

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

№ 1 (86)

Нижний Новгород 2011

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, 2011. № 1 (86). – 354 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

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, 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, 2011

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION

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

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

№1 (86)

Nizhni Novgorod 2011

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2011. № 1 (86). – 354 p.

The journal is issued 4 times a year

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

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, V.K. Maystrenko,
A.M. Groshev, S.N. Khrunkov, S.V. Khvatov, I.O. Leushin, M.G. Mikhalevko,
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
Г.И. Шишков Г.И. Широкополосные фиксированные аттенюаторы.....	11
Иларионов Ю.А., Ермолаев А.И. Вывод рекуррентных соотношений из дифференциальных уравнений.....	22
Гай В. Е. Алгоритм классификации сигналов	29
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	35
Зайцев А.И., Пелиновский Е.Н., Ялченир А. Прогноз высот волн цунами на Черноморском побережье России.....	35
Громов Е.М., Солычева О.М., Тютин В.В. Распространение нелинейных векторных волновых пакетов малой протяженности в плавно неоднородных средах.....	44
Масленников Д.А., Катаева Л.Ю., Куркина О.Е., Куркин А.А. Моделирование движения тонкой плёнки под действием периодически изменяющегося внешнего поля скоростей	53
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	58
Утробин В.А. Информационная модель перцептивного пространства. Перспектива при больших углах зрения.....	58
Никулин Е.А. Новый метод изменения порядков кривых и поверхностей Безье.....	70
Поселенов Е.Н., Преображенский А.В. Области работоспособности авторулевого с ПД-регулятором.....	78
Кулагина Л.В. Математическая модель распределенной базы данных для корпоративных информационных систем.....	83
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	89
Кабалдин Ю.Г., Дементьев В.И., Рыжова Т.Ю. Пространственная структура триплетного генетического кода и некоторые ее свойства в плоских изображениях.....	89
Кучма В.Е., Рябикина Т.В., Мякишева С.Ю. Определение режимов для нанесения покрытий холодным чернением сталей составом.....	98
Рябикина Т.В., Старостина О.Н. Исследование стабильности и настроенности процесса изготовления детали «Коромысло».....	103
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	110
Полуничев В.И., Шумайлов Г.П., Вешняков К.Б., Горбунов П.А. Регулирующие устройства системы пассивного отвода тепла для АЭС «Куданкулам» (Индия).....	110
Козлов М.В., Андреев В.В. Создание коррозионностойких пластин для разборных пластинчатых теплообменников.....	117
Мельников В. И., Егоров Г. А. Ультразвуковая волноводная система для визуализации потока двухфазного теплоносителя.....	124

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	130
Палутин Ю.И. Область применения безразмерных критериев подобия при оценке вентиляционных систем автомобиля.....	130
Кузьмин Н.А., И.О. Донато И.О. Выбор граничных условий для моделирования....	138
Куляшов А.П., Тютнев И.А. Нагрузки, действующие на трубоукладчики при выполнении технологического процесса.....	148
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	153
Зуев В.А., Грамузов Е.М. Физическое моделирование движения судна в битых льдах....	153
Кикеев В.А., Коротин П.И., Салин М.Б., Суворов А.С. Акустическое излучение механикоакустических систем, находящихся под воздействием гидрстатического давления..	161
Лимонов А.К., Захаров Л.А., Химич В.Л., Захаров И.Л., Сеземин А.В. Новые тенденции в конструировании рядных дизельных двигателей с рабочим объемом цилиндра 10,64 л.....	169
Захаров Л.А., Тарасов А.Н., Химич В.Л., Захаров И.Л. Совершенствование термодинамических показателей поршневого двигателя, работающего по гибриднему циклу.....	174
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	185
Хватов О.С., Дарьенков А.Б., Тарпанов И.А., Пшеничников В.В. Имитационная модель дизель-генераторной электростанции переменной скорости вращения с интеллектуальной системой управления топливоподачей.....	185
Плехов А.С., Охотников, М.Н., Титов В.Г. Технология энергосбережения в электроприводе.....	193
Алтунин Б.Ю., Карнавский И.А. Имитационная модель системы управления компенсатора реактивной мощности и мощности искажений на базе многоуровневого каскадного инвертора.....	204
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	210
Кидалов Н.А., Осипова Н.А., Закутаев В.А., Ковязина Ю.М. Комплексная методика оценки адгезионного взаимодействия компонентов формовочных песчано-глинистых смесей с поверхностью материала модельно-технологической оснастки....	210
Ключников В.А., Мишакин В.В., Данилова Н.В. Оценка поврежденности стали 08х18н10т на ранних стадиях усталостного нагружения с помощью неразрушающих методов контроля.....	216
Мыльников В.В., Пронин А.И., Чернышов Е.А. Исследование влияния керамических материалов на работоспособность режущего инструмента.....	227
Илларионов И.Е. Теоретические основы формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей.....	233
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	243
Востоков В.М., Смирнова В.М., Дегтяренко Г.Л. Оценка экологического риска биотехнологий.....	243
Никандров М.И., Никандров И.С. Исследование очистки печных газов, обезвреживание отходов производства хлорорганических веществ промывкой соляной кислотой перед переработкой газов в хлорид аммония.....	252

Борисенко А.С., Ксандров Н.В. Экологическая ресурсосберегающая переработка серноокислотных растворов.....	258
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	265
Ершов Д.Е. Системный подход анализа региональных рынков на основе методики проникающих показателей.....	265
Яшин С.Н., Лазарев П.И. Выбор критериев оценки эффективности инновационных проектов внедрения дополнительных услуг связи	272
Юрлов Ф.Ф., Новикова В.Н. Оценка эффективности инновационных решений в экономике в условиях неопределенности.....	278
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	284
Зайцева Е.А., Савченко И.А. Проблема лидерства в отечественной науке: эволюция взглядов и основные подходы.....	284
Чуева Д.Г. Болонский процесс в восприятии преподавателей вуза.....	297
Рыбаков Н.В. Концепция документной культуры организации: теоретический анализ.....	303
Савенкова Е.С. Западнические идеи в русском социокультурном дискурсе и их персонификации в романе Ф.М. Достоевского «Идиот».....	312
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	321
Вавилов В.Д. Защита микросистемных приборных средств от вибрационной и ударной нагрузки.....	321
Ермолаев А.В. Исследование акустических характеристик микросистемных приборных средств при вибрационной и ударной нагрузке в безэховой камере.....	327
Обухов В.И. Проектно-технологическое обоснование возможности использования электромагнитного датчика в микромеханических акселерометрах.....	332
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	337
Чебочко Н. Г. Деформации классических алгебр Ли типа D_l над полем характеристики 2.....	337
Елисеев М.Е., Елисеев Е.М. О некоторых коллинеациях конечных проективных плоскостей.....	342
Верещагина Е.И. О единственности решения обратной задачи антагонистической игры с различными элементами платёжной матрицы.....	346

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Shishkov G.I. Wideband fixed attenuators.....	11
Ilarionov Y.A., Ermolaev A.I. Derivation of recurrence relations from differential equations...	22
Gai V.E. Algorithm of signal classification	20
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	35
Zaytsev A.I., Pelinovsky E.N., Yalciner A. The forecast of the tsunami waves heights at the russian black sea coast.....	35
Gromov E.M., Solycheva O.M., Tyutin V.V. Short vector wave packets motion in smoothly inhomogeneous media.....	44
Maslennikov D.A., Kataeva L.Yu., Kurkina O.E., Kurkin A.A. Modeling the movement of a thin slick induced by periodically external velocity field.....	53
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	58
Utrobin V.A. Information model of perceptual space. Prospect at the high angles of vision...	58
Nikulin E.A. New method of bézier curves and surfaces order modification.....	70
Poselenov E.N., Preobrazhensky A.V. The regions of capacity for work of automatic pilot with pd-regulator.....	78
Kulagina L.V. Mathematical model of a distributed database for enterprise systems.....	83
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	89
Kabaldin U.G., Dementev V.I., Ryzhova T.U. Spatial structure of triplet genetic code and some of its properties in plane images.....	89
Kuchma V.E, Ryabikina T.V, Myakisheva S.U. Determining modes for coating cold blackening steel composition	98
Ryabikina T.V., Starostina O.N. Research of stability and attitude of process of marring of detail «Yoke».....	103
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	110
Polunichev V.I., Shumailov G.P., Veshnyakov K.B., Gorbunov P.A Passive heat removal system regulating devices for Kudankulam npp (India).....	110
Kozlov M.V., Andreev V.V. Production of inoxidizable plates to the gasketed plate heat exchangers.....	117
Melnikov V.I., Egorov G.A. Ultrasound wave-guide system for two-phase heat carrying flows visualization.....	124
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	130
Palutin Yu. I. The sphere of applying unlimited criteria of similarity automobile vent systems...	130
Kuzmin N.A, Donato I.O. Boundary conditions determination for machine elements thermal tensy simulation	138

Kulyashov A.P., Tutnev I.A. Workloads, influenced on pipelayer, on manufacturing operate.....	148
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	153
Zuev V.A, Gramuzov E.M. Physical modeling of vessel motion in broken ice.....	153
Kikeev V.A, Korotin P.I., Salin M.B., Suvorov A.S. Acoustic radiation of mechanical systems under the influence of hydrostatic pressure.....	161
Limonov A.K., Zakharov L.A., Khimich V.L., Zakharov I.L., Sezemin A.V. New trends in designing in-line diesel engine capacity cylinder 10.64L.....	169
Zakharov L.A., Tarasov A.N., Khimich V.L., Zakharov I.L. Perfection of thermodynamic indicators of the piston engine working on the hybrid cycle.....	174
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	185
Khvatov O.S., Daryenkov A.B., Tarasov I.M., Pshenichnikov V.V. Imitation model of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation with intellectual control system of fuel giving.....	185
Plehov A.S., Ohotnikov M.N., Titov V.G. Technology economy of electric power in the electric drive.....	193
Altunin B.U., Karnavskiy I.A. System control model of compensator reactive and distortion powers based on cascade multilevel inverter.....	204
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	210
Kidalov N.A., Osipova N.A., Zakutaev V.A., Kovyazina U.M. The complex evaluation methodology of adhesive interaction of component molding sand mixture with the surface of the material of modeling-technical snap.....	210
Klyushnikov V.A., Mishakin V.V., Danilova N.V. The damage estimating of 08cr18ni10ti steel in the early stages of fatigue loading using nondestructive methods.....	216
Mylnikov V.V., Pronin A.I., Chernyshov E.A. The research of ceramic materials' influence on functionality cutting instrument.....	227
Illarionov I.E. Theoretical grounds of shaping of physical-mechanical properties of sandy-argillaceous mixtures.....	233
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	243
Vostokov V.M., Smirnova V.M., Degterenko G.L. The environmental risk assessment of biotechnology.....	243
Nikandrov M.I., Nikandrov I.S. Investigation of treatment furnace gases neutralization of waste production organochlorin compounds by washing with hydrochloric acid before processing gases in ammonium chloride.....	252
Borisenko A.S., Ksandrov N.V. Ecological alternative processing of sulfuric acid solutions...	258
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	265
Ershov D. The systematic approach for the analysis of regional markets based on a methodology of interconnected parameters.....	265
Yashin S.N., Lazarev P.I. Measure selection for innovative projects efficiency assessment for value added services.....	272

Jurlov F.F., Novikova V.N. Evaluations of effectiveness of innovative solutions in economics subject to the existence of indeterminacy.....	278
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	284
Zaytseva E.A., Savchenko I.A. The problem of leadership in domestic science: evolution and other approaches.....	284
Chueva D.G. The Bologna process in the perceptions of teachers of higher school.....	297
Rybakov N.V. Concept of documentary culture of organization: theoretical analysis.....	303
Savenkova E.S. Western-ideas in Russian sociocultural discourse and its personification in the Dostoevsky's novel "Idiot".....	312
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	321
Vavilov V.D. Protection microsystems instrument remedies for vibratory and striking load...	321
Ermolaev A.V. Research of acoustic characteristic microseisms instrument means for vibratory and striking load in anechoic chamber.....	327
Obuchov V.I. Process engineering estimate of the use of electromagnetic moment detector in micromechanical acceleration indicators.....	332
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL AND SOCIAL SCIENCES	337
Chebochko N.G. The deformations of classical Lie algebras of type D_l over the field of characteristic 2.....	337
Eliseev M.E., Eliseev E.M. On the some collinations of the finite projective planes.....	342
Vereshagina E.I. On the unicity of the solution of the inverse problem for antagonistic game with different elements of payoff matrix.....	346

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.378.82

Г.И. Шишков

ШИРОКОПОЛОСНЫЕ ФИКСИРОВАННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Описаны принципы действия и конструкции широкополосных высокоточных фиксированных аттенюаторов.

Ключевые слова: фиксированные аттенюаторы, радиотехнические приборы, пластинчатые резисторы.

