения всех студентов, что социально-педагогическое обеспечение контроля качества информирования инженерно-технических вузов должно органично включаться в общую систему оценивания знаний и умений студентов. Оно само включает не только современные социально-педагогические и воспитательные технологии, но и самый широкий контекст исследований современной инженерной психологии, психологии управления, возрастной педагогики и профессиональной психологии.

Социально-педагогические аспекты контроля информирования в современных социально-технических образовательных системах отличаются большим разнообразием. Системное социально-техническое взаимодействие, проявляющееся в процессе социально-педагогического контроля качества информирования абитуриентов, студентов и выпускни-

ков базируется на отношении «человек – техника», «человек – компьютер» и оказывается сегодня востребованным во всех областях жизни, в том числе в сфере науки и образования. Человеческий и технологический фактор активно взаимодействуют между собой, проникая друг в друга, и оказываются взаимосвязанными на всех уровнях. К современным социально-техническим образовательным системам можно отнести все современные образовательные организации и предприятия: дошкольные учреждения, школы, средние специальные учебные заведения, вузы, учреждения послевузовского образования и т.д., оснащенные техническими средствами обучения. Техническое оснащение образовательных учреждений необходимо для обеспечения современного учебно-воспитательного процесса и направлено на формирование и развитие учебно-воспитательной деятельности различных профилей. Социально-педагогический контроль качества информирования абитуриентов, студентов и выпускников наглядно показывает, что общественная образовательная деятельность детерминирована включенностью человека в объективно существующие и технически организованные образовательные и воспитательные процессы [4, 6]. Организация образовательных социально-технических систем неизбежно несет в себе все личностные особенности участников учебно-воспитательных процессов и порождает своеобразный, обусловленный личностными особенностями, характер мотивации этой деятельности. Социально-педагогический контроль качества информирования является неотъемлемой частью современных социально-технических образовательных систем и органично включается в целостный процесс их функционирования.

Социально-педагогический контроль качества информирования включает в себя в качестве технического задания важнейшую составляющую – программу тестирования студентов.

Основные критерии такой программы:

- простота применения как для администрирования, так и при непосредственном использовании;
- надёжность работы;
- возможность приведения иллюстрационного материала (схем и рисунков).

Для автоматизации проверки знаний была разработана программа тестирования полученных знаний. Для хранения вопросов, списка студентов и результатов тестирования разработана база данных и система администрирования. База данных содержит полную информацию. Система администрирования позволяет быстро и оперативно получить нужную информацию о заказчиках, состоянии тестирования и результатов. Оператор, используя систему управления процессом, может создавать собственные наборы тестов и правил тестирования [5].

Контроль качества информирования включает в себя разработку, позволяющую проводить групповое компьютерное тестирование по произвольной тематике, вести базу данных проведенных тестирований, производить автоматическое выставление оценок по полученным результатам тестирований. Она позволяет также составлять отчёты по результатам тестирований и распечатывать их, быстро и легко разрабатывать новые тесты, вести разработку научно обоснованных тестов, направленных на достижение объективности оценки знаний. Программа даёт возможность подробно проанализировать результаты всех проведенных сеансов тестирований, а также генерировать ряд необходимых отчетов, из которых многое смогут почерпнуть не только отвечающие за тестирование (преподаватели), но и тестируемые, т.е. студенты, абитуриенты или выпускники. Компьютерная система тестирования может применяться в образовательном процессе любого уровня сложности от начальной школы до аспирантуры вуза и далее на предприятии, в центрах переподготовки и повышения квалификации специалистов [6].

Рассчитаем, например, количество денег, затрачиваемое на проведение различных проверочных работ на среднестатистической кафедре НГТУ им. Р.Е. Алексеева:

24 чел. – количество человек в группе;

15 мин = 0,25 ч – время на проверку ответов одного студента;

2 студента проверяются одновременно;

200 руб./ч – стоимость работы;
 3 – количество работ в неделю;
 4 – количество недель в месяце;
 10 – количество учебных месяцев в году.

$$Зст=(24\cdot 0,25:2)\cdot 200\cdot 3\cdot 4\cdot 10=72000 \text{ руб.}$$

Внедрив систему автоматического контроля знаний, эти затраты можно сократить в несколько раз.

Предлагаем также вариант контроля качества информирования у студента (табл. 1)

Таблица 1

Способы контроля		
<i>Традиционные</i>		
Безмашинные	Смешанные	Машинные
устный опрос устная самостоятельная работа выступление с сообщением устный зачет блиц-опрос	диктант самостоятельная работа контрольная работа зачет экзамен олимпиада	практическая работа лабораторная работа тест
<i>Нетрадиционные</i>		
	исследовательская работа творческая работа реферат сочинение конференция	

Целью работы является нахождение наиболее общего, простого, а главное – дешевого и единообразного способа проверки знаний.

Рассмотрим каждую из альтернатив в отдельности.

Наличие компьютерного класса позволяет дифференцировать и индивидуализировать контроль качества информирования. Формы контроля результатов обучения можно разделить на два типа: машинный и безмашинный. Среди безмашинных средств проверки уровня информированности наиболее распространены в практике: устный опрос студентов, проверка тетрадей с домашним заданием, диктант, самостоятельная и контрольная работы.

Использование компьютера позволяет качественно изменить контроль качества информирования студентов, обеспечивая при этом гибкость управления учебным процессом. Компьютер позволяет проверить все ответы, а во многих случаях он не только фиксирует ошибку, но довольно точно определяет ее характер, что помогает вовремя устранить причину, обуславливающую ее появление. Интересно, что студенты более охотно отвечают компьютеру, и если он ставит им «двойку», то горят желанием скорее ее исправить. Преподавателю нет необходимости призывать студентов к порядку и вниманию. Студент быстрее концентрируется на выполнении задания, так как время тестирования ограничено.

Индивидуальный устный опрос как форма контроля качества информирования позволяет выявить правильность ответа по содержанию, его последовательность, самостоятельность суждений и выводов, степень развития логического мышления, культуру речи студента. Эта форма контроля качества информирования применяется для текущего и тематического учета, а также отработки и развития экспериментальных умений студентов. Причем устную проверку считают эффективной, если она направлена на выявление осмысленности восприятия знаний и осознанности их использования, если она стимулирует самостоятельность и творческую активность студентов. Безусловно, такой способ является самым логичным, но

необходимо учитывать, что требуется большое количество времени, а главное – напряженная работа преподавателя.

Нетрадиционные способы контроля качества информирования связаны с вовлеченностью в этот процесс как преподавателя, так и всех студентов, что не всегда возможно.

Лабораторные и практические работы требуют, во-первых, лабораторного оборудования, а во-вторых – специальной методики проведения. Более того, их невозможно использовать для текущего контроля уровня знаний, тем более для контроля качества информирования.

Таким образом, автоматизация процесса социально-педагогического контроля качества информирования позволяет проводить этот контроль в сложно организованной образовательной системе исполнительства, в которой техника выполняет свои функции, а преподаватели и студенты решают свои задачи. Поэтому особое значение в современном образовании приобретает компьютерное обследование и интерпретация его результатов. Эти результаты показывают уровень получения студентами базовых профессиональных компетенций, их профессионального роста, психологической комфортности и творческого развития в процессе обучения.

Библиографический список

1. Психология управления инновационной деятельностью / Шестакова [и др.]. – М.: КРОНОС, 2009. Т. 1. – 98 с.
2. **Берулава, Г.А.** Методологические основы деятельности практического психолога / Г.А. Берулава. – М.: Высш. шк., 2003. – 205 с.
3. **Пасечник, Л.В.** Многоуровневый анализ умеренных отклонений психического развития в условиях специальной системы домашнего образования / Л.В. Пасечник, О.В. Трошин. – Нижний Новгород, 2004. – 214 с.
4. **Браун, Эрик Дж.** Технологии разработки программного обеспечения / Эрик Дж. Браун. – М.: Питер, 2004. – 656 с.
5. **Веллинг, Л.** Разработка web-приложений с помощью php и MySQL / Л. Веллинг, Л. Томпсон. – М.: Вильямс, 2005. – 30 с.
6. **Гудман.** JavaScript и DHTML. Сборник рецептов / Гудман. – М.: Питер, 2004. – 522 с.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

L.A. Shestakova, M.I. Zolotareva

SOCIALLY-PEDOGOGICAL MAINTENANCE OF THE CONTROL QUALITY INFORMING OF STUDENTS IN ENGINEERING COLLEGE

The article discusses pedagogical provision for education in technical institutes. Engineering and technical institutes in today's Russia are in need of pedagogical provision for education and information. It is connected with present situation with production and related production tasks. The problem of effective information activity is contracted with a set of problems of innovation activity pedagogical provision and information. This is one of most important trends in present today's science.

Key words: pedagogical provision, education in technical institutes, technical institutes, information, problem of effective information, today's science.

УДК 159.9.072

М.В. Прохорова

СОЦИАЛЬНАЯ ЦЕННОСТЬ БРЕНДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен новый взгляд на проблему создания и развития брендов. Автор в целом не отрицает точку зрения, изложенную в антибрендовом бестселлере Наоми Кляйн «No Logo», но пытается показать социальную полезность и ценность брендов, предлагает позитивное переосмысление их социальной роли.

Ключевые слова: бренд, лидерство, социальная ответственность, корпоративная политика.

Антибрендовый бестселлер Наоми Кляйн «No Logo» стал анафемой для деловых кругов и призывом к борьбе с глобализацией во всем мире. Появление книги послужило поводом для более внимательного изучения достоинств и недостатков глобальных корпораций и признания законности права «активистов» на ограничение влияния транснациональных гигантов рамками социальной ответственности.

Наоми Кляйн раскрывает истинные причины основных конфликтов современности и объясняет, почему некоторые известные и уважаемые компании становятся объектами открытой ненависти миллионов людей. Лейтмотивом книги является призыв бойкотировать транснациональные компании и их знаменитые марки, которые отличаются от обычных лишь высокой ценой. Аргументация против брендов состоит в следующем: они представляют угрозу, превращают культуру в товар, они не подчинены никому и т.п.

Если обратиться к покупателю с просьбой назвать причины, по которым он, опираясь только на личный опыт, предпочитает какой-нибудь бренд, то можно услышать восторженные отзывы о достоинствах товаров от компаний McDonalds, Coca-Cola, Nike и им подобных. Когда разговор переводится в более абстрактную плоскость влияния этих брендов на жизнь общества, тональность изменяется: «американцы хотят завладеть всем миром», «наши дети страдают ожирением из-за привязанности к нездоровой пище», «рабочие в странах третьего мира подвергаются эксплуатации». С. Хилтон заключает: «Откройте любую газету и в статьях, посвященных бизнесу, вы найдете хвалебный материал о финансовых успехах ведущих брендов, но переверните страницы, и в том же издании – в порядке компенсации – будет обнаружена истеричная публикация по поводу того или иного бренда, угрожающего нашему обществу, нашим ценностям, нашему образу жизни. Создается впечатление, что бренды несут блага «нам», но гибель «им», что они полезны для бизнеса, но вредны для общества» [5; 61].

Борцы с корпорациями регулярно обращаются к потребителям с советами бойкотировать ведущие бренды и поддерживать местный малый бизнес. Однако, если для этого и существуют веские основания, то защита потребителей не относится к их числу. Так, в мае 2003 г. Агентство пищевых стандартов Великобритании опубликовало доклад, в котором содержалась информация об угрозе здоровью населения, связанной с распространением в стране пунктов быстрого питания. Агентство предупреждало потребителей о мелких местных продавцах продуктов быстрого питания, которые имели весьма смутное представление о регулирующих нормах в сфере здравоохранения и безопасности.

Цель нашей статьи предложить позитивное переосмысление социальной роли брендов, но не утверждать, что влияние брендов на общественную жизнь является неизбежным и абсолютным.

Бренды появились в XIX в. как форма защиты потребителей в индустриальную эпоху. Не обладая брендами, производители товаров широкого потребления были бы вынуждены ограничиваться сбытом своей продукции небольшой группе местных клиентов. Создание брендов позволило перейти от местных к общенациональным, а затем и глобальным масштабам.

Первый мощный рывок к благосостоянию и повышению жизненных стандартов был ограничен пределами Северной Америки и Европы. Местом дислокации наиболее мощных и успешных глобальных брендов являются богатейшие страны мира. Было бы неверным говорить, что бренды обосновались в этих странах, потому что они оказались богатыми. Скорее, наоборот. Можно подчеркнуть следующую зависимость: нет брендов, нет возможности воспитать массовую лояльность потребителей; нет лояльных потребителей, нет гарантированных доходов; нет гарантированных доходов, сокращаются возможности инвестирования и обеспечения занятости, уменьшаются объемы производимых материальных благ, падают объемы поступлений в государственную казну, которые можно использовать на социальные нужды.

Таким образом, бренды являются важным индикатором здоровья экономики. Фундаментальная сущность бренда состоит в том, что он позволяет продемонстрировать отличие одних продуктов и услуг от других. Они конкурируют между собой за внимание потребителей. Чтобы завоевать внимание, они вынуждены обещать нечто лучшее, чем прежде: продукт высшего качества, более низкую цену или ощущение эксклюзивности. Соперничество брендов ведет к созданию более совершенных, дешевых и интеллектуальных предметов потребления и стимулирует экономический рост. Чтобы добиться процветания, бизнес предлагает потребителям реальные выгоды, вытекающие из возможности выбора, соответствия вкусам, функциональности, удобства, и когда эти выгоды обеспечиваются, жизнь людей становится лучше. Без брендов представители бизнеса просто не видели бы смысла в повышении конкурентоспособности, осуществлении инвестиционной деятельности, направленной на предоставление все большего и большего количества социальных благ.

Бренды имеют в себе встроенный рыночный механизм защиты потребителей. Мощным стимулом для гарантированного обеспечения высокого качества и надежности продукции выступает необходимость формировать и сохранять лояльное отношение потребителей. Даже когда происходят неприятные инциденты, например, случай с компанией Johnson & Johnson, обнаружившей, что упаковка баночек с болеутоляющими капсулами «Тайленол» содержала цианид, потребители брендов оказываются более защищенными, так как компании – держатели брендов предпримут экстренные меры по исправлению ситуации. Соответственно, можно говорить, что бренды служат знаком, указывающим на стандарты качества и надежности в неменьшей степени, чем любые штампы регулирующих органов о соответствии или несоответствии.

Социальный вклад брендов, осуществляемый через процесс создания материальных благ, является важным, но косвенным фактором их общественной значимости. Он состоит преимущественно в пополнении государственного кошелька. Другое дело инновации, где социальная роль брендов проявляется более прямо и непосредственно. В рамках этого процесса вклад брендов в личное и общественное благосостояние принимает форму разработки новых социально полезных продуктов и услуг. Поэтому существенную ценность представляет анализ брендов с точки зрения их влияния на инновационные процессы, которые могут обеспечить более существенный социальный эффект. Проводя подобный анализ, следует помнить, что его главным объектом является сам бренд, а не компания или изобретатель. Не имея бренда, компании не станут рисковать нововведениями, поскольку в этом случае они лишены возможности обеспечить ассоциативную связь между новыми продуктами или услугами и своими технологическими и инвестиционными усилиями, и, следовательно, воспользоваться преимуществами, обеспечивающими новшества.

В качестве примеров инновационной брендовой политики можно привести следующие. В Индии продажи компании Unilever в сельских областях обеспечивают до 55% оборота. Исходя из этого, компания разработала специальный набор доступных продуктов, таких как дешевый зубной порошок и обогащенные пищевые продукты, в частности мука с добавлением железа и витаминов (шестеро из десяти женщин и детей в Индии страдают от недостатка железа в организме). Был разработан и особый тип упаковки небольших размеров, чтобы

дать возможность приобретать, например, йодированную соль маленькими порциями по доступной цене.

В Великобритании компания, предлагающая мобильные телефоны под маркой «O₂», стала использовать свои технологии в социальных целях. Одним из примеров является разработка в помощь больным астмой. Посредством измерителя пиковых переживаний, соединенного с аппаратом «O₂» больные могут получать, фиксировать и передавать данные о своем состоянии в режиме реального времени, что позволяет их лечащим врачам наблюдать за ними и осуществлять необходимые процедуры по мере надобности. Больные выигрывают от того, что им предлагаются более надежная система охраны здоровья и более комфортные условия существования; система здравоохранения выигрывает от того, что экономит время и расходует средства, благодаря уменьшению числа случаев экстренной госпитализации и вызовов, которых можно избежать.

Таким образом, бренды не являются источником отрицательного воздействия на общество. Они не наносят ущерба обществу и окружающей среде, а напротив, будучи «общественной витриной» частного сектора, по мере сил способствуют его смягчению. Бренды – это таран, пробивающий дорогу позитивным социальным переменам [5; 74].

Безусловным положительным моментом является социальная ответственность брендов. Движение за социальную ответственность корпораций было инициировано бизнесом в ответ на выпады сторонников позиции «Долой лого». Политика корпоративной социальной ответственности стала жестко обязательной для ведущих компаний, которые сделали открытыми все аспекты своей деятельности – от заботы об охране окружающей среды до установления трудовых норм.

Социальная ответственность предполагает некий добровольный отклик на то, что лежит вне требований, определяемых законом или регулирующими органами, или же сверх этих требований.

Из всего разнообразия существующих подходов к определению социальной ответственности компании можно выделить три наиболее распространенных.

1. Теория корпоративного эгоизма основывается на утверждении о том, что единственная ответственность бизнеса – это увеличение прибыли всех своих акционеров. М. Фридман, утверждал, что «существует лишь одна социальная ответственность делового мира – использовать свои ресурсы и заниматься деятельностью, направленной на увеличение прибыли, при условии соблюдения правил игры, то есть заниматься открытой свободной конкуренцией без обмана и мошенничества».

2. Теория корпоративного альтруизма появилась одновременно с опубликованием статьи Фридмана в *New York Times* и принадлежала Комитету по экономическому развитию. В рекомендациях комитета подчеркивалось, что корпорации обязаны вносить значительный вклад в улучшение качества американской жизни.

3. Теория «разумного эгоизма» настаивает на том, что социально ответственный бизнес – это просто «хороший бизнес», поскольку сокращает долгосрочные потери в прибыли. Проявление социальной ответственности позволяет улучшить имидж корпорации, отношения в коллективе, привлечь новых клиентов, увеличить объемы продаж своей продукции (услуг), в результате чего растет стоимость акций корпорации на рынке. Следовательно, социально ответственное поведение – это возможность для корпорации реализовать свои основные потребности в выживании, безопасности и устойчивости [4].

Среди наиболее распространенных направлений социальных программ компаний можно выделить такие, как:

- развитие;
- охрана здоровья и безопасные условия труда;
- социально ответственная реструктуризация;
- природоохранная деятельность и ресурсосбережение;

- развитие местного сообщества;
- добросовестная деловая практика.

Планы проведения корпоративных конференций обязательно содержат ежемесячные совещания по вопросам социальной ответственности и управления репутацией. Постулат мира социальной ответственности гласит, что бизнес может быть «благом для себя» и одновременно «благом для других», или, используя известную поговорку, «выигрываешь ты, выигрывают все». Наиболее ярким примером социальной ответственности бренд-политики являются следующие. Например, автомобильная компания KIA пропагандирует ответственное поведение за рулем своих потребителей в рамках кампании «Не начинай поездку, не подумав» и оказывают поддержку организации перехода улицы группами, что обеспечивает безопасность детей, идущих в школу, и сокращает количество уличных пробок, возникающих из-за детей, перебегающих дорогу, чтобы попасть в школу. Косметическая компания Avon привлекает внимание потребителей к проблеме рака груди и предлагает им необходимые рекомендации и помощь.

Необходимость поддерживать актуальность бренда стимулирует инвестиции в исследования и разработки, что в свою очередь обеспечивает постоянное обновление и совершенствование продуктов. Владельцы брендов в равной степени несут ответственность как за качество и потребительские свойства брендированных товаров и услуг, так и за соблюдение этических норм деловой практики. С учетом прямой зависимости объемов продаж и курса акций от ценности бренда можно сказать, что потенциальные издержки неэтичного поведения существенно превышают любые выгоды, а также затраты на соблюдение этики в бизнесе.

Обвинения в нарушении этических норм предъявлялись многим брендам. Некоторые из них принадлежали владельцам, инициировавшим принятие добровольных кодексов поведения и внутренних систем контроля. Это свидетельствует о том, что хотя им и не удалось добиться полного искоренения неэтичных методов деловой практики, они, по крайней мере, продемонстрировали желание решать эту проблему. Чем более откровенно компании заявляют о наличии нарушений деловой этики, с которыми им необходимо бороться, тем более заслуживающими доверия они оказываются в глазах окружающих. Компания Nike, в свое время подвергавшаяся критике по поводу политики найма на работу, проводимой ее поставщиками в развивающихся странах, приступила к публикациям на своем сайте результатов независимых аудиторских проверок и интервью с работниками своих предприятий. Озабоченность транснациональных корпораций вполне объяснима, принимая во внимание, что 5-процентное сокращение объемов продаж может привести к снижению стоимости брендов на значительную сумму. Очевидно, что соблюдение норм оказывается экономически выгодным.

Разумеется, крупные транснациональные компании не всегда придерживаются требуемых норм поведения на развивающихся рынках, особенно когда они действуют в странах, где нарушение норм поощряется и поддерживается коррупцией властей. Но как подтверждает отчет Даниэля Литвина о деятельности транснациональных компаний в развивающихся странах [1], западные наблюдатели часто под влиянием местных активистов, как правило, преувеличивали или искажали роль западных корпораций в решении проблем, стоящих перед этими государствами, что приводило к серьезным последствиям. Наглядным примером может служить деятельность компании Shell в Нигерии. Она нанесла гораздо меньше вреда местным жителям, чем коррупция, процветавшая в нигерийских политических кругах. В свое время правительство противилось попыткам компании использовать часть прибыли от нефтедобычи в социальных целях. Как с очевидностью вытекает из отчета Даниэля Литвина, компании проявляют, скорее, неумение и некомпетентность при выходе на новые рынки, нежели чем намерение создать систему эксплуатации. По крайней мере, поняв свои ошибки, они стремятся исправить положение, чего нельзя сказать о большинстве политических режимов, основанных на произволе.

Пример с компанией Shell служит хорошей иллюстрацией того, как опасно механически оценивать с позиций западной морали ситуацию в странах, находящихся на другой ста-

дии общественного развития. Вполне вероятно, что 40 млн долл., которые нефтяная группа тратит в Нигерии на благотворительность, гораздо сильнее способствовали бы процветанию страны, если бы компании позволили расширить на эту сумму инвестиции в развитие своего непосредственного бизнеса и таким образом обеспечить долговременное создание постоянных рабочих мест. К аналогичному выводу приводит ситуация, возникшая в Пакистане, когда компания Nike под давлением развернутой на Западе в 1980-х годах кампании среди потребителей по бойкоту ее продукции за то, что она использовала детский труд по шнуровке футбольных мячей, аннулировала тысячи рабочих мест для детей. Это привело к тому, что дети лишились заработка, служившего поддержкой для многих семей, и вынуждены были выполнять более опасную и низкооплачиваемую работу. Это никак не изменило положение дел в Пакистане, где свыше 200 млн детей по-прежнему работают и, скорее всего, будут работать до тех пор, пока страна не станет достаточно богатой. Многие женщины также лишились возможности независимого экономического существования, поскольку компания Nike была вынуждена прекратить практику работы по шнуровке мячей на дому, а женщины в силу жестких социальных запретов не могли ходить работать на фабрику, куда был перенесен производственный процесс [2]. Для западных активистов гораздо легче воздействовать на брендированные транснациональные компании, чем на местные предприятия или правительственные органы, однако при этом они редко осознают, что их пропаганда наносит вред людям.

В настоящее время методы оценки бренда, используемые, например, агентством Interbrand, акцентируют внимание на его экономических показателях, лишь время от времени принимая в расчет такие факторы, как подготовка персонала. По мнению Д. Доун, выбраться из этой оценочной трясины хотя бы частично мы сможем, если станем использовать методы определения «ценности бренда», менее зависящие от статьи баланса «Нематериальные активы» и опирающиеся в большей мере на социальную и экологическую результативность [3].

Попытки разработать методы количественного измерения таких показателей уже делаются. В последние годы многие организации попытались измерить «социальный капитал», однако, поскольку методологии оценок не были открытыми, практически невозможно узнать, что подвергалось оценке, и тем более провести их сравнительный анализ для выработки общих стандартов. В числе компонентов социального капитала, как одного из факторов доверия, должны фигурировать меры, указывающие на приверженность общественным интересам, например, привлечение в качестве рабочей силы местного населения.

Придание большей «осязаемости» нематериальным факторам и осуществление их оценки с точки зрения социальных и экологических последствий преследует двоякую цель. Во-первых, это поможет убедить политических деятелей в том, что компании в полной мере оплачивают социальные и экологические последствия своей деятельности (экономисты это называют интернализацией внешних эффектов). Во-вторых, они помогут убедить окружающих, что бизнес не прибегает к компромиссам, жертвуя нефинансовыми результатами в угоду финансовым, поскольку и те и другие в одинаковой степени служат коренным общественным интересам.