Введение

В различных областях радиотехники, средствах связи, радиоизмерительной аппаратуре широкое применение нашли различного вида аттенюаторы, предназначенные для изменения уровня электромагнитной энергии в волноведущих трактах.

Активно используются коаксиальные фиксированные аттенюаторы, которые применяются как самостоятельные устройства для калиброванного ослабления сигнала в коаксиальных линиях передачи, так и для согласования и развязки функциональных узлов и блоков в различной радиотехнической аппаратуре.

При создании аттенюаторов на фиксированные значения ослабления используются диссипативные структуры, представляющие собой отрезки волноводов с расположенными в них тонкопленочными резистивными элементами.

1. Фиксированные аттенюаторы на сосредоточенных резисторах

Наиболее простыми по конструкции являются аттенюаторы [1], выполненные в виде отрезка коаксиальной линии с потерями (рис. 1).

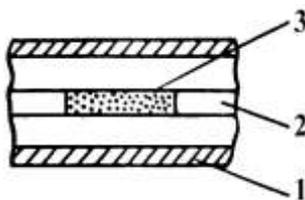


Рис. 1. Аттенюатор в виде коаксиальной линии с потерями:

1 – внешний проводник; 2 – центральный проводник; 3 – диэлектрический стержень с тонкой резистивной пленкой на поверхности

В разрыве центрального проводника коаксиала включен диэлектрический стержень, на поверхность которого нанесен тонкий резистивный слой (пленка). Величина вносимого таким аттенюатором ослабления в коротковолновой части диапазона определяется длиной и величиной сопротивления резистивного слоя:

$$A=4,34 R_1 \frac{l}{Z_0} \text{ дБ},$$

где Z_0 – волновое сопротивление коаксиальной линии; R_1 – погонное сопротивление; l – длина резистивного слоя.

Особенность таких аттенуаторов – зависимость ослабления от частоты, которая при заданном значении погонного сопротивления поглощающего участка определяется соотношением длин резистивного слоя и рабочей длины волны l/λ . На коротких волнах, где $l/\lambda = 3 - 5$, эта зависимость незначительна и возрастает с увеличением длины волны, когда соотношение $l/\lambda \rightarrow 1$. Поэтому на низких частотах (ниже 1 ГГц) применение таких аттенуаторов затруднительно из-за их больших размеров. Несмотря на кажущуюся простоту конструкции, такие аттенуаторы имеют ограниченное использование, особенно при работе с импульсными сигналами, спектр частот которых простирается до постоянного тока.

В диапазоне от постоянного тока до дециметровых длин волн широкое применение нашли коаксиальные аттенуаторы, представляющие собой Т- или П-образные делители напряжения (мощности) на сосредоточенных пленочных резисторах.

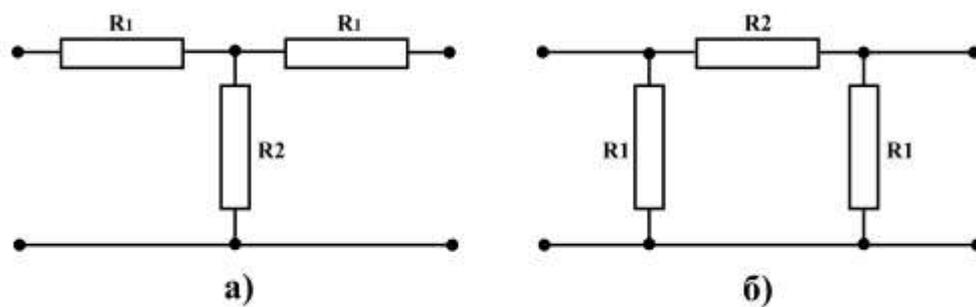


Рис. 2. Электрические схемы аттенуаторов, выполненных по Т- или П-образной схеме на сосредоточенных резисторах

Электрические схемы этих делителей показаны на рис. 2, а, б. Параметры аттенуаторов поддаются строгому инженерному расчету, что особенно важно при проектировании прецизионных аттенуаторов. В низкочастотном диапазоне волн (порядка единиц МГц) такие аттенуаторы могут служить в качестве образцовых мер ослабления.

Общим достоинством аттенуаторов на сосредоточенных резисторах является высокая точность величины вносимого ослабления, достаточно широкий диапазон частот (от постоянного тока до 3–4 ГГц), а на низких частотах (до 1 ГГц) – высокая степень согласования ($K_{СВН} = 1,05 - 1,15$) [2].

Однако на верхнем участке диапазона, где начинают влиять паразитные электрические емкости резисторов, у них имеется существенная зависимость ослабления от частоты и, кроме того, не удается обеспечить удовлетворительное согласование с трактом.

2. Фиксированные аттенуаторы на пластинчатых резисторах

Расширение диапазона частот, создание широкополосных коаксиальных аттенуаторов, минимизация частотной зависимости ослабления, улучшение согласования с трактом потребовали поиска новых электродинамических структур.

В 1960 году при выполнении опытно-конструкторской работы автором данной статьи впервые в мировой практике конструирования коаксиальных аттенуаторов было предложено в качестве их основы использовать новую электродинамическую структуру – отрезок круглого волновода, в диаметральной плоскости перегороденного тонкой резистивной пленкой (рис. 3).

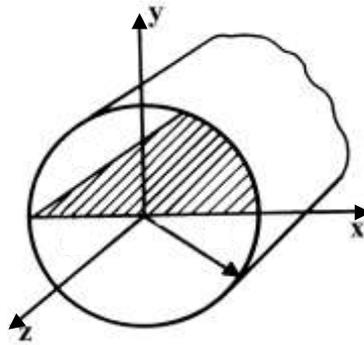


Рис. 3. Круглый волновод с тонкой резистивной пленкой

Реально эта структура представляет собой отрезок коаксиальной линии, в разрыв центрального проводника которой включен пластинчатый резистор (рис. 4), имеющий электрический контакт с корпусом (наружным проводником) линии.

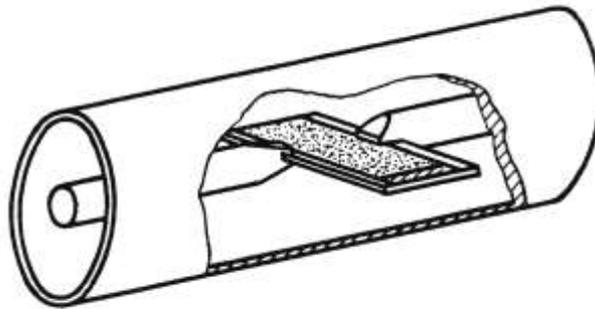


Рис. 4. Атенюатор коаксиальный

Пластинчатый резистор (рис. 5) представляет собой диэлектрическую пластину прямоугольной формы, на одну или обе стороны которой нанесен тонкий слой (меньше толщины скин-слоя) резистивного материала; там же имеются токопроводящие и корпусные контакты. Для точечных центральных контактов величина затухания на единицу длины резистивного слоя $A = 8,68 \frac{\pi}{D}$ дБ/ед. длины, где D – ширина слоя, равная диаметру волновода.

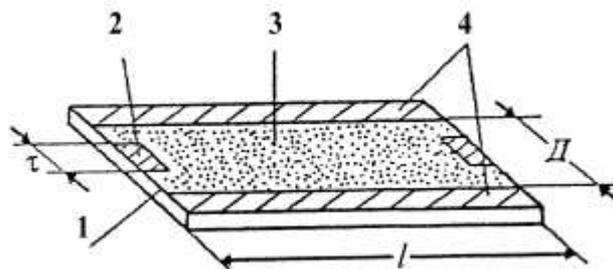


Рис. 5. Пластинчатый резистор С2-20 с односторонним резистивным покрытием:
 1 – диэлектрическая пластина; 2 – центральный контакт; 3 – резистивный слой; 4 – корпусные контакты; τ – ширина центрального контакта; D – ширина резистивного слоя

Эквивалентная схема аттенюатора на пластинчатом резисторе на постоянном токе представляет собой многоступенчатый делитель напряжения (рис. 6).

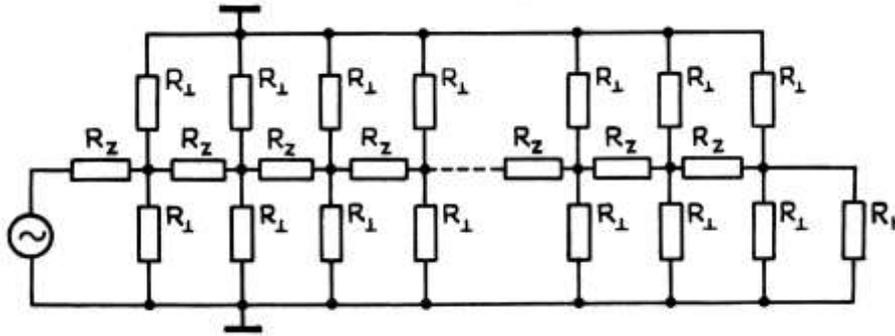


Рис. 6. Эквивалентная электрическая схема аттенюатора на пластинчатом резисторе

Сочетание высоких технических характеристик с относительной простотой конструкции и технологичностью изготовления в массовом производстве сделали такие аттенюаторы весьма перспективными, и они быстро получили широкое распространение в России и за рубежом.

Пластинчатые резисторы, выполненные с величиной удельного поверхностного сопротивления $R_{\Pi} \in [90-120]$ Ом/□, обеспечивали аттенюаторам наименьшую частотную зависимость ослабления. Эта область значений $R_{\Pi} \in [90-120]$ Ом/□ оказалась оптимальной как с точки зрения получения минимального погонного затухания, так и с точки зрения обеспечения максимально равномерного ослабления аттенюаторов в рабочем диапазоне частот, начиная от постоянного тока.

На базе разработанных и серийно освоенных пластинчатых резисторов С2-20 были сконструированы аттенюаторы типа ДО в коаксиальных трактах сечениями 16/4,6 мм (волновое сопротивление 75 Ом), 16/7 мм (волновое сопротивление 50 Ом) в диапазоне от постоянного тока до 3 ГГц и 10/4,34 мм (волновое сопротивление 50 Ом) в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц и налажен их промышленный выпуск.

Аттенюаторы имели номинальные величины ослабления 5, 10, 15, 20 дБ с погрешностью не более ± 2 дБ в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц при допустимой входной мощности 0,5 Вт. Величина КСВН не превышала 1,25.

Дальнейшие исследования позволили создать пластинчатый резистор С6-1 с односторонним резистивным покрытием (рис. 7).

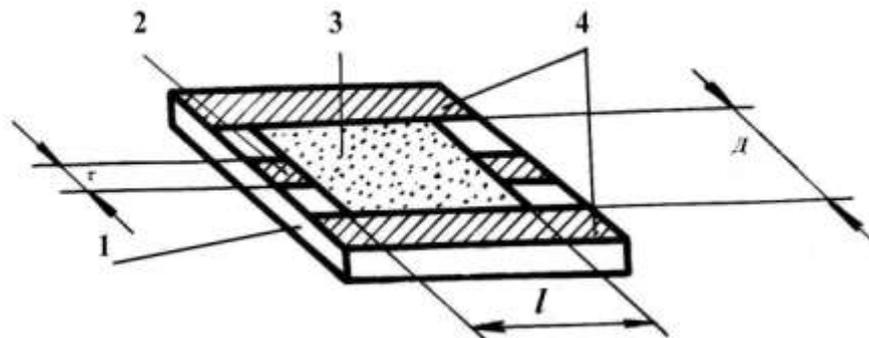


Рис. 7. Пластинчатый резистор С6-1 с односторонним резистивным покрытием:
1 – диэлектрическая пластина; 2 – центральный контакт; 3 – резистивный слой;
4 – корпусные контакты

Конструктивно резистор С6-1 отличается от резистора С2-20 тем, что его центральные контакты примыкают к резистивному слою прямоугольной формы. Такая конфигурация резистивного элемента улучшает частотные свойства аттенюаторов в верхней части диапазона частот и позволяет производить с высокой точностью инженерные расчеты параметров резистора.

стором на постоянном токе (длины и ширины резистивного слоя, ширины центральных контактов в зависимости от заданного ослабления).

Характеристики широкополосного аттенюатора (согласование, величина и частотная зависимость ослабления) в основном определяются параметрами резистора (удельным поверхностным сопротивлением, геометрическими размерами).

Однако дополнительно требуются соответствующие изменения и в конструкции волновода в месте расположения пластинчатого резистора. В работе [3] рассматривалась возможность построения аттенюаторов на основе пластинчатых тонкоплёночных резисторов, расположенных в эллиптическом экране. Экспериментально было показано, что использование такого экрана и соответствующий выбор параметров его поперечного сечения позволяют расширить (за счет подстройки согласования с коаксиальным трактом в полосе частот) рабочий диапазон частот и уменьшить частотную зависимость ослабления в верхней части диапазона.