Одним из компонентов социальной ценности брендов наименее осязаем, но имеет непосредственное отношение к фундаментальной человеческой потребности – объединяться с другими людьми. Бренды служат общественному объединению на национальном и международном уровнях.

Самые знаменитые в мире бренды стремятся стать объединителями общества. Бренд Coca-Cola поддерживает стремление петь, бренд Nike прославляет тех, кто совершает поступок, бренд Nokia связывает людей.

Таким образом, благодаря брендам, появилось много возможностей повысить качество жизни всего общества. Бренды воспитывают лояльность потребителей, которая формирует более надежную основу для увеличения доходов компаний и, следовательно, для повышения уровня гарантированной занятости и создания материальных благ; стимулируют инноваци-

онную деятельность, являясь залогом приемлемой доходности инвестиций, осуществляемых компаниями для совершенствования продуктов и услуг; предоставляют надежный механизм защиты потребителей; повышают уровень социальной ответственности корпораций; заботятся о превращении корпораций в общественных лидеров; играют прогрессивную роль в общественном развитии, благодаря возможностям, предоставляемым некоммерческому сектору; служат средством общественной консолидации на национальном, интернациональном уровнях, обеспечивая равноправное участие в социальной жизни.

Библиографический список

1. **Litvin, D.** Empiris of Profit. Commerce, Conquest and Corporate Responsibility / D. Litvin. – Texere, 2003.
2. **Schlosser, E.** Fast Food Nation: The Dark Side of the All-American Meal / E. Schlosser. – HarperCollins, 2002.
3. **Доун Д.** Альтернативные перспективы развития брендов: рынок и мораль / Д. Доун // Бренды и брендинг. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. С. 243-262.
4. **Кравченко, П.П.** Социальная ответственность корпорации. Ее значение и место в корпоративной культуре организации / П.П. Кравченко // Корпоративна культура организаций 21-го столетия – 2007: материалы 5-й Всеукраинской научно-практич. конф. – Краматорск: ДДМА, 2007. С. 26-31.
5. **Хилтон, С.** Социальная ценность брендов / С. Хилтон // Бренды и брендинг. – М.: ЗАО «Олимп-Бизнес», 2008. С. 61-87.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

M.V. Prochorova

BRAND SOCIAL VALUE

This article considers the new approach to the problem of creation and development of brands. The author don't suspect point of view Naomi Klein, described in her "No Logo", but try's to prove value of brands and necessarily of understanding the role of brands in positive aspect.

Kew words: brand, leadership, social responsibility, corporative politic.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.781.2

В.Д. Вавилов, И.В. Вавилов

РАЗРАБОТКА МИКРОСИСТЕМНОГО ДУС С РЕЗОНИРУЮЩИМ КОЛЬЦОМ

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

Приводятся материалы разработки микросистемного ДУС в качестве чувствительного элемента в котором используется резонирующее кольцо из кристаллического кремния. Особенностью разработки является то, что в качестве привода в ДУС используется электростатический преобразователь.

Ключевые слова: резонирующее кольцо, микросистемный ДУС, кристаллический кремний, переходный процесс, добротность упругого элемента.

Упругие круговые кольца, выполненные из кремния и обработанные методом электронной технологии, применяются для построения ЧЭ волновых микрогироскопов. В плоскости кольца могут быть возбуждены различные виды колебаний: радиальные, изгибные и изгибно-крутильные. При построении узлов, чувствительных к кориолисовым ускорениям, чаще всего возбуждаются изгибные колебания на основной моде. При вращении вибрирующего кольца в результате действия кориолисовых сил происходит расщепление частот основной моды колебаний, приводящее к прецессии стоячей волны как относительно резонатора, так и относительно инерциального пространства. В специальной литературе это свойство вибрирующего резонатора называют эффектом Г.Х. Брайена.

Подвесы кольца выполняют так, чтобы они не оказывали влияния на основные информационные характеристики: собственную частоту, добротность, температурную инвариантность и др. Размещают резонирующие кольца в вакуумированных герметичных корпусах. Применяют два типа приводов для возбуждения колебаний: магнитоэлектрический и электростатический, а для съема вторичного сигнала – емкостный и индукционный с отрицательной обратной связью. Характеристики микрогироскопов с обоими типами приводов примерно одинаковы. Описание ДУС с магнитоэлектрическим приводом приведено в [1]. Здесь рассмотрим математическую модель резонирующего кольца с электростатическим приводом.

Система уравнений Лагранжа применительно к кинематической схеме на рис. 1 без учета влияния упругих подвесов имеет вид

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{u}} \right) - \frac{\partial T}{\partial u} = Q_u, \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{v}} \right) - \frac{\partial T}{\partial v} = Q_v, \quad (1)$$

где T - кинетическая энергия колеблющегося кольца; u и v - радиальное и тангенциальное смещения произвольной точки на кольце; Q_u и Q_v - обобщенные внешние силы.

В общем виде кинетическая энергия колеблющегося кольца определяется следующим выражением:

$$T = \frac{\rho F}{2r^2} \int_0^{2\pi} (\dot{u}^2 + \dot{v}^2) r d\theta, \quad (2)$$

где ρ - плотность материала кольца; F - площадь поперечного сечения кольца.

Для определения радиального перемещения при изгибных колебаниях какой-либо точки представим его в виде тригонометрического ряда

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} a_i \cos i\theta + \sum_{i=1}^{\infty} b_i \sin i\theta, \quad (3)$$

где постоянные коэффициенты a_i и b_i есть функции времени, которые имеют смысл виброперемещений, а их первые производные по времени имеют смысл и размерность виброскоростей.

Для определения тангенциальных составляющих перемещений воспользуемся соотношением Буссенеска [3] для изменений кривизны деформированного кольца:

$$\frac{1}{r + \Delta r} - \frac{1}{r} = -\frac{\partial^2 u}{r^2 \partial \theta^2} - \frac{u}{r^2}, \quad (4)$$

где r - текущее значение радиуса кольца.

Относительное удлинение кольца в произвольной точке можно определить исходя из геометрических соображений:

$$e = \frac{u}{r} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial \theta}.$$

При изгибных колебаниях без растяжения $e = 0$, тогда из совместного решения (3) и (4) следует

$$v = -\sum_{i=1}^{\infty} \frac{a_i \sin i\theta}{i} + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{b_i \cos i\theta}{i}. \quad (5)$$

Подставляя (3) и (4) в (5), найдем выражение для кинетической энергии колеблющегося кольца, в котором вместо радиального и тангенциального перемещений в явном виде участвуют коэффициенты тригонометрических рядов (4) и (5):

$$T = \frac{\pi r \rho F}{2} \sum_{i=1}^{\infty} \left(1 + \frac{1}{i^2} \right) (\dot{a}_i^2 + \dot{b}_i^2). \quad (6)$$

С целью определения обобщенных сил для правых частей уравнений Лагранжа (1) найдем потенциальную энергию изгиба кольца через момент сил упругости и кориолисовых сил в виде

$$V = \frac{1}{2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{M^2}{E_{[100]} I} - F_d + F_k + F_u \right) r d\theta, \quad (7)$$

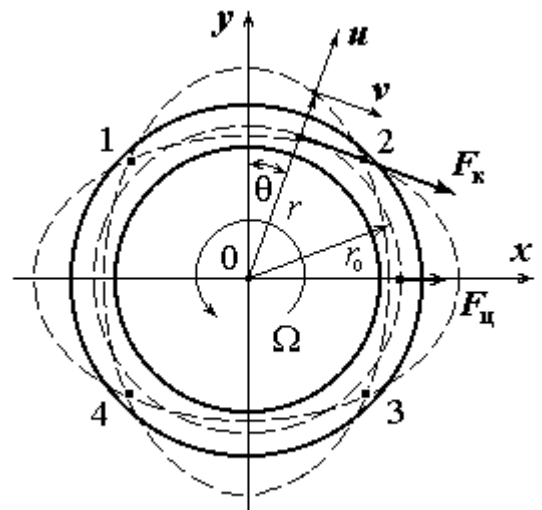


Рис. 1. Основная мода колебаний кремниевое кольцо

где $M = -\frac{E_{[100]}I}{r^2} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial \theta^2} + u \right)$ - изгибающий момент в произвольном поперечном сечении кольца; $E_{[100]}$ - модуль упругости кремния в кристаллографическом направлении [100]; $I = c_k b_k^3 / 12$ - момент инерции поперечного сечения кольца; c_k - толщина кольца; b_k - ширина кольца (разность между максимальным и минимальным радиусами); $F_d = K_\Gamma \dot{a}_i$ - сила демпфирования; $K_\Gamma = G\eta/\omega_b$ - коэффициент гистерезисного демпфирования ($\eta = 1/Q$ - безразмерный коэффициент потерь; Q - добротность материала кольца; ω_b - частота принудительного возбуждения колебаний кольца); $F_K = 2\rho F \dot{u} \Omega v$ - мгновенная интенсивность кориолисовой силы; Ω - угловая скорость вращения кольца; $F_{\text{ц}} = \rho F r^2 \Omega^2$ - центробежная сила.

Численный анализ сил, входящих в соотношение (7), показывает, что произведение добротности на частоту возбуждения составляет $Q\omega_b \approx 10^{11} \dots 10^{12}$ Гц. Следовательно, демпфирующая сила на несколько порядков меньше по сравнению с другими, и это дает основание ею пренебречь. Ввиду малости угловой скорости вращения кольца центробежной силой также можно пренебречь.

Используя для (7) тригонометрические ряды (3), (5) и интегральные соотношения

$$\int_0^{2\pi} \cos m\theta \cos n\theta d\theta = 0, \quad \int_0^{2\pi} \sin m\theta \sin n\theta d\theta = 0 \quad \text{при } m \neq n,$$

$$\int_0^{2\pi} \cos m\theta \sin n\theta d\theta = 0, \quad \int_0^{2\pi} \cos^2 m\theta = \int_0^{2\pi} \sin^2 m\theta = \pi,$$

получим

$$V = \pi \left[\frac{E_{[100]}I}{2r^3} \sum_{i=1}^{\infty} (1-i^2)^2 (a_i^2 + b_i^2) + \frac{\rho F \Omega r}{i} \sum_{i=1}^{\infty} (\dot{a}_i b_i - a_i \dot{b}_i) \right]. \quad (8)$$

В общем виде обобщенные силы через потенциальную энергию выражаются следующим образом:

$$Q_u = -\frac{dV}{da_i}, \quad Q_v = -\frac{dV}{db_i}. \quad (9)$$

Задать виброперемещение можно по амплитуде проводящего контура при электрическом возбуждении колебаний. Если возбуждение колебаний осуществляется на резонансной частоте $\omega_i = \omega_b$, то величину виброперемещения необходимо домножить на коэффициент добротности материала кольца, т.е. $\dot{b}_i = \omega_b \delta_i Q$.

Решая совместно (1) - (9) и учитывая гистерезисные потери, получим дифференциальное уравнение относительно виброперемещений:

$$2\pi\rho F r_0 (1+i^2) \ddot{a}_i + K_{\Sigma} \dot{a}_i + G a_i = \frac{\rho F r_0 \dot{b}_i}{i} \Omega, \quad (10)$$

где r_0 - радиус кольца по средней линии; $G = \frac{E_{[100]}I(1-i^2)^2 i^2}{(2\pi r_0)^3}$ - жесткость кольца на радиальный изгиб.

Передаточную функцию для резонирующего кольца можно записать на основании дифференциального уравнения (10) в следующем виде:

$$W_{\kappa}(s) = \frac{a_i(s)}{\Omega(s)} = \frac{K_{\text{чз}}}{\rho F r_0 (1+i^2) s^2 + K_{\Sigma} s + G}, \quad (11)$$

где $K_{\text{чз}} = \frac{2\pi\rho F r_0 \omega_b \delta_i Q}{i}$ - коэффициент передачи чувствительного элемента;

$T = \frac{(2\pi r_0)^2}{i} \sqrt{\frac{\rho F (1+i^2)}{E_{[100]} I (1-i^2)^2}}$ - постоянная времени резонирующего кольца.

Для обобщенной координаты v (соответственно для коэффициента b_i) может быть получено дифференциальное уравнение, аналогичное (1), и соответственно передаточная функция, аналогичная (11). Значение производной от коэффициента b_i зависит от частоты и амплитуды принудительного возбуждения колебаний в кольце, т.е. $\dot{b}_i = \omega_b \delta_i$, где δ_i - амплитуда виброперемещения для i -й моды. Решение уравнения (10) дает следующее выражение для собственной частоты колебаний по i -й моде:

$$\omega_i = \frac{i}{(2\pi)^2} \sqrt{\frac{E_{[100]} I (1-i^2)^2}{\rho F r_0^4 (1+i^2)}}. \quad (12)$$

Из (12) видно, что на собственную частоту кольца влияют упругие свойства материала, геометрические характеристики и мода колебаний. Скорость вращения кольца на собственную частоту влияния не оказывает. Рассмотрим частные случаи колебаний упругого кольца: 1) при $i = 1$ имеет место первая мода, возбуждение колебаний в кольце отсутствует ($\omega_1 = 0$), а движение его представляет собой движение абсолютно твердого тела с составляющими перемещений $u = a_1 \cos \theta$, $v = b_1 \sin \theta$; 2) при $i = 2$ имеет место вторая мода колебаний кольца.

Эта мода является основной, при ней $a_1 = b_1 = 0$. Условно вторая мода обозначается как $\cos 2\theta$ и называется эллиптической. Название это появилось по той причине, что в деформированном состоянии средняя линия кольца представляет собой некоторый эллипс.

Расположение подвесов кольца, а также электродов возбуждения колебаний и съема

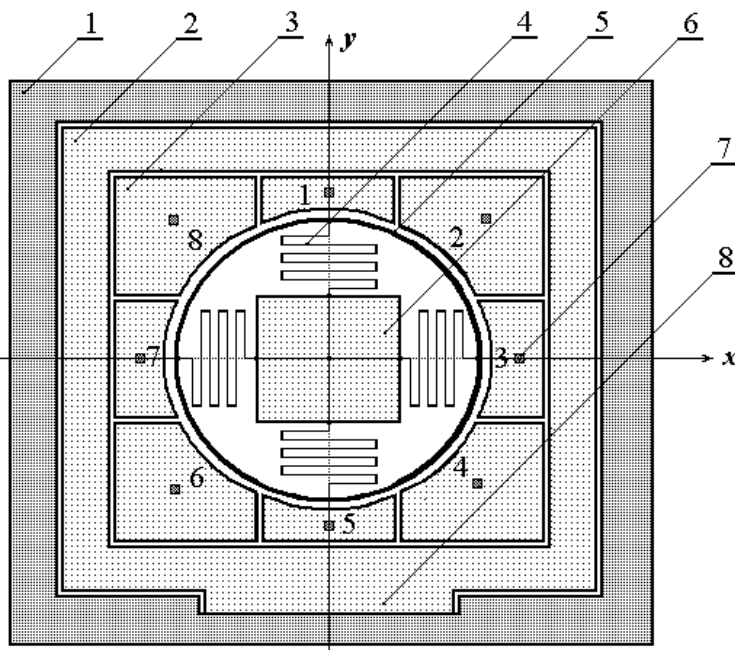


Рис. 2. Чувствительный элемент кольцевого резонатора с электростатической обратной связью

вторичных сигналов выбирают в узловых точках. Например, на основной моде колебаний участки кольца, находящиеся под углами $\theta = 45, 135, 225$ и 315 , являются неподвижными, так как при них $\cos 2\theta = 0$. Это узловые точки 2, 4, 6 и 8 на рис. 2. В точках пересечения кольца с координатными осями x и y , называемых пучностями, сечения не имеют угловых перемещений, поэтому в данных точках также могут быть размещены упругие подвесы.

В связи с анизотропией кремниевого материала и конструктивными особенностями ЧЭ собственные частоты в кольце адекватны направлению. Условно ось с минимальным значением собственной частоты ω_{\min} называется осью “тяжелого” возбуждения, а

ось с максимальным значением ω_{\max} - осью “легкого” возбуждения. Собственные частоты по осям “тяжелого” и “легкого” возбуждения не совпадают, а их разница называется частотой расщепления:

$$\Delta\omega = \omega_{\max} - \omega_{\min}. \quad (13)$$

Учет наложения на основную форму изгибных колебаний тонкого кругового кольца колебаний крутильной формы, возникающих от влияния внешних сил, например, в результате вращения резонирующего кольца в неинформационных направлениях, приводит к незначительному изменению собственной частоты ($\approx 1\%$ при угловой скорости вращения $\Omega = 300$ °/с). Поскольку колеблющееся кольцо размещено в вакуумированном пространстве, то его собственная частота является резонансной. По классификации микрогироскопы с резонирующим кольцом относятся к третьей категории. Кольцевая конструкция обладает значительными преимуществами по сравнению с простыми и уравновешенными осцилляторами.

При полом резонаторе становится возможным преодолеть проблемы, характерные для первых двух категорий. Например, проблемы, связанные с систематической погрешностью установки гироскопа на объект, чувствительностью к перекрестным воздействиям, ударам и вибрации.

Конструкция резонатора полностью использует преимущества путем вытравливания механического элемента из кристаллического материала. Это гарантирует, что свойства резонатора будут стабильны в течение службы и в окружающей среде. В дополнение к этому описанная планарная кольцевая структура выигрывает от того, что вся виброэнергия у нее находится в одной плоскости. По существу, при воздействии угловой скорости не происходит передачи вибрации из одной кристаллической плоскости в другую, и поэтому такие параметры, как частота, модовое разделение частот и добротность, очень стабильны в диапазоне температур.

Чувствительный элемент схематично показан на рис. 2. Выполнен он элемент на кремниевой пластине 1 с размерами 10x10 мм. Внутри пластины 1 размещена монтажная консольная пластина 2 с помощью лестничного упора 9. Резонатор содержит 6 - миллиметровое кремниевое кольцо 5, поддерживаемое четырьмя упругими подвесами 4 меандрового типа, которые с другой стороны прикреплены к центральной опоре 6. Технологические особенности изготовления кольцевого резонатора в основном заключаются в изотропном травлении кристаллического кремния направленным потоком плазмы. Упругие подвесы 4 одновременно являются токопроводящими проводниками, соединяющими кольцевой резонатор с «землей».

Имеются восемь идентичных проводящих электродов, каждый из которых следует с зазором вокруг 1/8 сегмента кольца. Величина зазора составляет порядка четырех микрометров. Корпусная пластина 1, восемь проводящих электродов 3 и центральный упор 6 жестко соединены между собой стеклянной пластиной с помощью молекулярной сварки. Между торцом кольцевого резонатора и стеклянной пластиной имеется технологический зазор, образованный стравливанием кольца по торцу в процессе изготовления.

Представляющая интерес основная мода вибрации - это $\cos 2\theta$, частота которой 14,5 кГц. В действительности это пара мод с угловым разделением 45° . Конструкция гироскопа резонансного типа, поэтому частотное разделение между этими взаимно дополняющими модами должно быть минимизировано, обычно менее чем до $f_n/2Q$ Гц. Здесь опять же помогает кристаллическая симметрия кремния, причем материал не вносит воздействия в частотное разделение. Самый большой вклад в это вносят производственные отклонения, но они минимизируются за счет использования технологии микрообработки. Требования дополнительной подстройки удовлетворяются за счет использования лазера для удаления массы из системы.

Вибромоды низкого порядка, представляющая собой вертикальное движение всего

кольца по отношению к опоре, имеет частоту, превышающую 5 кГц. В результате этого датчик нечувствителен к обычным вибрационным воздействиям. При воздействии ударного ускорения порядка 10000 g минимальное напряжение более, чем на порядок ниже, предела разрушения материала. Таким образом, ЧЭ исключительно устойчив к ударам и вибрации и не нуждается в каких-либо защитных креплениях или демпфировании.

Силовая обратная связь микрогироскопа с резонирующим кольцом может быть магнитоэлектрической или электростатической. Рассмотрим общие вопросы конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом, не зависящие от типа преобразователя силовой обработки, а особенности расчетов с тем или иным силовым преобразователем выделим соответственно.

Кремниевый ЧЭ в виде резонирующего кольца является сердцем микрогироскопа. Очевидно, что для получения конструктивно законченного датчика он должен комплексоваться с управляющей электроникой. Микрогироскоп может работать как в режиме разомкнутого контура, так и в режиме замкнутого. При работе в режиме замкнутого контура получают значительные преимущества по рабочим характеристикам.

Режим возбуждения колебаний контролируется интегральной схемой (рис. 3), которая содержит для удержания вибрации в резонансе контур генератора управляемого напряжением ГУН и контур автоматической регулировки усиления АРУ, который поддерживает постоянную амплитуду колебаний. При воздействии вращения энергия преобразуется из первичной моды во вторичную. Становится возможным измерить величину вибрации на вторичном преобразователе как меру скорости вращения. Вторичный контур реализован по компенсационной схеме и используется для поддержания вторичной вибрации на нуле, а величина приводной энергии, необходимая для этого, является мерой воздействия угловой скорости. Путем поддержания постоянной амплитуды колебаний резонатора улучшаются линейность и систематическая погрешность системы.

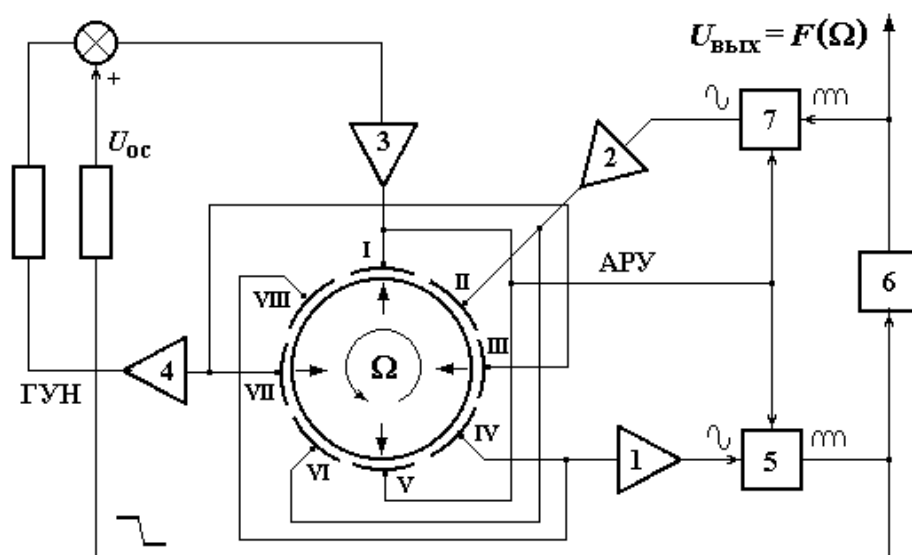


Рис. 3. Функциональная схема микрогироскопа

Сочетание контура АРУ и вторичного контура также служит для исключения из масштабного коэффициента зависимости от добротности резонатора. Система с полностью разомкнутым контуром обладает зависимостью от добротности, которая, в свою очередь, определяется потерями в материале и особенностями конструкции резонатора. Вторичный контур имеет две части: прямую цепь, включающую синхронный детектор 5, корректирующее уст-

ройство 6 и модулятор 7 в цепи обратной связи. Корректирующее устройство в простом случае представляет интегрирующий усилитель, однако практически реализуется по схеме ПИД-регулятора. Использование интегрирующего усилителя значительно снижает ошибки, вызванные частотной разницей между первичным и вторичным контурами.

В свою очередь с использованием дифференцирующего усилителя эффективно решается вопрос демпфирования и устойчивости колебательной системы в замкнутом контуре. Реализация эллиптической моды колебаний в кольце осуществляется специальным генератором, возбуждаемым на частоте механического резонанса. При этом в магнитоэлектрическом преобразователе силы всегда задействованы четыре проводящих сектора. За один период колебаний деформации принудительно создаются следующим образом. В первый полупериод два сектора I и V создают растяжения кольца, а III и VII в это время сжимают кольцо. Во втором полупериоде картина деформаций меняется на противоположную.

Амплитуда виброперемещения, развиваемая приводом при условии использования четырех проводящих секторов, может быть определена из задачи деформации кругового кольца, изгибаемого сосредоточенными силами, действующими по осям x и y :

$$\delta_i = \frac{F_3 r^3}{E_{[100]} I} \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right). \quad (14)$$

Соответственно величина электростатической силы, развиваемая между проводящим кольцом и проводящими электродами, определяется в следующем виде:

$$F_{эс} = \frac{\varepsilon \varepsilon_0 a_3 c_3 U_{оп} U_{пр}}{2h^2}, \quad (15)$$

где a_3, c_3 - длина проводящего сектора и высота кольца; h - зазор между проводящим сектором и кольцом.