На основе резисторов С6-1 были разработаны коаксиальные аттенюаторы Д2-33÷Д2-42 с широкой гаммой величин ослаблений (3, 5, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 дБ) и улучшенными характеристиками в диапазоне от постоянного тока до 5 ГГц (коаксиальный тракт 16/7 мм) [2] (рис. 8). Аттенюаторы серийно выпускались промышленностью.



Рис. 8. Внешний вид одной из конструкций аттенюаторов Д2-33 – Д2-42

Расширение диапазона рабочих частот коаксиальных аттенюаторов до 12–18 ГГц и выше потребовало проведения на электродинамическом уровне исследований неоднородных волноводных структур с резистивными пленками. Это связано с тем, что волновые процессы в них весьма сложны: на характер распространения и взаимодействия волн различных типов существенно влияют параметры как самой пленки, так и системы в целом.

В [4] проведен расчет затухания квази- H_{11} волны в круглом идеально проводящем волноводе с тонкой резистивной пленкой, расположенной в диаметральной плоскости волновода. Получено аналитическое выражение, определяющее зависимость коэффициента затухания от диаметра волновода и сопротивления пленки. Результаты расчетов показали, что при переходе к однородно заполненному волноводу структура поля рассматриваемой волны переходит в структуру поля волны H_{11} .

Структура поля в волноводе с резистивной пленкой в значительной мере определяется величиной удельного поверхностного сопротивления R_{Π} пленки. Затухание, в свою очередь, зависит от структуры поля. При $R_{\Pi} \approx 100 \text{ Ом}/\square$ структура поля оказывается такой, что общая величина тока в пленке имеет минимальное значение, т.е. и коэффициент затухания минимален.

В работе [5] рассмотрен круглый волновод с идеально проводящими стенками, в диаметральной плоскости которого находится диэлектрическая пластина с нанесенными на её поверхности тонкими резистивными пленками. Поперечное сечение волновода изображено на рис. 9. Его радиус – a , толщина диэлектрической пластины – $2b$, удельная поверхностная проводимость пленки – $\Delta\sigma \text{ (Ом}^{-1}\text{)}$, толщина пленки – Δ . Пластина с пленками размещена симметрично относительно диаметральной плоскости волновода.

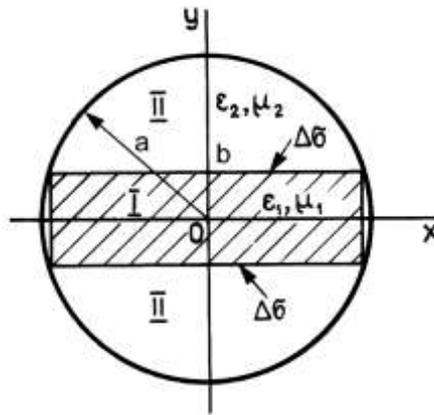


Рис. 9. Круглый волновод с резистивными пленками на диэлектрической подложке

В данной работе исследованы зависимости от частоты фазовой постоянной β_1 и коэффициента затухания β_2 волны квази- H_{11} . Для этого получено дисперсионное уравнение волн в рассматриваемом волноводе, составленное методом частичных областей с применением метода поверхностного тока [6]. Результаты решения уравнения в первом приближении (для β_2) приведены на рис. 10.

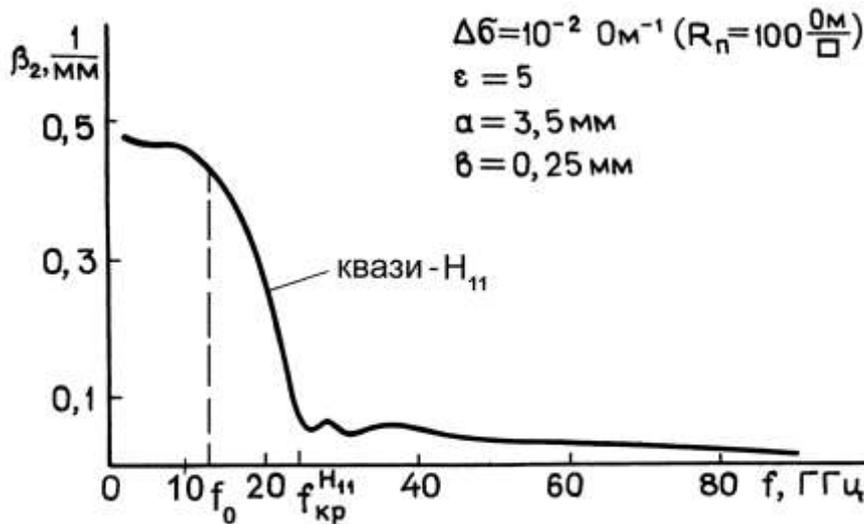


Рис. 10. Зависимость коэффициента затухания β_2 от частоты

Расчет проводился при поверхностном сопротивлении $R_{\Pi} = 100 \text{ Ом}/\square$. Из рисунка видно, что исследуемая волна не имеет критической частоты. Отсутствует скачок коэффициента затухания при переходе через частоту, соответствующую критической частоте полого волновода, а также видно, что с увеличением частоты затухание уменьшается. При этом резкий его спад наблюдается вблизи критической частоты волны H_{11} полого круглого волновода.

Результаты расчета показывают, что рассматриваемый волновод на основной волне является диссипативной системой лишь до частоты, соответствующей критической частоте волны H_{11} . При этом неравномерность затухания в диапазоне $f \in [0 - f_{кр}^{H_{11}}]$ можно регулировать параметрами пленки и диэлектрической подложки.

Из характеристики, представленной на рис. 10, видно, что широкополосный аттенюатор можно создать в диапазоне частот $[0 - f_0]$.

Для оценки применимости предложенной методики расчета коэффициента затухания

при разработке аттенуаторов было проведено сравнение результатов расчета с экспериментом. Измерения коэффициента затухания проводились на аттенуаторах с ослаблением 20, 30 и 40 дБ (сечение коаксиального тракта 7/3,04 мм). Расхождение расчетных и экспериментальных значений составило не более 5 %.

Влияние диэлектрической проницаемости подложки резисторов на коэффициент затухания аттенуаторов теоретически и экспериментально исследовано в работе [7]. Результаты расчета коэффициента затухания волны квази- H_{11} показали, что на низких частотах $f < (2 \div 3)$ ГГц диэлектрик практически не влияет на структуру поля и соответственно на затухание волны. На высоких частотах электромагнитное поле всё более втягивается в диэлектрик и сильнее взаимодействует с пленками. Показано, что влияние диэлектрика начинает сказываться на частотах 10–12 ГГц. Расхождение теоретических и экспериментальных данных составило не более 7 %.

Экспериментальные [3] и теоретические [8] исследования влияния различных неоднородностей волноводного тракта в месте расположения резистивных пленок показали, что применение эллиптических экранов является эффективным для обеспечения постоянного ослабления СВЧ аттенуаторов в широком диапазоне частот. В тех случаях, когда использование металлических экранов конструктивно затруднено, в местах нахождения резистивных пленок применяются так называемые регулировочные металлические винты.

Результаты исследований положены в основу разработки высокоточных широкополосных коаксиальных аттенуаторов.

На основе разработанных пластинчатых резисторов П2-4 с односторонним резистивным покрытием были созданы фиксированные аттенуаторы в диапазоне от постоянного тока до 12,4 ГГц (коаксиальный тракт сечением 7/3,04 мм) с номинальными значениями ослабления 3, 6, 10, 15, 20, 30 дБ, с погрешностью ослабления не более $\pm 0,8$ дБ, КСВН менее 1,5 и мощностью входного сигнала 1 Вт.

С увеличением рабочей частоты становится очевидной целесообразность применения пластинчатых резисторов с двухсторонним резистивным покрытием. В этом случае на высоких частотах уменьшается влияние диэлектрической проницаемости подложки резистора на затухание квази- H_{11} волны.

Были разработаны резисторы типа С6-8, на основе которых созданы аттенуаторы в диапазоне до 18 ГГц (коаксиальный тракт 7/3,04 мм) с номинальными величинами ослабления 3, 6, 10 дБ с погрешностью $\pm 0,6$ дБ и 20, 30 дБ с погрешностью $\pm 1,0$ дБ, КСВН менее 1,5 (рис. 11, 12).



Рис. 11. Внешний вид аттенуаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм

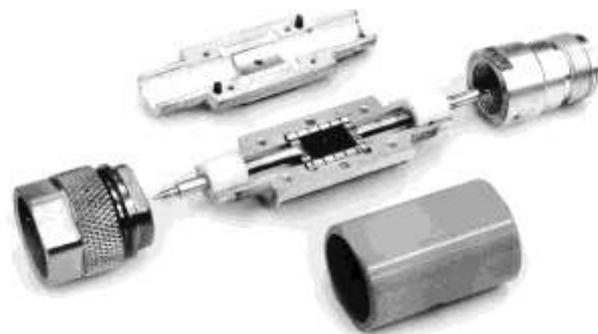


Рис. 12. Узлы аттенуаторов в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм

С освоением миллиметровых волн были созданы малогабаритные пластинчатые резисторы. Для коаксиальных аттенуаторов сечением 3,5/1,52 мм разработаны малогабаритные пластинчатые резисторы размером 5,5x6,5 мм. Эти резисторы по конструкции аналогичны пластинчатым резисторам П2-4 и предназначены для работы на частотах более 18 ГГц. На

рис. 13 показан общий вид attenuаторов на сечение коаксиального тракта 3,5/1,52 мм и их конструктивное исполнение. Габариты attenuаторов $\varnothing 13 \times 32,6$ мм.



Рис. 13. Внешний вид и узлы attenuатора в коаксиальном тракте сечением 3,5/1,52 мм:
 1, 6 – высокочастотные разъемы корпуса attenuатора; 2, 5 – свинчивающиеся части корпуса attenuатора; 3 – продольный паз, в который вставляется пластинчатый резистор 7 с пружинными контактами 8; 4 – втулка, внутренний диаметр которой равен 3,5 мм; 9 – удлинительное кольцо;
 10 – электрод, надеваемый на центральный проводник резистора

Малогабаритные пластинчатые резисторы (элементы резистивные для коаксиальных attenuаторов) имеют входное (выходное) сопротивление 50 Ом с допуском $\pm(0,5 - 1,5)$ Ом для различных сечений коаксиального тракта; ослабление (на постоянном токе) 3, 6, 10, 20 и 30 дБ с допуском на ослабление $\pm(0,1 - 0,2)$ дБ; входную мощность (0,5 – 1) Вт.

Резисторы выполнены по тонкопленочной технологии на основе структуры резистивный сплав РС 5406 – никель с электролитическим осаждением золота в области контактов на подложках из керамики ВК 100–1 (поликор, $\epsilon = 9,6$).

На базе малогабаритных двухсторонних пластинчатых резисторов сконструированы коаксиальные attenuаторы типа 1016, работающие в диапазоне от постоянного тока до 26 ГГц (коаксиальный тракт сечением 3,5/1,52 мм) и типа 1007 – в диапазоне до 50 ГГц (коаксиальный тракт сечением 2,4/1,04 мм). Номинальные величины ослаблений обоих типов attenuаторов – 3, 6, 10, 20, 30 дБ.

Attenuаторы типа 1016 имеют погрешность по ослаблению $\pm(0,7 - 1,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и КСВН не более (1,1 – 1,5) в зависимости от частоты.

Attenuаторы типа 1007 имеют погрешность по ослаблению $\pm(0,7 - 3,5)$ дБ в зависимости от величины ослабления и поддиапазона частот и КСВН не более (1,35 – 2,1) в зависимости от частоты [9].

Измерение ослабления до 50 ГГц в разных поддиапазонах частот проводилось на установках ДК1-12, ДК1-15, ДК1-16, ДК1-26 с погрешностью не более $\pm 0,2$ дБ (без учета погрешности из-за рассогласования).

Измерение КСВН в диапазоне до 18 ГГц проводилось на панорамных измерителях КСВН Р2-102, Р2-103, Р2-104 и в диапазоне от 18 до 50 ГГц – на волноводных измерителях КСВН Р2-65, Р2-66, Р2-68 с коаксиально-волноводными переходами. Погрешность измерения КСВН не превышала 15 % от измеряемой величины.

В системе «коаксиальный тракт-диссипативная волноведущая структура» в качестве последней бывает целесообразным применение экранированной полосковой линии с резистивной пленкой [10,11]. Применение в коаксиальных трактах attenuаторов на основе полосковых линий обусловлено тем, что размещение пластинчатого резистора непосредственно на металлическом основании увеличивает рассеиваемую мощность сигнала не менее чем в 2–3 раза.

Базовой структурой для attenuаторов рассматриваемого типа является экранированная полосковая линия и двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями (рис. 14).