Измерение перемещений деформированных участков кольца осуществляется индукционным методом. Для этой цели используются секторы VI и VIII, а секторы II и IV применяются для силовой обратной связи, стремящейся свести деформационные смещения к нулю. Выполняемые функции измерительных секторов и секторов силовой отработки меняются ролями с каждым полупериодом. Величина напряжения для электростатического преобразователя соответственно определяется в виде

$$U_{пз} = \frac{U_{оп} \delta_i}{h}. \quad (16)$$

Далее напряжение с преобразователя перемещений поступает на вход синхронного детектора, затем усиливается интегрирующим усилителем и подается на выход устройства и через модулятор в цепь отрицательной обратной связи. Синхронный детектор и модулятор тактируются собственной частотой возбуждения кольца.

На структурной схеме микрогирискапа (рис. 4) приняты следующие обозначения: $K_{чэ} = 2\rho F \omega_b \delta_i Q_i r$ - коэффициент передачи ЧЭ; $W_{пу}$ - передаточная функция подвижного узла (2); $K_{пм} = \pi \omega_i Br/4$ - коэффициент передачи преобразователя перемещений для магнитоэлектрического преобразователя; $K_{пс} = U_{оп}/h$ - коэффициент передачи преобразователя перемещений для электростатического преобразователя; $K_{осм} = \pi Br/(4R_n)$ - коэффициент передачи звена обратной связи с магнитоэлектрическим преобразователем; $K_{осз} = 2\varepsilon \varepsilon_0 a_3 c_3 U_{оп}/h^2$ - коэффициент передачи звена обратной связи с электростатическим преобразователем; $W_{кор}$ - искомая передаточная функция корректирующего устройства.

Структура микрогирокопа в зависимости от применений может быть выполнена в двух возможных вариантах: 1) без применения корректирующего устройства, предназначенного для решения вопросов демпфирования; 2) с применением электронных устройств, включаемых в цепь отрицательной обратной связи и преобразующих общую передаточную функцию к минимальной форме. Использование первого варианта возможно для объектов, заведомо не зашумленных различными вибрациями, например, работой двигательных установок, пусковых устройств или аэродинамическими нагрузками. При этом используется низкочастотный участок АЧХ без резонансов, а проявление резонансов смещено на высокочастотный участок, явно не встречающийся при эксплуатации микрогирокопа.

Построение микрогирокопа по второму варианту требует дополнительных аппаратных затрат на реализацию корректирующего звена, но при этом снимается один из недостатков, характерный для всех типов виброгирокопов, в виде ошибки от вибропомех.

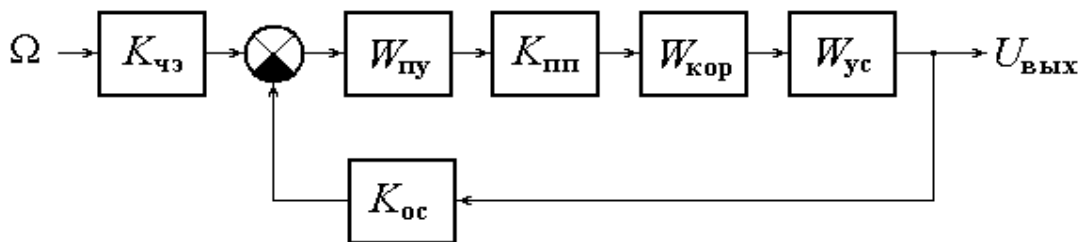


Рис. 4. Структурная схема микрогирокопа с резонирующим кольцом

Из формулы (11) видно, что передаточная функция механического узла микрогирокопа описывается минимальной формой в виде колебательного звена второго порядка. Выбор схемы электронного блока должен осуществляться на основе следующих требований:

1) информационный сигнал снимается с секторов VI и VIII (рис. 3), подается на вход синхронного детектора (ключи Кл5 и Кл6) и далее фильтруется пассивным фильтром (R_1-C_3);

2) с фильтра нижних частот переменная составляющая, очищенная от высокочастотных шумов, поступает на корректирующее устройство, состоящее из дифференцирующего усилителя на ОУ1, интегрирующего усилителя на ОУ2 и масштабного усилителя на ОУ3 сигналы, с которых суммируются на ОУ4;

3) с выхода суммирующего усилителя сигнал с противоположным знаком подается по цепи обратной связи на силовые электроды II и IV;

4) напряжение обратной связи создает электростатическую силу, стремящуюся свести к нулю вторичные колебания резонирующего кольца, вызванные кориолисовым ускорением.

Рассмотрим подробнее передаточную функцию в замкнутом контуре по напряжению при входном воздействии в виде угловой скорости с корректирующим звеном (рис. 4). При этом учтем передаточную функцию механической части и передаточные коэффициенты всех звеньев, охваченных обратной связью. Учтем также, что во вторичном контуре для создания силовой обратной связи используются два проводящих сектора, подключенных к выходу усилителя мощности.

Учитывая отмеченные требования, описание корректирующего звена совместно с фильтром нижних частот должно иметь следующую структуру:

$$W_{\text{кор}}(s) = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 s + \alpha_3 s^2}{(1 + \tau s) \alpha_4 s}, \quad (17)$$

где $\tau = R_1 C_3$ - постоянная времени фильтра нижних частот, необходимая для требуемой полосы пропускания микрогироскопа; $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4$ - коэффициенты, определяемые при оптимизации характеристик микрогироскопа.

Реализация электронного корректирующего звена с передаточной функцией (19) возможна с помощью схем на ОУ с R - C цепями в прямой ветви контура регулирования микрогироскопа (рис. 5). Статический коэффициент передачи схемы выбирается равным единице посредством масштабирующих резисторов $K_{yc} = R_7/R_6 = 1$. Эти резисторы должны быть выполнены в одном технологическом цикле и расположены на подложке рядом, для того чтобы обеспечить одинаковые температурные условия. Постоянные времени дифференциатора и интегратора корректирующего устройства определяются RC -цепями. Они должны быть равны между собой и согласованы с постоянной времени T резонирующего кольца.

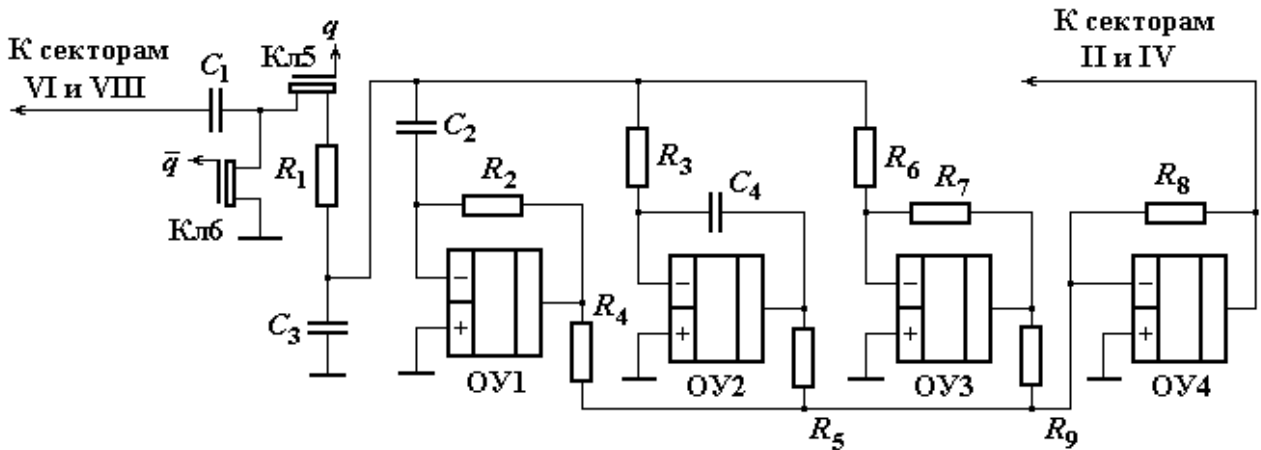


Рис. 5. Принципиальная схема корректирующего устройства

Рассмотренная электрическая схема корректирующего устройства влияния на крутизну статической характеристики микрогироскопа не оказывает. Величины емкостей, используемых в схеме, составляют десятки пикофард, а резисторов - десятки килоом, поэтому при микросборке корректирующее устройство имеет малые габаритные размеры, не приводящие к существенному увеличению общих габаритных размеров микрогироскопа.

Применяя типовые методики работы со структурными схемами, полную передаточную функцию микрогироскопа можно представить в следующей форме:

$$W_{\Omega}(s) = \frac{M(b_2 s^2 + b_1 s + 1)}{a_4 s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0}, \quad (18)$$

где $M = K_{\text{чз}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}}$ - коэффициент крутизны статической характеристики микрогироскопа в замкнутом контуре; $N = K_{\text{ос}} K_{\text{пп}} K_{\text{yc}}$ - жесткость электрической пружины; $b_0 = 1$; $b_1 = T$; $b_2 = T^2$ - коэффициенты числителя передаточной функции; $a_0 = N$; $a_1 = T(G + N)$; $a_2 = K_{\Sigma} + G\tau + NT$; $a_3 = K_{\Sigma}\tau + \rho F r_0(1 + i^2)$; $a_4 = \rho F r_0(1 + i^2)\tau T$ - коэффициенты знаменателя передаточной функции. Коэффициент M охватывает все параметры резонатора: упругость материала кольца, добротность, геометрические размеры и форму колебаний, поэтому в результате определения имеет физический смысл коэффициента Брайена.

Поскольку кольцо выполняется из монокристаллического кремния со стабильными механическими характеристиками, то доминирующей погрешностью является всего лишь источник опорного напряжения.

Электроника замкнутого контура основана на математической модели, которая учитывает статические ошибки, например, расщепление частот, изменение добротности Q , смещение электродов и расстройку мод от рисунка электродов, наряду с ошибкой электронного усиления, фазовую ошибку и ошибку перекрестных помех. Динамические ошибки, связанные с отсутствием газодинамического демпфирования во вторичном контуре, такие, как несоответствие АЧХ, ФЧХ, полосы пропускания и переходных процессов требуемым с точки зрения конкретных измерительных систем, могут быть исключены только при условии построения оптимального корректирующего звена. Электрическое демпфирование во вторичном контуре не должно влиять на первичный контур возбуждения принудительных колебаний в кольце, т.е. в конечном итоге на добротность первичного ЧЭ.

Ниже приведена компьютерная программа определения необходимой добротности Q для получения оптимального переходного процесса.

```
function [Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q);
clc
%DUS
%density of silicon
rho=2328;
%The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
%acceleration of gravitation
g=9.80665;
%length of a pendulum
bk=0.05e-3; ck=1e-3; r0=5e-3; i=2
%viscosity of nitrogen
%mu=17.9e-6;
mu=0
omega=3000;
%weight of a pendulum
m=pi*r0*rho*bk*ck/4
%the moment of inertia
I=(ck*bk^3)/12
%axial rigidity
G=((E100*I)*(1-i^2)^2)*i^2/(r0^3)
%backlash between a pendulum and an electrode
h=4e-6
%factor of transfer of a sensitive element
Q
Uop=5;
e0=8.85418782e-12;
eazota=1;
F=pi*r0*ck/4
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*e0*eazota*Uop*F/(h^2);
delta=(Koc*Uop*r0^3/(E100*I))*(pi/4-2/pi)
```

```

Kche=rho*F*r0*omega*delta/i;
  Kyc=1;
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
T=sqrt(m/G)
%((2*pi*r0)^2)/i)*sqrt((rho*F*(1+i^2)/(E100*I*(1-i^2)^2))
tau=0.0000001
%factors of numerator
b0=1; b1=T; b2=T^2
%factors of a denominator
a0=N; a1=(G+N)*T; a2=G*tau*T+N*T^2; a3=m*T; a4=m*tau*T;
%Not closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
K=dcgain(W)
Wopt=minreal(W);
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2);

clear
k=1;
rand('seed',0);
Q=1000
CKOmax=1e15;
while k<200
Q0=Q*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q0);
if CKO<CKOmax
CKOmax=CKO;
Q=Q0;
end
k=k+1;
end
clc
Q
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(Q)
step(Wopt/K),grid

```

Выводы

По конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом можно сделать следующие выводы:

1. Особенностью микрогироскопа является то, что в его конструкции нет необходимости в выполнении малых зазоров между резонатором и окружающим материалом, поэтому исключается проблема, связанная с “прилипанием”.

2. Основное достоинство конструкции микрогироскопа с резонирующим кольцом в том, что кольцевой резонатор всю свою вибрацию имеет в одной плоскости, поэтому обработка кремния является планарной, при этом нет необходимости в многослойной обработке.