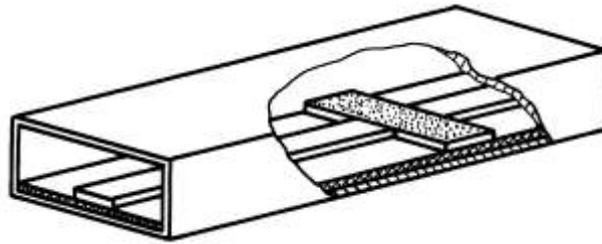


Рис. 14. Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой между слоями

В разрыв центрального проводника несимметричной полосковой линии вставляется тонкая резистивная пленка на диэлектрическом основании, имеющая по краям гальванический контакт с экраном. Теоретические основы аттенуаторов на полосковых линиях были заложены в работах [12, 13, 14, 15]. Проведенные расчеты спектров собственных волн полосковой линии и двухслойного волновода позволили сформулировать дифракционную задачу о согласовании полосковой линии с двухслойным волноводом, содержащим резистивную пленку, к которой сводится расчет возбуждающего устройства аттенуатора.

Результаты проведенных исследований использованы при разработке ячеек-ослабителей фиксированных полосковых аттенуаторов, которые нашли применение в составе гибридных СВЧ интегральных схем для развязки и согласования различных полосковых устройств. Полосковые ячейки-ослабители также используются в виде самостоятельных фиксированных и ступенчатых аттенуаторов с коаксиальными входами (выходами) [16, 17].

Дальнейшее улучшение характеристик аттенуаторов на пластинчатых резисторах связано в основном с изменением конфигурации резистивной пленки, повышением равномерности резистивного слоя (для пластинчатых резисторов со сплошной резистивной пленкой), уменьшением переходного сопротивления между резистивной пленкой и контактами резистора, совершенствованием возбуждающих электродов аттенуаторов.

3. Формирователи импульсов

На базе широкополосных фиксированных коаксиальных аттенуаторов были разработаны формирователи импульсов, предназначенные для получения импульсов с пикосекундными фронтами [18].

Конструктивно формирователь импульсов (рис. 15) содержит: корпус; центральные проводники коаксиальной линии; пластинчатый резистор; конденсатор, изготовленный из металлических пластин, соединенных с центральным проводником; диэлектрический регулировочный винт. Коэффициент передачи такого делителя, выполненного на пластинчатом резисторе, имеет, как известно, плоскую амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) в широкой полосе частот. Для коррекции АЧХ в области верхних частот предложено использовать емкость конденсатора. Емкость между пластинами шунтирует распределенный резистор. Если на вход такой цепи подать импульс с экспоненциальным фронтом с постоянной времени RC , на выходе получается импульс с амплитудой в K раз меньшей, и в $\frac{K+1}{2}$ раз меньшим фронтом (K – коэффициент деления делителя).

На рис. 16 показан внешний вид формирователя импульсов на диоде с накоплением заряда (ДНЗ), в котором применено описанное ранее корректирующее устройство с $K = 3$ (ослабление 10 дБ). В результате из импульса с фронтом 120 пс, сформированного диодом КД524А, получен импульс с фронтом 50 пс. Формирователь применен в качестве источника зондирующих импульсов в стробоскопическом рефлектометре типа «Сток» с полосой до 18 ГГц. Внешний вид рефлектометра показан на рис. 17.

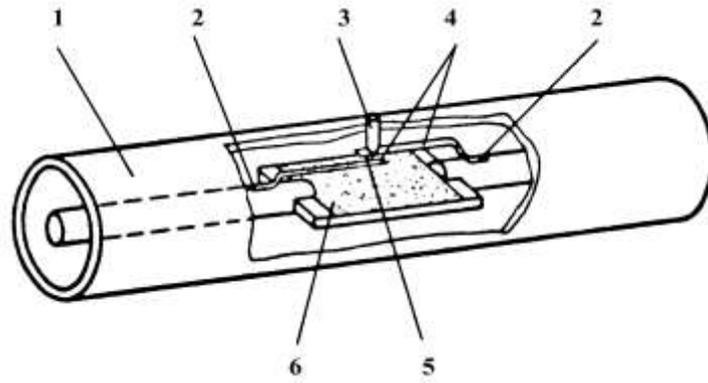


Рис. 15. Конструкция формирователя импульсов:

1 – корпус; 2 – центральные проводники коаксиального тракта;
 3 – диэлектрический регулировочный винт; 4 – регулировочные проводники;
 5 – конденсатор, выполненный из металлических пластин; 6 – пластинчатый резистор



Рис. 16. Внешний вид формирователя импульсов на туннельном диоде



Рис. 17. Внешний вид рефлектометра



Рис. 18. Внешний вид формирователя на туннельном диоде

В формирователе (рис. 18) на туннельном диоде типа ИИ308К, который создает фронт около 50 пс, коэффициент делителя составляет $K = 2$.

В результате на выходе получен импульс с фронтом около 30 пс. Такой формирователь применяется в поверочных службах предприятий для проверки переходной характеристики стробосциллографов с полосой до 10 ГГц ($\tau_{пер} \leq 35$ пс), а также в качестве источника зондирующих импульсов в стробоскопических рефлектометрах.

Библиографический список

1. **Шишков, Г.И.** Анализ схемотехнических решений и конструкций коаксиальных аттенуаторов, используемых в радиоизмерительной аппаратуре/ Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 1. С. 52.
2. **Бунтилов, В.М.** Комплекты фиксированных коаксиальных аттенуаторов Д2-26÷Д2-42 / В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков, В.И. Окомельков // Обмен опытом в радиопромышленности. 1971. Вып. 1. С. 84.
3. **Бунтилов, В.М.** Улучшение параметров аттенуаторов с пластинчатым резистором / В.М. Бунтилов, Г.И. Шишков // Обмен опытом в радиопромышленности. 1970. Вып. 3. С. 88–90.
4. **Шишков, Г.И.** Расчет круглого волновода с резистивными пленками / Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 2. С. 52–60.
5. **Шишков, Г.И.** О применении круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке в СВЧ-аттенуаторах // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып. 6. С. 46–53.
6. **Раевский, С.Б.** К теории двухслойных волноводов с резистивной пленкой между слоями // Изв. высш. учебн. заведений. Радиофизика. 1974. Т. XVII. Вып. 11. С. 74–79.
7. **Бунтилов, В.М.** Анализ затухания круглого волновода с резистивными пленками на диэлектрической подложке / В.М. Бунтилов, А.Е. Иванов, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 6. С. 65–68.
8. **Белов, Ю.Г.** Двухслойный экранированный эллиптический волновод с резистивной пленкой / Ю.Г. Белов [и др.] // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1982. Вып. 2. С. 39–45.
9. Радиоизмерительная аппаратура СВЧ и КВЧ. Узловая и элементная базы: монография / под ред. А.М. Кудрявцева. – М.: Радиотехника, 2006. – 208 с.
10. А.С. 240789 (СССР). Фиксированный аттенуатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов // Б.И. 1969. № 13.
11. А.С. 866617 (СССР). Фиксированный аттенуатор / Г.И. Шишков, В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев // Б.И. 1981. № 35.
12. **Аржанов, С.Н.** Алгоритм для расчета экранированных полосковых линий / С.Н. Аржанов, С.А. Маркова, С.Б. Раевский, В.Я. Сморгонский // Изв. вузов СССР. Сер. Радиоэлектроника. 1979. Т. 22. № 9. С. 23–28.
13. **Рудоясова, Л.Г.** Двухслойный прямоугольный волновод с резистивной пленкой/ Л.Г. Рудоясова, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1983. Вып. 1. С. 43–46.
14. **Горячев, Ю.А.** Анализ тонкопленочных резистивных элементов/ Ю.А. Горячев, Г.И. Шишков // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 6. С. 52–57.
15. **Калмык, В.А.** Прямоугольный волновод с анизотропной резистивной пленкой/ В.А. Калмык, С.Б. Раевский, Г.И. Шишков // Изв. высш. уч. заведений. Сер. Радиоэлектроника. 1989. Т. 32. № 7. С. 78–79.
16. **Шишков, Г.И.** Исследование аттенуаторов на полосковых линиях, используемых в автоматизированных измерительных приборах/ Г.И. Шишков, О.И. Раевская, Ю.А. Горячев // Техника средств связи. Сер. РИТ. 1981. Вып. 4. С. 72–74.
17. А.С. 327866 СССР. Ступенчатый аттенуатор / В.М. Бунтилов, Ю.А. Горячев, В.И. Моталин, И.М. Рубцов, Г.И. Шишков // Б.И. 1972. № 16.
18. А.С. 892683 СССР. Формирователь импульсов / В.М. Бунтилов, Е.Н. Буторин, Б.В. Писарев, Г.И. Шишков // Б.И. 1981. № 47.

Дата поступления
в редакцию 28.01.2011

G.I. Shishkov

WIDEBAND FIXED ATTENUATORS

The principle of operation of wideband precision fixed attenuators and their design are described.

Key words: fixed attenuators, radio instruments, lamellar resistors.

УДК 517.2

Ю.А. Иларионов, А.И. Ермолаев

ВЫВОД РЕКУРРЕНТНЫХ СООТНОШЕНИЙ ИЗ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается методика вывода рекуррентных формул для цилиндрических функций первого, второго, третьего рода и модифицированных функций Бесселя первого и второго рода непосредственно из дифференциальных уравнений для них.

Ключевые слова: цилиндрические функции, комплексный аргумент, модифицированные функции Бесселя, рекуррентные формулы, произвольный индекс.

Как известно [1,2,3], дифференциальное уравнение для цилиндрических функций $J_\nu(z)$, $N_\nu(z)$, $H_\nu^{(1,2)}(z)$ с произвольным индексом ν от комплексного аргумента z имеет вид:

$$z^2 \frac{d^2 u}{dz^2} + z \frac{du}{dz} + (z^2 - \nu^2)u = 0. \quad (1)$$

Дифференциальное уравнение для модифицированных функций Бесселя $I_\nu(z)$, $K_\nu(z)$ от комплексного аргумента z с произвольным индексом ν получается из (1) заменой z на iz :

$$z^2 \frac{d^2 v}{dz^2} + z \frac{dv}{dz} - (z^2 + \nu^2)v = 0. \quad (2)$$

Рекуррентные формулы для рассматриваемых функций $J_\nu(z)$, $N_\nu(z)$, $H_\nu^{(1,2)}(z) = J_\nu(z) \pm iN_\nu(z)$; $I_\nu(z)$, $K_\nu(z)$ общеизвестны [1, 2, 3] и представляются соотношениями:

$$\begin{cases} J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z) = \frac{2\nu J_\nu(z)}{z}, \\ J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z) = 2J'_\nu(z); \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} N_{\nu-1}(z) + N_{\nu+1}(z) = \frac{2\nu N_\nu(z)}{z}, \\ N_{\nu-1}(z) - N_{\nu+1}(z) = 2N'_\nu(z); \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} H_{\nu-1}^{(1,2)}(z) + H_{\nu+1}^{(1,2)}(z) = \frac{2\nu H_\nu^{(1,2)}(z)}{z}, \\ H_{\nu-1}^{(1,2)}(z) - H_{\nu+1}^{(1,2)}(z) = 2H'_\nu^{(1,2)}(z); \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z) = \frac{2\nu I_\nu(z)}{z}, \\ I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z) = 2I'_\nu(z); \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} K_{\nu-1}(z) - K_{\nu+1}(z) = -\frac{2\nu K_\nu(z)}{z}, \\ K_{\nu-1}(z) + K_{\nu+1}(z) = -2K'_\nu(z). \end{cases} \quad (7)$$

В формулах (2), (4), (5), (6), (7) штрих означает дифференцирование по аргументу z . Формулы для цилиндрических функций $J_\nu(z)$, $N_\nu(z)$, $H_\nu^{(1,2)}(z)$ совпадают, а формулы для модифицированных функций различаются только знаком в правых частях (6) и (7).

Рекуррентные формулы играют важную роль при разработке алгоритмов и программ расчёта цилиндрических функций любого индекса ν (целого или дробного, действительного или комплексного) от комплексного аргумента [4].

В известной литературе [1, 2, 3] по теории бесселевых функций приведены различные способы вывода рекуррентных формул (3), (4), (5), (6), (7). Например, в [1] рекуррентные соотношения (3) выводятся для действительного аргумента x и целого индекса n на основе представления функции Бесселя первого рода $J_n(x)$ в виде определённого интеграла. Полученные рекуррентные формулы обобщаются на функцию Бесселя $J_\nu(z)$ любого порядка ν путём представления её в виде степенного ряда.

В [2] для вывода рекуррентных соотношений (3) используется представление функции $J_\nu(z)$ в виде степенного ряда, с использованием которого находится функция $\frac{J_\nu(z)}{z^\nu}$.

Дифференцирование её по аргументу z приводит к формуле:

$$\frac{d}{dz} \left(\frac{J_\nu(z)}{z^\nu} \right) = -\frac{J_{\nu+1}(z)}{z^\nu},$$

связывающей функции Бесселя порядков ν и $\nu+1$. Эта формула является

основой вывода рекуррентных соотношений для функции Бесселя первого рода $J_\nu(z)$.

Представляет интерес разработать методику вывода рекуррентных формул для цилиндрических $J_\nu(z)$, $N_\nu(z)$, $H_\nu^{(1,2)}(z)$ и модифицированных $I_\nu(z)$, $K_\nu(z)$ функций Бесселя любого индекса ν от комплексного аргумента z , исходя только из дифференциальных уравнений для них (1) и (2).

На основании (1) дифференциальное уравнение для цилиндрической функции $J_\nu(z)$ имеет вид:

$$z^2 J_\nu''(z) + z J_\nu'(z) + (z^2 - \nu^2) J_\nu(z) = 0. \quad (8)$$

Заменяя в (8) индекс функции ν на $(\nu-1)$ и $(\nu+1)$, имеем:

$$z^2 J_{\nu-1}''(z) + z J_{\nu-1}'(z) + [z^2 - (\nu-1)^2] J_{\nu-1}(z) = 0; \quad (9)$$

$$z^2 J_{\nu+1}''(z) + z J_{\nu+1}'(z) + [z^2 - (\nu+1)^2] J_{\nu+1}(z) = 0. \quad (10)$$

Складывая уравнения (9) и (10), получаем:

$$z^2 [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)]'' + z [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)]' + z^2 [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)] - [(\nu-1)^2 J_{\nu-1}(z) + (\nu+1)^2 J_{\nu+1}(z)] = 0.$$

После алгебраических преобразований последняя квадратная скобка в полученном уравнении примет вид:

$$[(\nu-1)^2 J_{\nu-1}(z) + (\nu+1)^2 J_{\nu+1}(z)] = (\nu^2 + 1) [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)] - 2\nu [J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)].$$

Тогда одно из уравнений, связывающее между собой сумму $[J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)]$ и разность $[J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)]$ функций Бесселя, запишется как

$$z^2 [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)]'' + z [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)]' + [z^2 - (\nu^2 + 1)] [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)] + 2\nu [J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)] = 0. \quad (11)$$

Другое уравнение, также связывающее между собой сумму и разность функций $J_{\nu-1}(z)$ и $J_{\nu+1}(z)$, получаем, вычитая из уравнения (9) уравнение (10):

$$z^2 [J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)]'' + z [J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)]' + [z^2 - (\nu^2 + 1)] [J_{\nu-1}(z) - J_{\nu+1}(z)] + 2\nu [J_{\nu-1}(z) + J_{\nu+1}(z)] = 0. \quad (12)$$

Будем искать решение системы уравнений (11), (12) в виде:

$$J_{v-1}(z) + J_{v+1}(z) = p_v(z)J_v(z); \quad (13)$$

$$J_{v-1}(z) - J_{v+1}(z) = q_v(z)J'_v(z). \quad (14)$$

Получим уравнения для коэффициентов $p_v(z)$ и $q_v(z)$ в правых частях уравнений (13) и (14).

Подставляя соотношения (13), (14) в уравнение (12) и используя (8), получаем:

$$\left[2z^2 p'_v(z) + 2vq_v(z)\right]J'_v(z) + \left[z^2 p''_v(z) + zp'_v(z) - p_v(z)\right]J_v(z) = 0. \quad (15)$$

Для выполнения уравнения (15) при любых z и v необходимо, чтобы квадратные скобки перед функциями $J_v(z)$ и $J'_v(z)$ обращались в нуль, т.е.

$$z^2 p'_v(z) + vq_v(z) = 0; \quad (16)$$

$$z^2 p''_v(z) + zp'_v(z) - p_v(z) = 0. \quad (17)$$

Общее решение уравнения (17) имеет вид:

$$p_v(z) = C_1 z + \frac{C_2}{z}, \quad (18)$$

где C_1 и C_2 – произвольные постоянные.

Из уравнения (16) с учетом (18) находим:

$$q_v(z) = \frac{C_2}{v} - \frac{C_1 z^2}{v}. \quad (19)$$

Подставляя соотношения (13) и (14) в уравнение (11) и используя (8), получаем:

$$\left[z^2 q''_v(z) - zq'_v(z)\right]J'_v(z) - 2\left[(z^2 - v^2)q'_v(z) + \frac{v^2}{z}q_v(z) - vp_v(z)\right]J_v(z) = 0. \quad (20)$$

Для выполнения уравнения (20) при любых z и v необходимо, чтобы квадратные скобки перед функциями $J_v(z)$ и $J'_v(z)$ обращались в нуль, т.е.

$$zq''_v(z) - q'_v(z) = 0; \quad (21)$$

$$(z^2 - v^2)q'_v(z) + \frac{v^2}{z}q_v(z) - vp_v(z) = 0. \quad (22)$$

Общее решение уравнения (21) имеет вид:

$$q_v(z) = D_1 + D_2 z^2, \quad (23)$$

где D_1 и D_2 – произвольные постоянные.

Из уравнения (22) с учетом (23) находим:

$$p_v(z) = -vD_2 z + \frac{2}{v}D_2 z^3 + \frac{v}{z}D_1. \quad (24)$$

Сравним между собой выражения для коэффициентов $p_v(z)$ и $q_v(z)$, найденные из уравнений (16), (17) и (21), (22).

Поскольку в формуле (18) для $p_v(z)$ нет члена, содержащего z^3 , в (24) следует положить:

$$D_2 = 0. \quad (25)$$

Поскольку выражение (24) при $D_2 = 0$ не имеет члена, содержащего z^1 , в (18) следует положить:

$$C_1 = 0. \quad (26)$$

Формулы (18) и (24) с учетом (25), (26) принимают вид:

$$p_v(z) = \frac{C_2}{z}; \quad (27)$$

$$p_v(z) = \frac{v}{z} D_1. \quad (28)$$

Из (27) и (28) следует:

$$C_2 = vD_1. \quad (29)$$

Сравним формулы (19) и (23) для $q_v(z)$, которые при $D_2 = C_1 = 0$ принимают вид:

$$q_v(z) = \frac{C_2}{v}; \quad (30)$$

$$q_v(z) = D_1. \quad (31)$$

Из (30) и (31) вновь следует формула (29). Подставляя (28), (31) в формулы (13) и (14), получаем:

$$J_{v-1}(z) + J_{v+1}(z) = \frac{v}{z} D_1(z) J_v(z); \quad (32)$$

$$J_{v-1}(z) - J_{v+1}(z) = D_1(z) J'_v(z). \quad (33)$$

Значение постоянного коэффициента D_1 в формулах (32), (33) можно установить либо на основе предельных переходов: $z \rightarrow 0$ или $z \rightarrow \infty$, либо, учитывая в рассматриваемом случае независимость D_1 от v , вычисляя (32), (33) при некотором v .

Полагая в соотношениях (32), (33) $v = 0$, получаем:

$$J_{-1}(z) + J_1(z) = 0;$$

$$J_{-1}(z) - J_1(z) = D_1(z) J'_0(z).$$

Из первого уравнения следует известное соотношение $J_{-1}(z) = -J_1(z)$, а из второго уравнения с учетом формулы $J'_0(z) = -J_1(z)$ находим значение коэффициента $D_1 = 2$.

В результате рекуррентные формулы для цилиндрической функции первого рода $J_v(z)$ принимают вид, совпадающий с (3).

Рекуррентные формулы для цилиндрической функции второго рода $N_v(z)$ можно получить, используя изложенную ранее методику, однако при известных рекуррентных формулах (3) проще использовать функциональное соотношение между $N_v(z)$ и $J_v(z)$ [1,2,3]:

$$N_v(z) = \frac{J_v(z) \cos(\pi v) - J_{-v}(z)}{\sin(\pi v)}. \quad (34)$$

Из формулы (34) следует:

$$N_{v-1}(z) + N_{v+1}(z) = \frac{[J_{v-1}(z) + J_{v+1}(z)] \cos(\pi v) + [J_{-v-1}(z) + J_{-v+1}(z)]}{\sin(\pi v)}. \quad (35)$$

Используя рекуррентную формулу (3) для суммы цилиндрических функций первого рода и функциональное соотношение (34), из (35) получаем рекуррентную формулу (4) для суммы цилиндрических функций второго рода:

$$N_{v-1}(z) + N_{v+1}(z) = \frac{\frac{2v}{z} J_v(z) \cos(\pi v) - \frac{2v}{z} J_{-v}(z)}{\sin(\pi v)} = \frac{2v}{z} N_v(z).$$

Из формулы (34) также следует:

$$N_{v-1}(z) - N_{v+1}(z) = \frac{[J_{v-1}(z) - J_{v+1}(z)] \cos(\pi v) - [J_{-v-1}(z) - J_{-v+1}(z)]}{\sin(\pi v)}. \quad (36)$$

Используя рекуррентную формулу (3) для разности цилиндрических функций первого рода и функциональное соотношение (34), из (36) получаем рекуррентную формулу (4) для разности цилиндрических функций второго рода:

$$N_{\nu-1}(z) - N_{\nu+1}(z) = \frac{2J'_\nu(z)\cos(\pi\nu) - 2J'_{-\nu}(z)}{\sin(\pi\nu)} = 2N'_\nu(z).$$

Ввиду того, что $H_\nu^{(1)}(z)$ и $H_\nu^{(2)}(z)$ – линейные комбинации функций $J_\nu(z)$ и $N_\nu(z)$, для функций Ханкеля справедливы формулы (5), аналогичные формулам (3) и (4) для функций $J_\nu(z)$ и $N_\nu(z)$.

Применим изложенную ранее методику для нахождения рекуррентных соотношений между модифицированными функциями Бесселя первого и второго рода.

На основании (2) дифференциальное уравнение для модифицированной функции $I_\nu(z)$ имеет вид:

$$z^2 I''_\nu(z) + z I'_\nu(z) - (z^2 + \nu^2) I_\nu(z) = 0. \tag{37}$$

Заменяя в (26) индекс функции ν на $(\nu-1)$ и $(\nu+1)$, складывая и вычитая полученные уравнения, находим соотношения, связывающие между собой сумму и разность функций $I_{\nu-1}(z)$ и $I_{\nu+1}(z)$:

$$z^2 [I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z)]'' + z [I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z)]' - [z^2 + (\nu^2 + 1)] [I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z)] + 2\nu [I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z)] = 0; \tag{38}$$

$$z^2 [I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z)]'' + z [I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z)]' - [z^2 + (\nu^2 + 1)] [I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z)] + 2\nu [I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z)] = 0. \tag{39}$$

Будем искать решение системы уравнений (38), (39) в виде:

$$I_{\nu-1}(z) - I_{\nu+1}(z) = r_\nu(z) I_\nu(z); \tag{40}$$

$$I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z) = s_\nu(z) I'_\nu(z). \tag{41}$$

Подставляя соотношения (40), (41) в уравнения (38), (39) и используя (37), получаем:

$$[2z^2 r'_\nu(z) + 2\nu s_\nu(z)] I'_\nu(z) + [z^2 r''_\nu(z) + z r'_\nu(z) - r_\nu(z)] I_\nu(z) = 0; \tag{42}$$

$$[z^2 s''_\nu(z) - z s'_\nu(z)] I'_\nu(z) - 2 \left[(z^2 + \nu^2) s'_\nu(z) - \frac{\nu^2}{z} s_\nu(z) + \nu r_\nu(z) \right] I_\nu(z) = 0. \tag{43}$$

Для выполнения уравнений (42), (43) при любых z и ν необходимо, чтобы квадратные скобки перед функциями $I_\nu(z)$ и $I'_\nu(z)$ обращались в нуль:

$$z^2 r'_\nu(z) + \nu s_\nu(z) = 0; \tag{44}$$

$$z^2 r''_\nu(z) + z r'_\nu(z) - r_\nu(z) = 0; \tag{45}$$

$$z s''_\nu(z) - s'_\nu(z) = 0; \tag{46}$$

$$(z^2 + \nu^2) s'_\nu(z) - \frac{\nu^2}{z} s_\nu(z) + \nu r_\nu(z) = 0. \tag{47}$$

Найдем и сравним решения систем уравнений (44), (45), и (46), (47).

Общее решение однородного дифференциального уравнения (45) имеет вид:

$$r_\nu(z) = A_1 z + \frac{A_2}{z}, \tag{48}$$

где A_1 и A_2 – произвольные постоянные.

Из уравнения (44) с учетом (48) находим:

$$s_\nu(z) = \frac{A_2}{\nu} - \frac{A_1}{\nu} z^2. \tag{49}$$

Общее решение однородного дифференциального уравнения (46) имеет вид:

$$s_\nu(z) = B_1 + B_2 z^2, \tag{50}$$

где B_1 и B_2 – произвольные постоянные.