3. В сравнении с микрогироскопом камертонного типа микрогироскоп с резонирующим кольцом при одинаковых аппаратных затратах обладает примерно на порядок лучшими статическими и динамическими характеристиками.

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. –503 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

V.D. Vavilov, I.V. Vavilov

DEVELOPING A MICROSYSTEM DAS WITH A RESONATING RING.

The article considers development of a microsystem DAS as a sensitive element that includes a resonating ring of a crystalline silicon. A singular feature of the design is that an electrostatical converter is used as a DAS drive.

Key words: resonating ring, microsystem DAS, crystalline silicon, transient process, quality factor of a DAS.

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов, А.В. Улюшкин

НАСТРОЙКА КОРРЕКТИРУЮЩЕГО УСТРОЙСТВА В КОНТУРЕ МИКРОДАТЧИКА

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

Рассмотрен принцип применения электронных ПИД-контроллеров в контурах регулирования микродатчиков и показана их эффективность для получения оптимальных характеристик. Приведен практический пример моделирования характеристик для компенсационного акселерометра с электростатической обработкой.

Ключевые слова: микроакселерометр, маятник, ПИД-контроллер, демпфирование, широтно-импульсная модуляция (ШИМ)

Рассмотрим корректирование динамических характеристик микродатчиков на примере линейного акселерометра. Состоит акселерометр из четырех основных узлов: корпуса (рис. 1), чувствительного элемента (рис. 2), электронного блока [1] и корректирующего устройства (рис. 3).

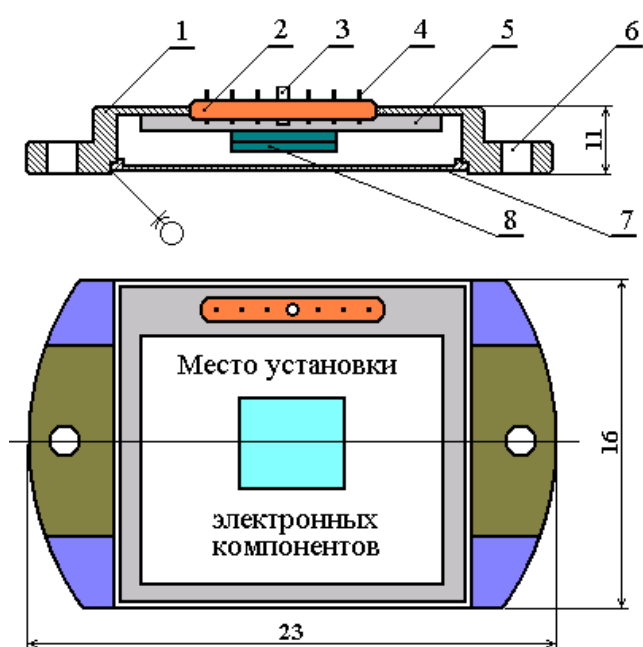


Рис. 1. Общий вид микросистемного акселерометра:

1 – корпус; 2 – гребенка выводов; 3 – трубка для вакуумирования; 4 – гермовывод; 5 – ситалловая подложка; 6 – отверстие для крепления на объекте; 7 – крышка; 8 – чувствительный элемент и электронный блок

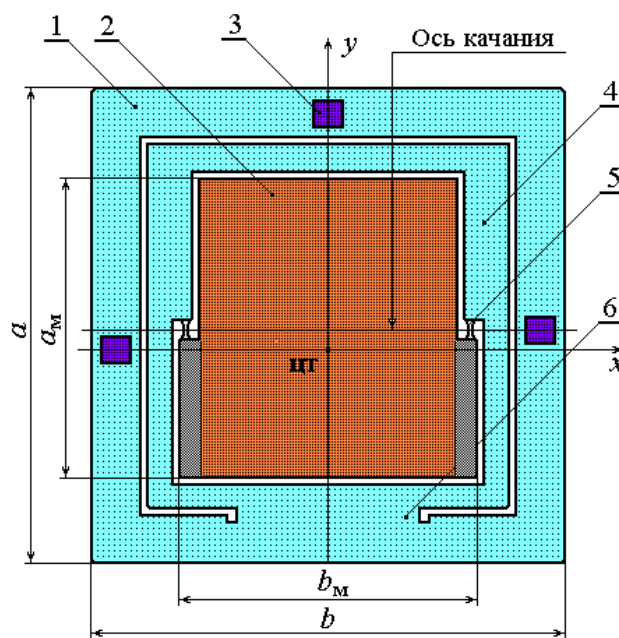


Рис. 2. Маятниковый ЧЭ акселерометра, выполненный на консоли:

1 – несущая пластина; 2 – тело маятника; 3 – точка соединения несущей пластины с основанием; 4 – жесткая рамка; 5 – упругий подвес; 6 – консоль

Краткие описания отмеченных механических узлов приведены в подрисуночных подписях. Электронный блок включается в прямой цепи контура регулирования акселерометра и имеет на выходе аналоговый ПИД-контроллер, который и является корректирующим устройством. Емкостный преобразователь перемещения выполнен по принципу ШИМ и имеет в

своем составе фильтр нижних частот на ОУ2. Описывается блок без ПИД-контроллера аperiodическим звеном первого порядка. Собственно схема ПИД-контроллера выполнена на пяти операционных усилителях ОУ3-ОУ7 и содержит следующие функциональные устройства. Схема на ОУ3 представляет дифференцирующий каскад и предназначена для организации скоростного демпфирования с помощью электрического контура. На ОУ4 выполнен интегратор для организации астатического режима работы акселерометра, повышающего точность в статике. На ОУ5 формируется пропорциональная составляющая регулятора. Схема на ОУ6 суммирует пропорциональную, дифференциальную и интегральную части сигнала, управляющего маятником.

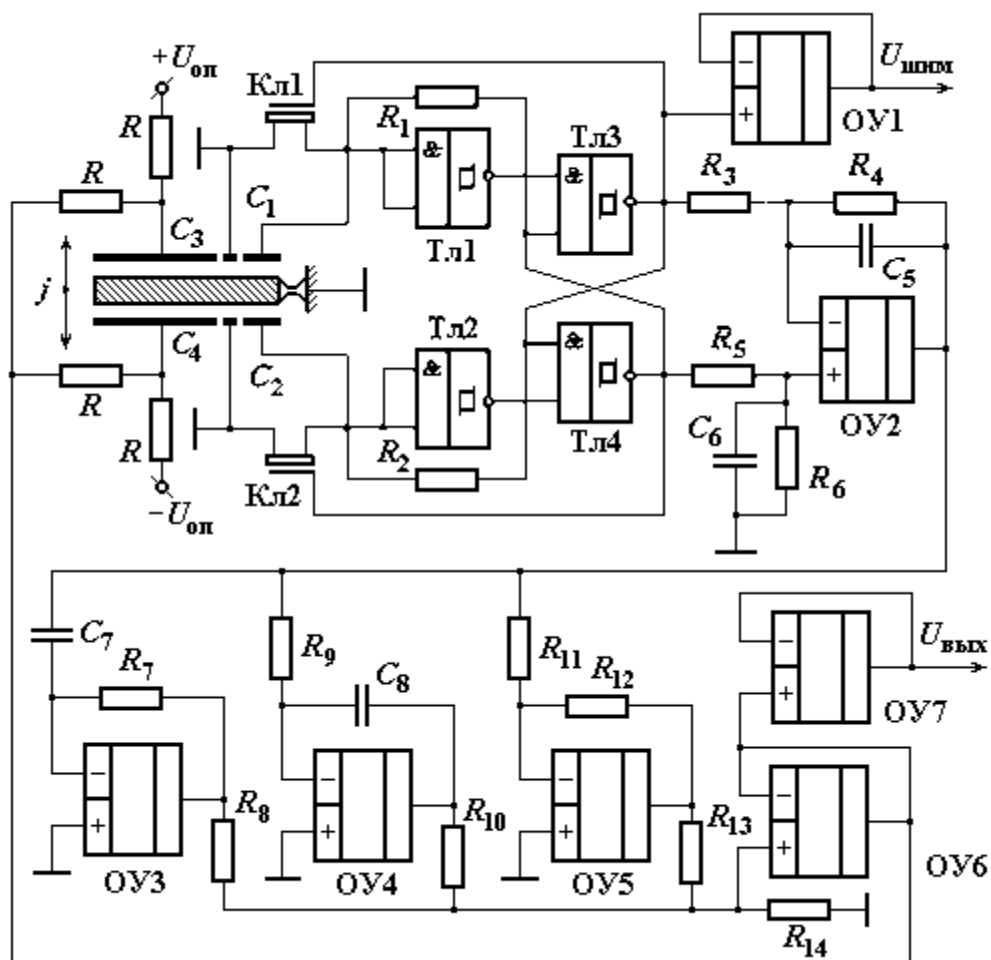


Рис. 3. Принципиальная схема акселерометра с электростатической силовой обработкой

Измеряемая величина при наличии ПИД-контроллера будет отработана пропорциональной составляющей обратной связи, а ошибка стабилизируется на значении, близком к нулю. Выходной же сигнал будет полностью обеспечивать интегральная составляющая регулятора. Дифференциальная составляющая противодействует предполагаемым отклонениям регулируемой величины, которые могут произойти в будущем. Эти отклонения могут быть вызваны внешними возмущениями или запаздыванием воздействия регулятора на систему. Чем больше скорость отклонения регулируемой величины от измеряемого значения, тем сильнее противодействие, создаваемое дифференциальной составляющей. Это есть скоростной принцип демпфирования подвижных узлов, аналогичный вязкостному демпфированию. Таким образом, вязкий газ в камере маятника исключается, а выполнение функций демпфирования возлагается на электронный ПИД-контроллер. Принципиальная электрическая схема акселерометра приведена на рис. 3, а на рис. 4 – его структурная схема.

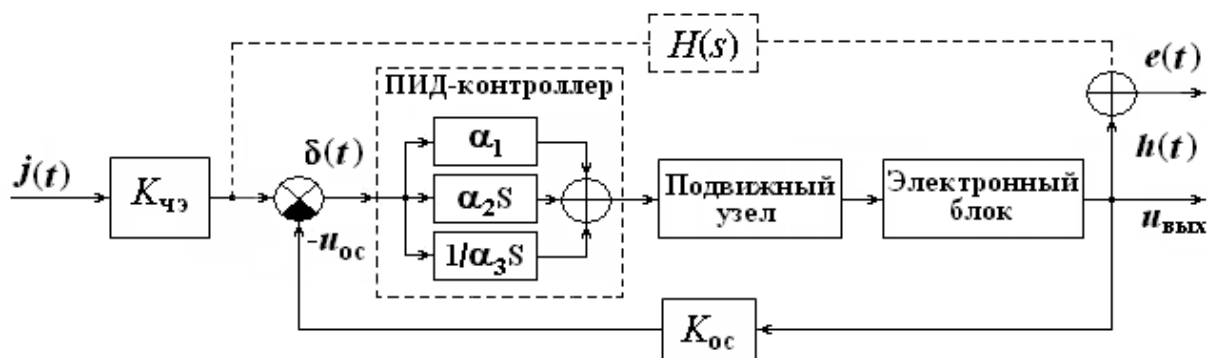


Рис. 4. Структурная схема микроакселерометра с ПИД-контроллером

Конкретные математические описания звеньев структурной схемы приведены в табл. 1.

Таблица 1

Математическое описание звеньев структурной схемы

Функциональное звено	Передаточная функция	Параметры
Чувствительный элемент	$K_{чз} = mx_c$	$m = \gamma_M a_M c_M (b_{M1} - b_{M2})$
Момент инерции маятника	$J_z = (m_1 + m_2) \times$ $\times [a_M^2/3 + c_M^2/12 + a_{п}^2/4 - x_c(a_{п} - x_c)]$ $+ (m_1 - m_2)a_M(a_{п}/2 - x_c)$	$m_1 = \gamma_M a_M b_{M1} c_M,$ $m_2 = \gamma_M a_M b_{M2} c_M$
Координата центра тяжести	$x_c = \frac{b_{M1}(a_M + a_{п}) + b_{M2}(a_M - a_{п})}{2(b_{M1} + b_{M2})}$	
Подвижный узел	$W_{пу}(s) = 1 / (J_z s^2 + K_{дy} s + G_y)$	
Коэффициент демпфирования	$K_{дy} = \mu a_M^6 / (4h^3)$	μ - вязкость газа
Механическая жесткость подвеса	$G_y = \frac{E_{[100]} b_{п} c_{п}^3}{16a_{п}}, G_{кр} = \frac{5\sqrt{3} E_{[100]} c_{п}^3}{32(1 + \gamma) a_{п}}$	G_y - жесткость на изгиб, $G_{кр}$ - жесткость на кручение
Датчик перемещений и электронный блок	$W_{yc} = \frac{U_{оп} x_c}{h} \frac{K_{yc}}{1 + \tau s}$	$U_{оп} = U_{ст}$ $K_{yc} = R_4/R_3 = R_5/R_6$
ПИД-контроллер	$W_{кор}(s) = x + ys + \frac{1}{zs}$	x, y, z - коэффициенты настройки ПИД-контроллера
Датчик момента	$K_{ос} = 2\epsilon\epsilon_0 U_{оп} l_{ц} F / h^2$	$F = a_M b_{M2}$

Таким образом, с учетом структурной схемы и соотношений табл. 1 полная передаточная функция компенсационного акселерометра с электростатической обратной связью и с ПИД-контроллером в прямой цепи контура регулирования будет иметь вид

$$W_{акс}(s) = \frac{K(\beta_2 s^2 + \beta_1 s + \beta_0)}{\alpha_4 s^4 + \alpha_3 s^3 + \alpha_2 s^2 + \alpha_1 s + \alpha_0}, \quad (1)$$

где

$$K = K_{чз} K_{пп} K_{yc}, \alpha_4 = Jz\tau; \alpha_3 = K_{дy} z\tau + Jz; \alpha_2 = Gxz\tau + K_{дy} z + K_{ос} K_{пп} K_{yc} yz;$$

$$\alpha_1 = (G_y + K_{ос} K_{пп} K_{yc})z; \alpha_0 = K_{ос} K_{пп} K_{yc}; \beta_2 = yz; \beta_1 = xz; \beta_0 = 1.$$

Настроить ПИД-контроллер – это значит определить его неизвестные коэффициенты x , y , z на оптимальный режим микроакселерометра, например, на оптимальный переходный процесс. В данном случае определение неизвестных коэффициентов осуществлялось методом Монте-Карло [2], заключающимся в переборе случайных чисел для x , y , z и подстановке их в аналитическое выражение для переходного процесса, записанного по передаточной функции (1). Далее идет сравнение с оптимальным переходным процессом, в качестве которого взята нарастающая единичная ступенька. Начальные значения и число итераций задается в программе в зависимости от требуемой точности. После каждого сравнения вычисляется минимум среднеквадратического отклонения (СКО) искомой характеристики переходного процесса от оптимальной. В качестве результата в конце цикла расчетов выдаются численные значения коэффициентов x , y , z ПИД-контроллера, соответствующие минимуму СКО.

Ниже приведен пример компьютерной программы на Матлабе для вычисления коэффициентов x , y , z ПИД-контроллера в задаче о настройке корректирующего устройства в контуре микродатчика. Все пояснения к программе приведены в комментариях.

```
function [Wopt,K,СКО]=СКО(x,y,z);
clc
%Accelerometr with feedback:
%density of silicon
rho=2328;
gamma=0.27
%The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
%acceleration of gravitation
g=9.80665;
%length of a pendulum
am=3.5e-3;
%width of a pendulum
bm1=3.5e-3;
bm2=3.3e-3;
%thickness of a pendulum
cm=1e-3;
m1=rho*am*bm1*cm;
m2=rho*am*bm2*cm;
m=m1+m2;
%length elastic springs
ap=2e-4;
%the thickness of an elastic spring
cp=10e-6;
%length of a shoulder of a pendulum
%viscosity of nitrogen
%mu=17.9e-6;
mu=0;
%the moment of inertia of a pendulum
Xc=(bm1*(am+ap)+bm2*(am-ap))/(2*(bm1+bm2));
J=(m1+m2)*(am^2/3+cm^2/12+ap^2/4-Xc*(ap-Xc))+(m1-m2)*am*(ap/2-Xc)
%number of springs
k=2;
%angular rigidity
Gy=k*(5*(sqrt(3))*E100*cp^4)/(32*(1+gamma)*ap)
h=7e-6;
%axial factor of attenuation
Kd=mu*(am*(bm1-bm2)^2)/h^3;
```

```

%angular factor of attenuation
Kdy=Kd*Xc^2;
%factor of transfer of a sensitive element
Kche=(m1-m2)*Xc;
%basic voltage
Uop=5;
eps0=8.85418782e-12;
epsazota=1;
F=2*am*bm2;
%Factor of transfer of a link of a feedback
Koc=2*eps0*epsazota*Uop*F*Xc/(h^2);
Kyc=2
%Factor of transfer of the gauge of a corner
Kpp=Uop*Xc*Q/h;
M=Kche*Kpp*Kyc
N=Koc*Kpp*Kyc
T=(J/Gy)^(1/2)
tau=0.00000005
x
y
z
b0=1; b1=x*z; b2=y*z;
a0=N; a1=Gy*z+N*x*z; a2=Kdy*z+Gy*z*tau+N*y*z; a3=J*z+Kdy*z*tau; a4=J*z*tau
%The closed transfer function
W=tf(M*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
%Not closed transfer function
%R=W/(1-W)
K=dcgain(W)
otn=N/Gy
jmax=Koc*Uop/((m1-m2)*Xc)
Umax=(Kche/Koc)*jmax
polosa=sqrt(a0/a2)
Wopt=minreal(W);
%вычисление СКО
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2);
clear
k=1;
rand('seed',0);
xn=0.005; yn=0.005; zn=0.005;
CKOmax=1e15;
while k<200
x0=xn*(1+rand(1,1));
y0=yn*(1+rand(1,1));
z0=zn*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x0,y0,z0);
if CKO<CKOmax
CKOmax=CKO; x=x0; y=y0; z=z0;

```

```

end
k=k+1;
end
clc
x; y; z;
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(x,y,z)
Figure 1
step(Wopt/K),grid

```

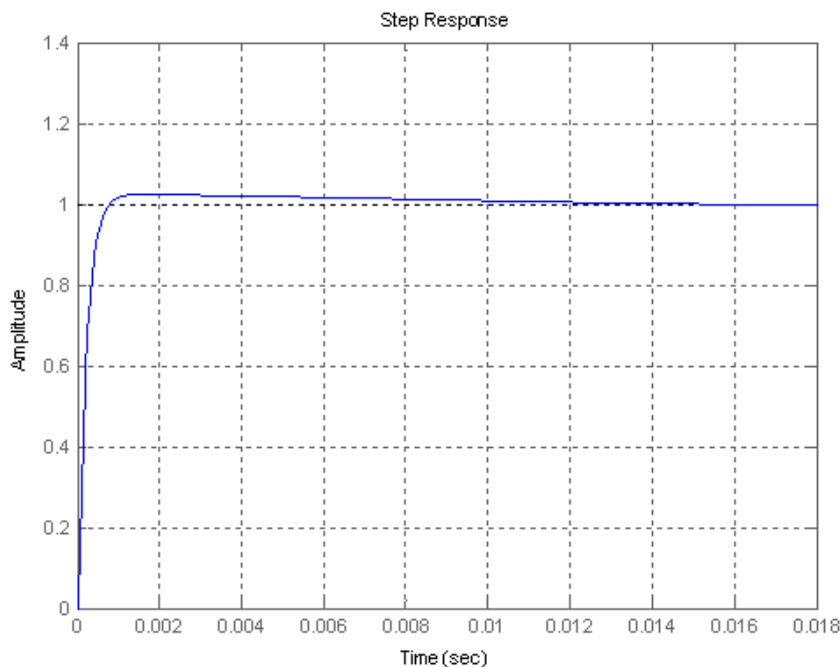


Рис. 5. Переходная характеристика микроакселерометра, соответствующая коэффициентам ПИД-контроллера: $x = 1.2115$; $y = 0.0100$; $z = 0.0058$

Вывод

Применение ПИД-контроллеров в контурах регулирования микродатчиков является эффективным средством и позволяет легко получать оптимальные характеристики.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов. – Н. Новгород: НГТУ, 2003. – 503 с.
2. **Дьяконов, В.П.** SIMULINK 5/6/7. – ДМК Пресс, 2008. – 770 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

V.D. Vavilov, A.V. Ulyushkin

TUNING OF A CORRECTING DEVICE IN A MICROSENSOR CIRCUIT

We consider the principle of application of electronic PID-controllers in microsensor adjustment circuits, and show their effectiveness for obtaining the optimal characteristics. We provide a practical example of modeling the characteristics of a compensational electrostatic accelerometer.

Key words: microaccelerometer, pendulum, PID-controller, damping, pulse-duration modulation (PDM)

УДК 531.768.082.14

И.В. Вавилов, А.В. Корнилов

КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЧУВСТВИТЕЛЬНОГО ЭЛЕМЕНТА ТИПА «НЕСИММЕТРИЧНЫЙ МАЯТНИК»

Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»

Рассмотрен принцип снижения погрешностей микроакселерометра от поперечных составляющих за счет уменьшения длины упругого подвеса. Приведено сравнение результатов, получаемых по минимизированной передаточной функции и по исходной.

Ключевые слова: микроакселерометр, маятник, упругий подвес, демпфирование, чувствительность.

Чувствительный элемент типа «несимметричный маятник» приведен на рис. 1. В маятнике имеется небольшая часть несбалансированной массы, которая воспринимает линейные ускорения. На рис. 1 несбалансированная масса показана затененной.

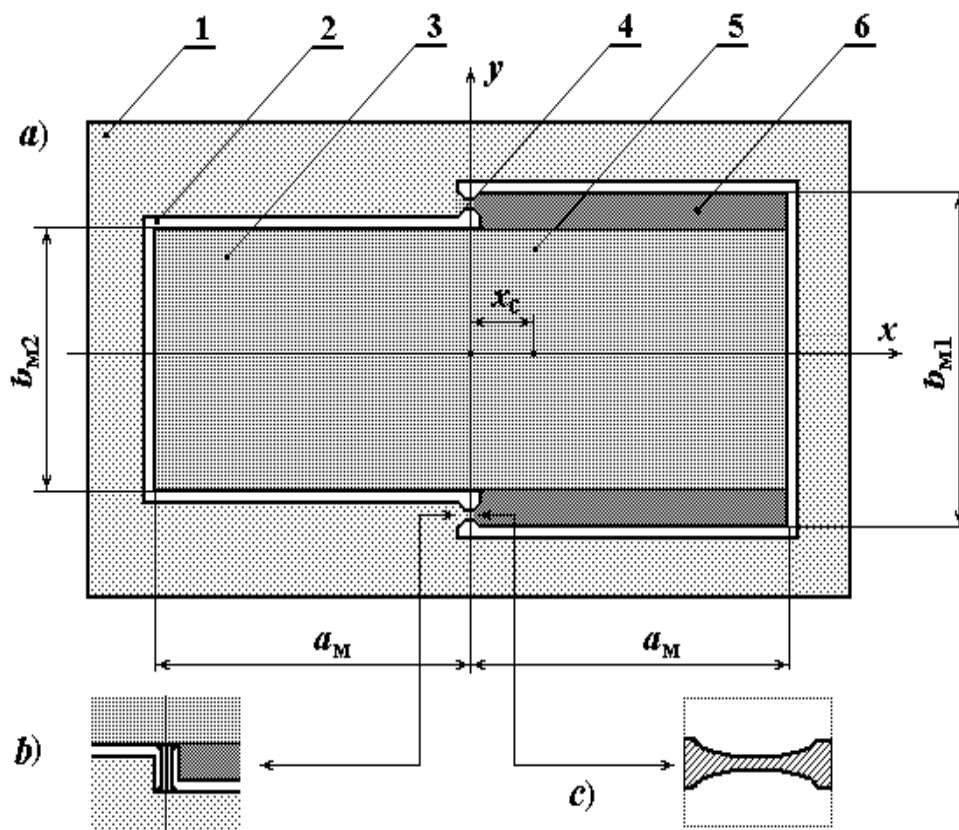


Рис. 1. «Несимметричный маятник»:

a – маятник с подвесами на изгиб, *b* – подвес, работающий на кручение, *c* – фрагмент криволинейного подвеса: 1 – проводящая кремниевая пластина; 2 – контур сквозного травления; 3 – первая чувствительная масса; 4 – упругий подвес; 5 – вторая чувствительная масса; 6 – рабочая разность масс

Известно [1], что маятник с подвесами, работающими на кручение, имеет одну степень свободы, а с подвесами, работающими на изгиб – две: угловое смещение относительно оси

качания и линейное по оси y . Применение подвесов с криволинейными обводами характерно тем, что ось качания сосредоточена в минимальном сечении, и свойства маятника становятся близкими к системам с одной степенью свободы. Передаточная функция «несимметричного маятника» с подвесами, работающими на изгиб, определяется в виде:

$$W_{\text{пн}}(s) = mx_c \sum_{m=0}^{m=2} b_m s^m / \sum_{n=0}^{n=4} a_n s^n, \quad (1)$$