Из уравнения (47) с учетом (50) находим:

$$r_v(z) = -vB_2z - \frac{2}{v}B_2z^3 + \frac{v}{z}B_1. \quad (51)$$

Сравниваем выражения для коэффициентов $r_v(z)$ и $s_v(z)$, найденные из различных систем уравнений: (44), (45) и (46), (47). Поскольку в решении (48) для $r_v(z)$ нет члена, содержащего z^3 , следует в (51) положить $B_2 = 0$. Поскольку соотношение (51) при $B_2 = 0$ не содержит слагаемого, пропорционального z , в (48) следует положить $A_1 = 0$. Формулы (48) и (51) при $A_1 = 0$ и $B_2 = 0$ примут вид:

$$r_v = \frac{A_2}{z}; \quad (52)$$

$$r_v = \frac{v}{z}B_1. \quad (53)$$

Отсюда следует соотношение, связывающее постоянные A_2 и B_1 :

$$A_2 = vB_1. \quad (54)$$

Формулы (49) и (50) при $A_1 = 0$ и $B_2 = 0$ принимают вид:

$$s_v(z) = \frac{A_2}{v}; \quad (55)$$

$$s_v(z) = B_1. \quad (56)$$

Отсюда вновь следует (54).

Подставляя (56), (53) в формулы (40), (41), находим:

$$I_{v-1}(z) - I_{v+1}(z) = \frac{v}{z}B_1(z)I_v(z); \quad (57)$$

$$I_{v-1}(z) + I_{v+1}(z) = B_1I'_v(z). \quad (58)$$

Учитывая независимость B_1 от v , значение постоянного коэффициента B_1 в формулах (57), (58) находим, полагая $v = 0$. При этом уравнения принимают вид:

$$I_{-1}(z) - I_1(z) = 0;$$

$$I_{-1}(z) + I_1(z) = B_1I'_0(z).$$

Из первого уравнения следует известное соотношение $I_{-1}(z) = I_1(z)$, из второго уравнения с учетом формулы $I'_0(z) = I_1(z)$ находим значение коэффициента $B_1 = 2$.

В результате рекуррентные формулы для модифицированной функции Бесселя первого рода $I_v(z)$ принимают вид, совпадающий с (6).

Для модифицированной функции Бесселя второго рода $K_v(z)$ можно получить рекуррентные формулы (7) из дифференциального уравнения:

$$z^2 K_v''(z) + z K_v'(z) - (z^2 + v^2) K_v(z) = 0$$

аналогичным образом.

Однако при известных рекуррентных формулах (6) для $I_v(z)$ проще это сделать, используя функциональное соотношение между $K_v(z)$ и $I_v(z)$ [1, 2, 3]:

$$K_v(z) = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{I_{-v}(z) - I_v(z)}{\sin(\pi v)}. \quad (59)$$

Из формулы (59) следует:

$$K_{v-1}(z) - K_{v+1}(z) = \frac{\pi}{2} \left\{ \frac{[I_{-v-1}(z) - I_{-v+1}(z)] + [I_{v-1}(z) - I_{v+1}(z)]}{\sin(\pi v)} \right\}. \quad (60)$$

Используя рекуррентную формулу (6) для разности модифицированных функций Бесселя первого рода и функциональное соотношение (59), из (60) получаем рекуррентную формулу (7) для разности модифицированных функций Бесселя второго рода:

$$K_{\nu-1}(z) - K_{\nu+1}(z) = \frac{\pi}{2} \left\{ -\frac{2\nu}{z} \cdot \frac{I_{-\nu}(z)}{\sin(\pi\nu)} + \frac{2\nu}{z} \cdot \frac{I_{\nu}(z)}{\sin(\pi\nu)} \right\} = -\frac{2\nu}{z} K_{\nu}(z).$$

Из формулы (42) также следует:

$$K_{\nu-1}(z) + K_{\nu+1}(z) = \frac{\pi}{2} \left\{ \frac{-[I_{-\nu-1}(z) + I_{-\nu+1}(z)] + [I_{\nu-1}(z) + I_{\nu+1}(z)]}{\sin(\pi\nu)} \right\}. \quad (61)$$

Используя рекуррентную формулу (6) для суммы модифицированных функций Бесселя первого рода и функциональное соотношение (59), из (61) получаем рекуррентную формулу (46) для суммы модифицированных функций Бесселя второго рода:

$$K_{\nu-1}(z) + K_{\nu+1}(z) = \frac{\pi}{2} \left\{ -2 \frac{I'_{-\nu}(z)}{\sin(\pi\nu)} + 2 \frac{I'_{\nu}(z)}{\sin(\pi\nu)} \right\} = -2K'_{\nu}(z).$$

Разработанная методика вывода рекуррентных формул для цилиндрических функций из дифференциальных уравнений может стать основой для установления неизвестных в настоящее время рекуррентных соотношений для ряда других специальных функций, в частности, для функций Матье (угловых $Se, o_r(s, \eta)$, радиальных $Je, o_r(s, \xi)$, $Ne, o_r(s, \xi)$, радиальных модифицированных $Ie, o_r(s, \xi)$, $Ke, o_r(s, \xi)$).

Библиографический список

1. Розетт, Т.А. Элементы теории цилиндрических функций с приложениями к радиотехнике / Т.А. Розетт. – М.: Сов.радио, 1956. – 224 с.
2. Корнев, Б.Г. Введение в теорию беселевых функций / Б.Г. Корнев. – М.: Наука, 1971. – 288 с.
3. Ватсон, Г.Н. Теория беселевых функций: в 2 ч. [пер. со 2-го англ. изд.] / Г.Н. Ватсон. – М.: ИЛ, 1949. – 752 с.
4. Справочник по специальным функциям с формулами, графиками и математическими таблицами / под ред. М. Абрамовича, И. Стиган. – М.: Наука, 1979. – 832 с.

Дата поступления
в редакцию 28.01.2011

Y.A. Ilarionov, A.I. Ermolaev

DERIVATION OF RECURRENCE RELATIONS FROM DIFFERENTIAL EQUATIONS

The article describes the derivation procedure for recurrence formulas of cylindrical Bessel functions of first, second, third types and modified Bessel functions of first and second types directly from their differential equations.

Key words: cylindrical functions, complex argument, modified Bessel functions, recurrence formulas, arbitrary index.

УДК 534.87

В.Е. Гай

АЛГОРИТМ КЛАССИФИКАЦИИ СИГНАЛОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева

Предлагается алгоритм классификации сигналов, принимаемых технической системой, управляемой голосом, на шумовые / не шумовые. Разработанный алгоритм основан на использовании теории активного восприятия, адаптированной к анализу одномерных сигналов. Результаты проведенных экспериментов подтверждают возможность использования предложенного алгоритма для решения поставленной задачи.

Ключевые слова: цифровая обработка сигналов, теория активного восприятия, анализ сигналов, классификация цифровых сигналов.

1. Постановка задачи

В состав различных технических систем часто входит подсистема голосового управления. Одна из основных задач данной подсистемы – классификация принимаемых сигналов на шумовые и не шумовые. Цель классификации – принятие решения о целесообразности проведения дальнейшего анализа сигнала и выделения из сигнала некоторой команды. Предполагается, что подобную задачу решает человек в процессе информационного взаимодействия с окружающим миром. Достоверно известно, что новорожденные умеют воспринимать звуки и различают их по высоте. Особую чувствительность они проявляют к звукам человеческой речи и предпочитают осмысленную, связную речь произвольному набору слогов. При этом, младенцы способны различать некоторые признаки, не используемые в конкретном языке. Эти утверждения подтверждаются уменьшением α -ритма на энцефалограмме при воспроизведении речевых сигналов.

Таким образом, предполагается наличие у человека встроенных механизмов опознавания не шумовых сигналов.

В данной работе решается задачи выбора признаков для классификации сигналов. Классификация сигналов на шумовые / не шумовые выполняется на основе теории активного восприятия [1, 2].

Алгоритм классификации должен решать задачу классификации сигнала в реальном масштабе времени. Выбор длительности анализируемого участка сигнала определяется, исходя из условий задачи и используемой системы команд.

На рис. 1 показана структура системы распознавания команд, входящей в состав технической системы.

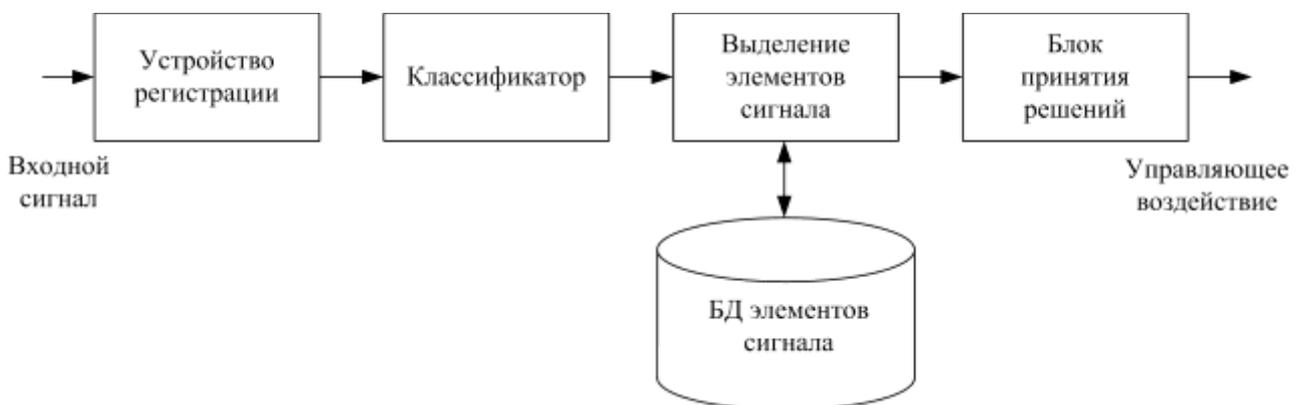


Рис. 1. Система распознавания команд

Использование блока классификации позволяет снизить вычислительную сложность алгоритма анализа сигнала за счёт удаления шумовых фрагментов принимаемого сигнала.

2. Предлагаемый алгоритм

Предлагаемый алгоритм классификации сигналов состоит в следующем:

1. Построение спектрального представления исходного сигнала $f(t)$ с использованием U -преобразования для одномерных сигналов [1, 2]:

$$S = U(f(t)),$$

где S – набор из M мгновенных спектров, где M – число сегментов сигнала. Каждый спектр представляет собой набор коэффициентов $S_i = \{s_1, \dots, s_N\}$, N – число фильтров Уолша системы Хармута [3, 4], используемых при формировании спектра (рис. 2). Спектр вычисляется по отрезку сигнала длиной len .

В слуховой системе человека вычисление мгновенных спектров выполняет основная мембрана [5]. Обычно функциональную модель мембраны представляют в виде набора связанных фильтров. Причём полоса пропускания каждого фильтра изменяется вдоль длины мембраны. Полоса пропускания максимальна в высокочастотной области и минимальна в низкочастотной. Распределение ответов фильтров представляет собой мгновенный спектр сигнала [6].

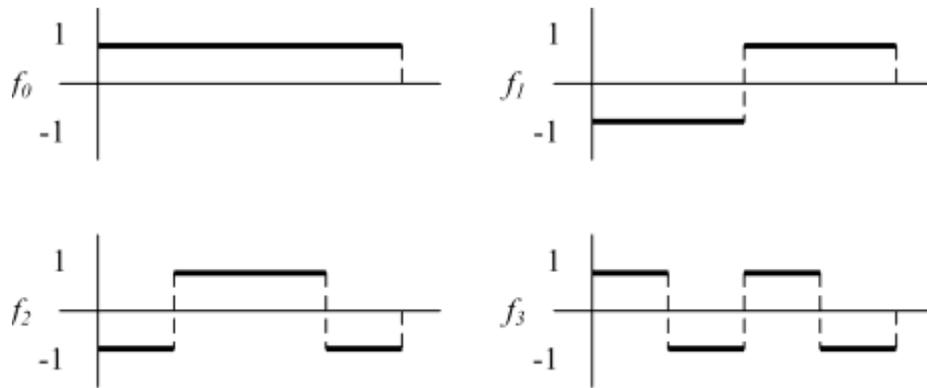


Рис. 2. Фильтры Уолша системы Хармута

2. Поиск похожих цепочек спектров:

а) из S выбираются ранее неиспользованные цепочки спектров L_i и L_j ($i \neq j$) $L_i = \{S_i, \dots, S_{i+c_{len}}\}$, где S_i – i -й спектр набора S , c_{len} – длина цепочки спектров;

б) если абсолютная величина разности между спектрами, входящими в L_i и L_j , меньше некоторой пороговой величины (thr):

$$\sum_{k=1}^{c_{len}} |L_{ik} - L_{jk}| < thr,$$

считается, что эти две цепочки похожи, после чего цепочка L_j отмечается как использованная (повторяющаяся) и в дальнейших сравнениях участия не принимает;

в) подсчитывается количество повторяющихся (sp_{use}) цепочек спектров сигнала;

3. На основе полученного значения sp_{use} делается вывод о типе анализируемого сигнала.