где коэффициенты передаточной функции находятся через параметры подвижного узла:

$$\left. \begin{aligned} b_0 &= \left(\frac{G_y}{x_c^2} + G \right), b_1 = \left(\frac{K_{\text{дл}}}{x_c^2} + K_{\text{д}} \right), b_2 = \frac{J_y}{x_c^2}, a_0 = GG_y, a_1 = K_{\text{д}}G_y + K_{\text{дл}}G, \\ a_2 &= mG_y + (J_y + mx_c^2)G + K_{\text{д}}K_{\text{дл}}, a_3 = mK_{\text{дл}} + (J_y + mx_c^2)K_{\text{д}}, a_4 = mJ_y. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Соответственно параметры маятника: жесткость подвесов, момент инерции, абсолютный коэффициент демпфирования и другие определяются однозначно конструктивными данными: $G = 2E_{[100]}c_{\text{п}}^3b_{\text{п}}/a_{\text{п}}^3$ - осевая жесткость упругих подвесов; $G_y = 2E_{[100]}c_{\text{п}}^3b_{\text{п}}/a_{\text{п}}$ - угловая жесткость упругих подвесов; $x_c = [b_{\text{м}1}(a_{\text{м}} + a_{\text{п}}) + b_{\text{м}2}(a_{\text{м}} - a_{\text{п}})]/[2(b_{\text{м}1} + b_{\text{м}2})]$ - координата центра тяжести маятника относительно оси качания; $J_y = (m_1 + m_2)[a_{\text{м}}^2/3 + c_{\text{м}}^2/12 + a_{\text{п}}^2/4 - x_c(a_{\text{п}} - x_c)] + (m_1 - m_2)a_{\text{м}}(a_{\text{п}}/2 - x_c)$ - момент инерции маятника относительно оси качания; $K_{\text{д}} = 2\mu ab^3/h^3$ - осевой абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования; $K_{\text{дл}} = 2\mu ab^3x_c/h^3$ - маятниковый абсолютный коэффициент газодинамического демпфирования; m_1, m_2 - масса первого и второго плеча маятника; $a_{\text{м}}, b_{\text{м}}, c_{\text{м}}$ - размеры маятника (длина, ширина и толщина); $a_{\text{п}}, b_{\text{п}}, c_{\text{п}}$ - размеры упругого подвеса (длина, ширина и толщина); μ - динамическая вязкость газа демпфирования.

Крутизну статической характеристики чувствительного элемента определим из (1) с учетом (2) при $s = 0$:

$$K_4^{\text{ст}} = \frac{mx_c}{G_y} + \frac{m}{x_c G}. \quad (3)$$

При рассмотрении математической модели подвижного узла интегрального акселерометра с подвесами, работающими на кручение, можно получить передаточную функцию, аналогичную (1), с той лишь разницей, что изгибную жесткость G_y следует заменить на жесткость для кручения $G_{\text{кр}}$. Таким образом, здесь нет принципиальных затруднений в построении математической модели ЧЭ, но есть технологические, например, изготовление шестигранного или крестообразного подвесов на кручение.

Однако в практических конструкциях акселерометров, в целях подавления влияний тех или иных боковых составляющих, ЧЭ выполняют осевого или маятникового типа. При этом исключаются взаимные влияния между линейными и угловыми перемещениями, а система уравнений, отвечающих передаточной функции (1), распадается на два самостоятельных уравнения:

- для ЧЭ осевого типа $m\ddot{y} + K_{\text{д}}\dot{y} + G_y = ma_{\text{к}}$;
- для ЧЭ маятникового типа $J_y\ddot{\alpha} + K_{\text{дл}}\dot{\alpha} + G_y\alpha = ma_{\text{к}}x_c$,

где $a_{\text{к}}$ - компонента ускорения, действующего на корпус и ЧЭ акселерометра, представляющая собой входное воздействие в виде сложной функции времени.

Как правило, акселерометры выполняют для измерения одной компоненты, а для измерения полного ускорения строят блок из шести акселерометров: трех линейных и трех угловых. При разработке и исследовании акселерометров дифференциальные уравнения удобно представить в виде передаточных функций, применив преобразование Лапласа. Передаточные функции эквивалентны дифференциальным уравнениям, т.е. также содержат

исчерпывающую информацию о статических и динамических характеристиках разрабатываемых приборов. Передаточные функции осевого и маятникового ЧЭ можно представить в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} W_o(s) = y(s)/a_k(s) &= \frac{m}{ms^2 + K_d s + G} = \frac{K_o}{\frac{1}{\omega_o^2} s^2 + 2\xi_o \frac{1}{\omega_o} s + 1}, \\ W_M(s) = \alpha(s)/a_k(s) &= \frac{ml_c}{J_y s^2 + K_{дy} s + G_y} = \frac{K_M}{\frac{1}{\omega_M^2} s^2 + 2\xi_M \frac{1}{\omega_M} s + 1}, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $K_o = m/G$, $K_M = ml/G_y$ - статические коэффициенты передачи осевого и маятникового ЧЭ; $\xi_o = K_d / (2\sqrt{mG})$, $\xi_M = K_{дy} / (2\sqrt{J_y G_y})$ - относительные коэффициенты демпфирования осевого и маятникового ЧЭ соответственно; $\omega_o = \sqrt{G/m}$, $\omega_M = \sqrt{G_y/J_y}$ - собственные частоты осевого и маятникового ЧЭ.

Независимо от типа подвижного узла, его нормированная АЧХ имеет следующий вид:

$$\bar{A}(\omega) = A(\omega)/A(0) = \omega_o^2 / \sqrt{(\omega_o^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2 \omega^2 \omega_o^2}.$$

В частном случае при большом передемпфировании подвижного узла и мягком подвесе, т.е. при $K_d s \gg ms^2 + G$, ЧЭ может выполнять роль механического интегрирующего звена, что позволяет использовать его для построения акселерометров с импульсной обратной связью, обладающих повышенной точностью и простотой реализации частотного выходного сигнала.

Покажем далее, что при выполнении коротких подвесов в конструкции маятника, передаточную функцию четвертого порядка (1) можно снизить до второго порядка. Для этой цели представим (1) в эквивалентной форме в виде произведения двух функций:

$$W_{ny}(s) = \left(\frac{mx_c}{Js^2 + K_{дy}s + G_y} \right) \left(\frac{J_y/x_c^2 s^2 + (K_{дy}/x_c^2 + K_d)s + G_y/x_c^2 + G}{ms^2 + K_d s + G} \right), \quad (5)$$

где $J = J_z + mx_c^2$ - момент инерции маятника относительно оси качания.

При снижении длины подвеса угловая жесткость возрастает по линейному закону, а осевая - по кубическому. В пределе второе слагаемое при бесконечном росте осевой жесткости стремится к единице:

$$\lim_{G \rightarrow \infty} \frac{J_y/x_c^2 s^2 + (K_{дy}/x_c^2 + K_d)s + G_y/x_c^2 + G}{ms^2 + K_d s + G} = 1.$$

Таким образом, передаточная функция подвижного узла с предельно короткими подвесами может быть оценена колебательным звеном второго порядка:

$$W_{ny}(s) = \frac{mx_c}{Js^2 + K_{дy}s + G_y}, \quad (6)$$

с коэффициентом передачи в статике

$$K_2^{ст} = \frac{mx_c}{G_y}.$$

Оценим инструментальную погрешность в статике при допущении математической модели маятника в виде передаточной функции второго порядка:

$$\delta = \frac{K_4^{ст} - K_2^{ст}}{K_4^{ст}} = \frac{a_{п}^2}{3(a_{п}^2 + a_{м}^2)}.$$

Для проверки адекватности полученной передаточной функции (6) была разработана компьютерная программа, позволившая рассчитать по оптимальному переходному процессу величину необходимого зазора между подвижным и неподвижным электродами маятника. Величины зазоров в том и другом случаях совпали, что подтверждает справедливость преобразования передаточных функций.

```
function [Wopt,K,CKO]=CKOfun(h);
%Accelerometr (ЧЭ)
%density of silicon
rho=2328;
%The module of elasticity of silicon (100)
E100=1.295e11;
%acceleration of gravitation
g=9.80665;
%length of a pendulum
am=2.5e-3;
%width of a pendulum
bm1=2.5e-3
bm2=2.0e-3
%thickness of a pendulum
cm=0.5e-3;
%length elastic springs
%width of an elastic spring
ap=15e-6;
%width of an elastic spring
bp=1e-4;
%the maximal and minimal thickness of an elastic spring
cpmax=1e-4;
cpmin=20e-6;
r=(cpmax-cpmin)/cpmin;
%length of a shoulder of a pendulum
Xc=(bm1*(am+ap)+bm2*(am-ap))/(2*(bm1+bm2));
%viscosity of nitrogen
mu=17.9e-6;
%weight of a pendulum
m1=rho*am*bm1*cm;
m2=rho*am*bm2*cm;
m=m1+m2;
%the moment of inertia of a pendulum
J=(m1+m2)*(am^2/3+cm^2/12+ap^2/4-Xc*(ap-Xc))+(m1-m2)*am*(ap/2-Xc)
%function of curvature
f=3*atan(sqrt(2*r))/(4*sqrt(2*r))+(5+6*r)/(4*(1+2*r)^2);
%the moment of inertia of section of a spring
Jp=(pi*bp*cpmin^3)/64;
%number of springs
k=2;
%angular rigidity
Gy=(k*E100*Jp)*f/ap;
%axial rigidity
```

```

G=(3*k*E100*Jp)*f/(ap^3);
%backlash between a pendulum and an electrode
h=2.5e-5
%axial factor of attenuation
Kd=mu*((am*bm1)^2+(am*bm2)^2)/h^3;
%angular factor of attenuation
Kdy=Kd*Xc^2;
%factor of transfer of a sensitive element
Kche=m*Xc;
%factors of numerator
b0=G+Gy/Xc^2
b1=Kd+Kdy/Xc^2
b2=J/Xc^2
%factors of a denominator
a0=G*Gy
a1=Kd*Gy+Kdy*G
a2=m*Gy+(m*Xc^2+J)*G+Kd*Kdy
a3=m*Kdy+Kd*(m*Xc^2+J)
a4=m*J
%transfer function
W=tf(Kche*[b2 b1 b0],[a4 a3 a2 a1 a0])
%W=tf(Kche*[1],[J Kdy Gy])
A=Kche*b0/a0
T=sqrt(J/Gy)
K=dcgain(W)
damp(W/A)
%alfa=A*g/Gy
figure(1)
bode(W/A),grid
figure(2)
step(W/A),grid
Wopt=minreal(W);
%вычисление СКО
dt=.00001;
t=[0:dt:2]';
u=1-dirac(t+1e-15);
%dzeta=1/sqrt(2);
%lambda=(sqrt(1-dzeta^2))/T;
%tetta=atan(lambda*T/dzeta);
%i=sin(lambda*t+tetta);
%j=1/(lambda/T);
%k=-dzeta*t/T;
%u=1-j*exp(k).*i;
h=lsim(Wopt/K,u,t);
CKO=dt*sum((h-u).^2);

clear
k=1;
rand('seed',0);
h=2.4379e-005;
CKOmax=1e15;

```

```
while k<200
h0=h*(1+rand(1,1));
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(h0);
if CKO<CKOmax
CKOmax=CKO;
h=h0;
end
k=k+1;
end
clc
h
[Wopt,K,CKO]=CKOfun(h)
step(Wopt/K),grid
```

Выводы

1. Применение коротких подвесов с криволинейными обводами позволяет преобразовать передаточную функцию четвертого порядка для маятника к второму порядку.
2. Численные оценки показывают величину погрешности при этом на уровне $\delta \approx 10^{-6}$, что значительно ниже требуемой суммарной погрешности.

-
1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики: учебник / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.

*Дата поступления
в редакцию 16.04.2010*

I.V. Vavilov, A. Kornilov

FEATURES OF A SENSITIVE ELEMENT OF THE “ASYMMETRIC PENDULUM” KIND

We consider a principle of reducing microaccelerometer errors for transversal components by decreasing the length of the flexible suspension. We provide a comparison of results obtained for the optimized transfer function, and the original one.

Key words: microaccelerometer, pendulum, flexible suspension, damping, sensitivity.

**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 в редакторе MS Equation 3–12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисовочная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, аннотации и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

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

№ 2 (81)

Редакторы: **Е.В. Комарова, Т.В. Третьякова**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24,
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 10.06.2010. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 44,75. Уч.-изд. л. 46,7. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»