3. Вычислительный эксперимент

Реализация предложенных алгоритмов выполнена в системе Octave. Тестирование проводилось на ЭВМ с процессором AMD Turion 2 Dual-Core Mobile M500, 2.20 ГГц, 4 Гб оперативной памяти.

При исследовании алгоритма использовались следующие тестовые сигналы (частота дискретизации 16 кГц, глубина кодирования – 16 бит):

1) записи речи 15 дикторов;

- 2) запись трелей японского соловья (как известно [7], птицы используют звуки для обмена информацией);
- 3) музыкальная запись;
- 4) некоррелированный шум с равномерным и нормальным распределением;
- 5) коррелированный шум;
- 6) периодический сигнал (синус с частотой 100 Гц, синус с частотой 50 Гц, амплитудно- и частотно-модулированный синус);
- 7) постоянный во времени сигнал (логическая единица);
- 8) последовательность прямоугольных импульсов.

Значения параметров алгоритма, используемые при проведении эксперимента:

- 1) длина цепочки спектров c_{len} : 1, 2, 3, 4, 5, 6;
- 2) порог, используемый при сравнении цепочек спектров thr : 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 1.0;
- 3) длина анализируемого сегмента len (в отсчётах): 32, 64, 128, 256, в миллисекундах: 2, 4, 8, 16;
- 4) смещение, используемое при выделении сегментов $shft$: 16, 32, 64, 128, 256;
- 5) количество используемых фильтров N : 4, 8;
- 6) размер обрабатываемого сигнала (в отсчётах) sig_{len} : 50000, 100000, 150000, 200000, 250000 (в секундах: 3.125, 6.25, 9.375, 12.5, 15.625, частота дискретизации 16 кГц).

В табл. 2 и табл. 3 приведены результаты обработки речевого сигнала. Каждая ячейка таблицы содержит количество найденных неповторяющихся / повторяющихся цепочек в сигнале (sp_{nuse} / sp_{use}).

Таблица 1

Результаты работы алгоритма

Параметры алгоритма: $c_{len} = 1, N = 4, thr = 0.1$						
		Длина сигнала в отсчётах				
len	$shft$	50000	100000	150000	200000	250000
32	16	1790/1332	3474/2774	4449/4923	5513/6985	6868/8754
32	32	955/606	1898/1266	2504/2182	3089/3160	3820/3991
64	32	1218/342	2454/668	3332/1352	4142/2106	5030/2780
64	64	633/147	1277/284	1736/606	2164/960	2616/1289
128	64	695/83	1403/157	1948/392	2437/685	2934/970
128	128	362/27	732/48	1024/146	1286/275	1548/404
256	128	377/11	757/21	1098/70	1427/133	1752/198
256	256	192/2	384/5	568/16	745/35	918/57

Таблица 2

Результаты работы алгоритма

Параметры алгоритма: $c_{len} = 1, N = 8, thr = 0.1$						
		Длина сигнала в отсчётах				
len	$shft$	50000	100000	150000	200000	250000
32	16	2446/676	5133/1115	7224/2184	8939/3559	11108/4514
32	32	1265/296	2637/487	3737/949	4610/1639	5719/2092
64	32	1519/41	3050/72	4359/325	5482/766	6781/1029
64	64	772/0	1547/14	2218/123	2795/329	3456/449
128	64	778/0	1560/0	2339/1	3109/13	3879/25
128	128	389/0	780/0	1170/0	1559/2	1945/7
256	128	388/0	778/0	1168/0	1560/0	1950/0
256	256	194/0	389/0	584/0	780/0	975/0

На рис. 3 показаны графики изменения числа уникальных спектров в зависимости от длины сигнала (сплошной линией показан график для равномерного шума, пунктирной – для трелей соловья). При вычислении приведённых значений использовались следующие параметры предложенного алгоритма: $c_{len} = 1$, $N = 4$, $thr = 0.3$, $len = 32$, $shft = 32$.

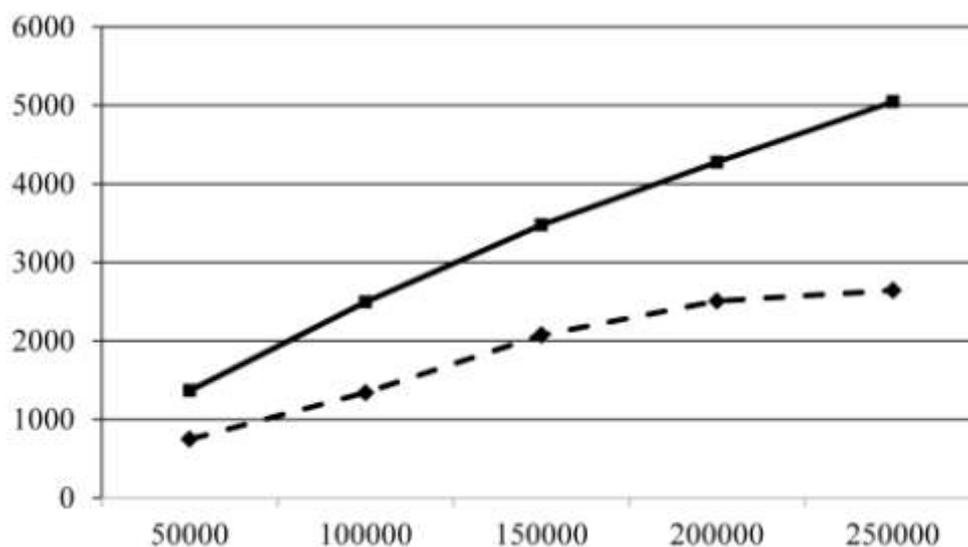


Рис. 3. Зависимость количества уникальных спектров от длины сигнала

Результаты исследования:

1. Записи голосов дикторов, трелей соловья, музыки содержат повторяющиеся цепочки спектров ($c_{len} \geq 1$). Установлено, что для указанных записей с увеличением длительности сигнала возрастает количество уникальных цепочек спектров.

В некоторых случаях (например, при $N = 8$, $len = 256$, $thr \geq 0.1$) количество найденных повторяющихся цепочек близко к нулю. Это объясняется тем, что использование указанных параметров алгоритма приводит к введению достаточно строгих ограничений на подобие цепочек (сравните табл. 1 и табл. 2).

2. Шумовые записи содержат повторяющиеся цепочки спектров при $c_{len} = 1$. При $c_{len} > 1$ повторяющиеся цепочки спектров в шумовых сигналах не обнаружены. Таким образом, при введении более жёстких ограничений на подобие цепочек (например, увеличение числа используемых фильтров) количество повторяющихся цепочек в шумовом сигнале резко уменьшается. Это является характерной особенностью всех исследованных шумовых сигналов.

3. Периодические сигналы включают повторяющиеся цепочки спектров. Количество повторяющихся цепочек с увеличением длительности сигнала остаётся равным некоторой постоянной величине (для определённого набора параметров). Например, синус (частота = 50 Гц, параметры алгоритма: $c_{len} = 1$, $len = 32$, $shft = 32$, $N = 4$, $thr = 0.1$) описывается 10 уникальными цепочками. Периодический сигнал не относится к шумовым, так как несёт информацию о частоте.

4. Постоянный сигнал при любых параметрах алгоритма и любой длине сигнала описывается 1 спектром ($sp_{noise} = 1$). Задача поиска постоянных сигналов может возникать при выделении пауз в речи.

5. Минимальная длина сигнала, необходимая для определения его типа, составляет 0.5 секунды.

6. Длина обрабатываемого сегмента выбрана равной 32 отсчётам, так как слуховая система оценивает изменения в звуковом импульсе, происходящие на интервале времени

меньше 1 мс [5], а при частоте дискретизации 16 кГц 2 мс соответствуют 32 отсчётам. Уменьшать длину анализируемого сегмента непрактично с вычислительной точки зрения, при $len \gg 32$ определить тип сигнала затруднительно в связи с «грубостью» вычислений.

7. Если требуется определить, является ли не шумовой сигнал периодическим, необходимо выполнить дополнительное исследование: увеличивая длину анализируемого сигнала, зафиксируем количество неповторяющихся спектров (sp_{nuse}). Если сигнал периодический, то величина sp_{nuse} с ростом длины сигнала может изменяться в определённых пределах, но не увеличиваться.

8. При проведении исследований использовано избыточное число значений параметров алгоритма. В результате оказалось, что для определения типа сигнала достаточно использовать значения параметров, приведённые в табл. 3.

9. Время работы алгоритма зависит от длительности обрабатываемого сигнала. Время обработки сигнала длиной 3.125 секунды (50000 отсчётов при частоте дискретизации 16000 кГц) составляет 1 секунду.

Таблица 3

Параметры алгоритма

№	len	$shft$	N	c_{len}	thr	sig_{len}
1	32	32	8	1	0.1	50000
2	32	32	4	3	0.1	50000
3	32	32	8	3	0.1	50000

По результатам проведённых экспериментов сформулировано решающее правило для определения типа сигнала: если значение sp_{use} , вычисленное на основе предложенного алгоритма, для каждого набора параметров, приведённых в табл. 3, больше 10 ($sp_{use} > 10$), то анализируемый сигнал не является шумовым, в противном случае – шумовым (значение 10 подобрано экспериментальным путём).

Таким образом, к классу не шумовых сигналов можно отнести речевой сигнал, музыкальную запись, периодический (в том числе периодическая последовательность прямоугольных импульсов) и постоянный сигналы. Достаточно проблематично различить музыкальную запись и речевой сигнал.

Вывод

Настоящая работа является попыткой применения теории активного восприятия к решению задачи классификации сигналов на шумовые / не шумовые. Предложенный алгоритм был реализован в системе речевого управления мобильным роботом. Также разработанный алгоритм может найти применение при выделении пауз в речевом сигнале.

Необходимо отметить следующие достоинства предложенного алгоритма: низкая вычислительная сложность, отсутствие настраиваемых параметров, простота реализации.

Дальнейшее направление исследований – оценка с помощью теории активного восприятия влияния шума на сигнал (в том числе и речевой).

Библиографический список

1. **Утробин, В. А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений: учеб. пособие / В. А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 234 с.
2. **Утробин, В. А.** Компьютерная обработка изображений. Принятие решений в пространстве эталонов: учеб. пособие / В. А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2004. – 221 с.

3. **Хармут, Х.** Применение методов теории информации в физике: [пер. с англ.] / Х. Хармут. – М.: Мир, 1989. – 344 с.
4. **Хармут, Х.Ф.** Передача информации ортогональными функциями: [пер. с англ. Н. Г. Дядюнова, А. И. Сенина] / Х. Ф. Хармут. – М.: Связь, 1975. – 272 с.
5. Элементы теории биологических анализаторов / под ред. Н. В. Позина. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1978. – 360 с.
6. **Харкевич, А. А.** Спектры и анализ / А.А. Харкевич. – М.: Физматгиз, 1952. – 192 с.
7. **Мальчевский, А.С.** Роль звуковой индукции в голосовом поведении птиц / А. С. Мальчевский, А.Б. Пукинский // Русский орнитологический журнал. 2009. Т. 18. Экспресс-выпуск 483. С. 779–801.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2011*

V. E. Gai

ALGORITHM OF SIGNAL CLASSIFICATION

The algorithm of classification of signals accepted by the technical system on noised / not noised is offered. The developed algorithm is based on use of the theory of the active perception adapted for the analysis of one dimensional signals. Results of the spent experiments confirm possibility of use of the offered algorithm for solving the problem.

Key words: digital signal processing, theory of active perception, signal analysis, classification of digital signals.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 517.465

А.И. Зайцев¹, Е.Н. Пелиновский², А. Ялченир³

ПРОГНОЗ ВЫСОТ ВОЛН ЦУНАМИ НА ЧЕРНОМОРСКОМ ПОБЕРЕЖЬЕ РОССИИ

СКБ «Средств автоматизации морских исследований» ДВО РАН, г. Южно-Сахалинск¹,
Институт прикладной физики РАН, г. Нижний Новгород²,
Технический университет Центральной Азии, Турция³

В настоящей работе обсуждается проблема прогноза высот волн цунами на российском побережье Черного моря. Выполнены расчеты прогностических цунами, источники которых равномерно распределены в бассейне Черного моря (всего 55 событий). Их результаты сопоставлены с результатами численного моделирования исторических событий (1939 и 1966 годов) и данными немногочисленных измерений. На этой основе выдан предварительный прогноз высот волн цунами вдоль российского побережья Черного моря.

Ключевые слова: цунами, численное моделирование, Чёрное море.

Введение

Район Черного моря не отличается большой сейсмической активностью [13, 14], в Черном море за этот период случилось только одно сильное землетрясение с магнитудой больше 7 (вблизи побережья Болгарии), и то не сопровождавшееся цунами, а это значение является пороговым для объявления тревоги цунами на Дальнем Востоке России. Однако за это столетие было уже порядка десяти цунами (мы их обсудим далее), которые не оказались катастрофическими (в отличие от землетрясений) и имели локальные последствия. Исторические данные о цунами в Черном море имеются в разных литературных источниках [1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 17, 20, 23, 25, 26]. Всего отмечено 23 события, начиная с цунами на территории Абхазии в 20 году до нашей эры во время землетрясения с магнитудой более 6.5 до последнего цунами высотой 3-4 метра в 2007 году у берегов Болгарии, природа которого пока еще не выяснена. Большинство цунами вызвано относительно слабыми землетрясениями, и они имели локальный характер. В сводках практически невозможно найти количественные данные о цунами (до 20-го столетия), так что использовать их для оценки повторяемости цунами в конкретных пунктах невозможно. Тем не менее, даже слабые волны цунами пересекали Черное море и регистрировались на его противоположном берегу. Достаточно упомянуть цунами 1939 года в Турции, зарегистрированное мареографами в Крыму и на Кавказском побережье России. Тем более этот эффект будет заметен, если волны цунами будут иметь большую амплитуду. Мировой опыт показывает, что сильные цунами распространяются на далекие расстояния. Так, цунами 1883 года, вызванное извержением вулкана Кракатау, [21] и Индонезийское цунами 2004 года [22] были зарегистрированы мареографами в Тихом и Атлантическом океанах, а не только в Индийском океане. Поэтому оценки возможных цунами на российском побережье Черного моря должны обязательно включать в себя возможные события вдали от нашего побережья (удаленные цунами). Такие расчеты распространения цунами через акваторию Черного моря уже делались для исторических цунами 20-го столетия (1927, 1939, 1966 года) в работе [26] и они показали хорошее совпадение расчетных данных с измеренными.

Таким образом, уже существующая численная модель распространения цунами может быть использована для расчета возможных цунами в Черном море. Здесь мы применим метод оценки цунами потенциала прибрежных пунктов от удаленных источников, развиваемый в ряде работ [9, 18, 19, 24]. Для этого на первом этапе достаточно взять модельный (гидродинамический) очаг цунами и распределить его однородно в бассейне моря; после этого можно сравнить распределения высот волн вдоль побережья и выделить зоны слабого и сильного риска цунами, что позволит говорить о разной степени защищенности побережья. Результаты таких расчетов представлены в настоящей статье.

1. Методика расчетов

В наших расчетах мы использовали гидродинамический очаг (рис. 1), который представляет собой в сечении окружность диаметром 65 км. Высота волны в очаге 4 м (3 м выше уровня моря и 1 м ниже). Такие параметры имеют в среднем очаги цунами от подводных землетрясений с магнитудой 7 [16]. Такой источник в океане с постоянной глубины излучает волны одинаково во всех направлениях, так что возможная анизотропия распределения высот волн вдоль побережья связана только с расстоянием до очага и переменной глубиной бассейна.

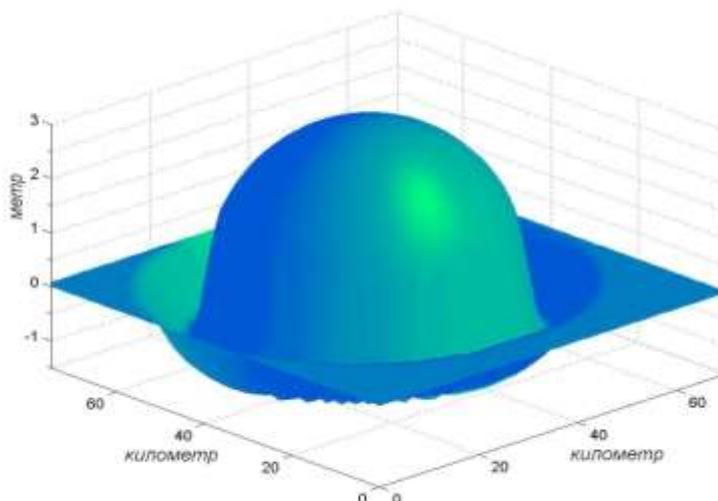


Рис. 1. Гидродинамический очаг

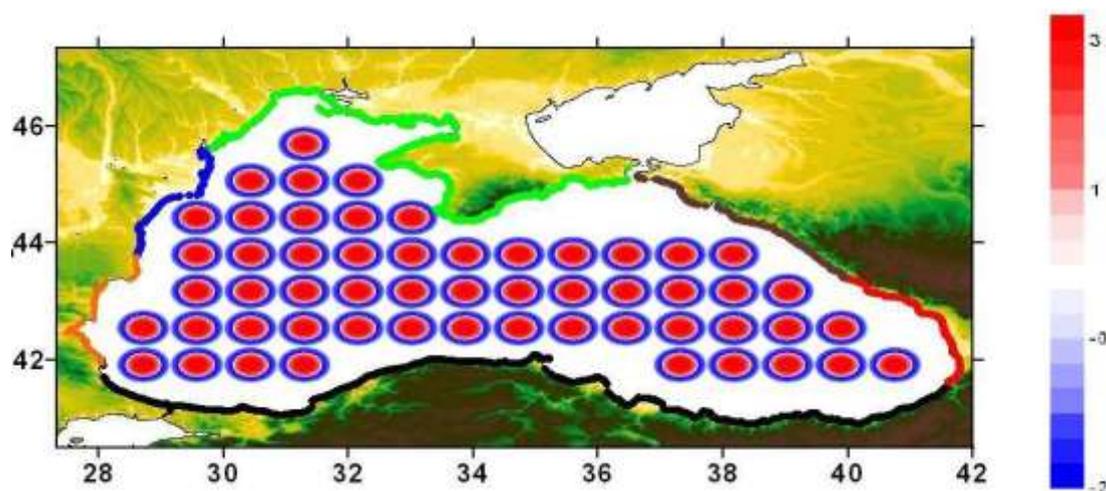


Рис. 2. Положение гипотетических очагов в Чёрном море

Расчёты характеристик волн цунами производились с помощью авторского кода NA-MI-DANCE [8], основанного на уравнениях мелкой воды в декартовых координатах. Этот код уже использовался при расчетах Индонезийского цунами 2004 года [6] и Невельского цунами 2007 года [7]. В расчетах была использована одноминутная батиметрия Мирового океана (GEBCO1 Digital Atlas, British Oceanographic Data Centre), с добавлением более точной прибрежной батиметрии, шаг по сетке равняется в среднем 0.5 км. Вся акватория Чёрного моря равномерно покрывалась гидродинамическими источниками с шагом по долготе 0.8652 градуса (в среднем 71.2 км) и по широте 0.6504 (72.2 км). Общее количество очагов составило 55, они представлены на рис. 2.

Мы разбили все источники на три группы, назвав их близкие, средние и далекие по отношению к российскому побережью. Каждый случай отдельно моделировался на протяжении пяти часов распространения волны.

В принципе, данная модель позволяет рассчитывать накат волн цунами на берег, однако, эти расчеты требуют большого времени и лучшего знания прибрежной батиметрии и береговой топографии. Поэтому здесь такие расчеты не производились, и фактически вычислялся уровень воды в последней мористой точке (на глубине около 5 м), где использованы условия полного отражения. Такая ситуация соответствует наличию «стенки» на малых глубинах, и такой прием активно используется, когда надо выполнить большой объем вычислений для сравнительного анализа цунами в различных пунктах побережья.

Чтобы сравнить между собой высоты волн от разных источников в одном и том же месте и исключить влияние удаленности источников от побережья, высоты волн от каждого источника нормировались на максимальные значения. Рассмотрим более детально распределение характеристик цунами вдоль различных участков российского побережья. На рис. 3 показано распределение высот волн от источников гидродинамического типа для северной части российского побережья (выше Анапы).

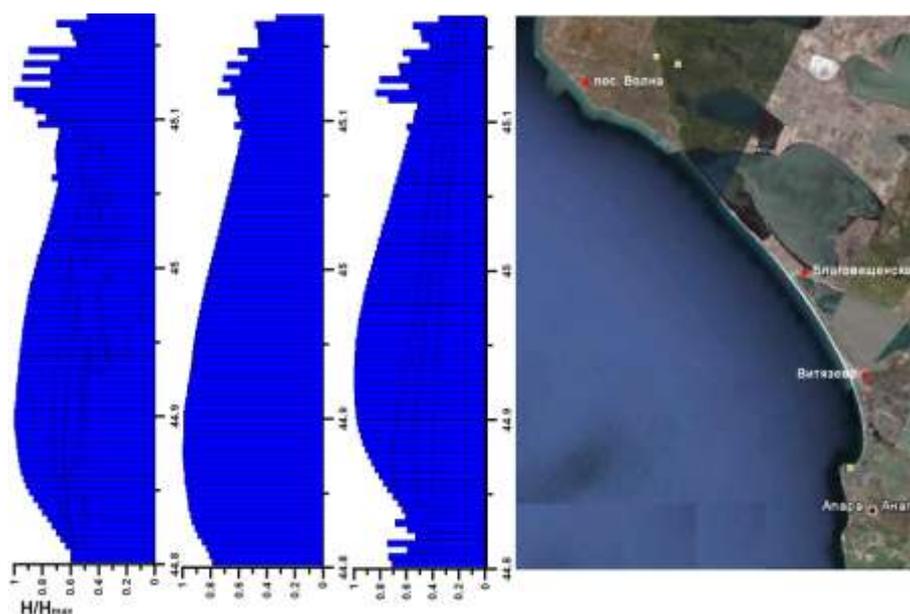


Рис. 3. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (слева направо – от дальних, средних и близких соответственно) в северной части российского побережья

Как видно, распределения высот волн от различных зон оказываются в среднем одинаковыми, за исключением района Анапы, где заметна внутренняя структура от ближних источников. Фактически, для всего района от пос. Волна до Анапы высота волны меняется не более чем вдвое, так что трудно говорить здесь о зонах с существенно разными высотами волн.

Распределения высот волн от гидродинамических источников в районе Новороссийск – Геленджик не более чем в два раза от пункта к пункту, демонстрируя, что возможное цунами почти в равной степени затронет все пункты в этой части побережья. Не имея точной батиметрии новороссийской бухты, высота волны определялась только на входе в бухту и ее значение ассоциировалось с городом Новороссийск. Расчёты показали, что высоты волн на входе в бухту не очень значительны.

Аналогичные распределения построены для участка побережья между скалой «Парус» и Туапсе. Максимальные высоты волн от гидродинамических источников здесь проявляются в пунктах Ольгинка и Криница. Высоты волн от пункта к пункту меняются не более чем в два раза. Следует отметить, что в п. Джугба и п. Новомихайловский высоты волн в 1,5–2 раза ниже, чем в соседних районах.

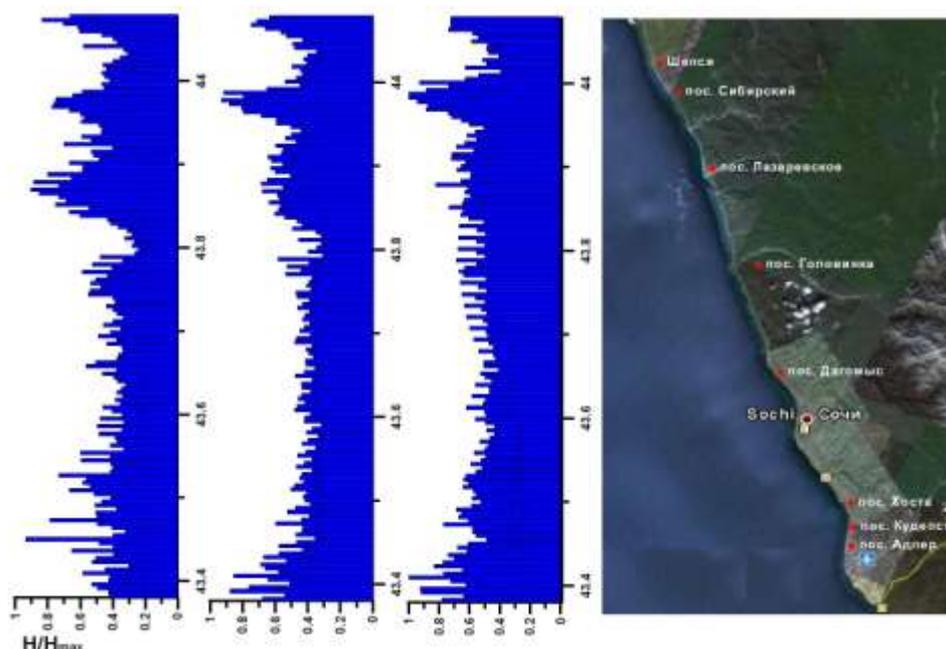


Рис. 4. Распределение нормированных высот волн от гидродинамических источников (слева направо – от дальних, средних и близких соответственно) в южной части российского побережья

Распределения высот волн цунами в южной части российского побережья приведены на рис. 4. Отметим, что распределения относительных высот волн от гидродинамических источников показывают усиление высот в п. Сибирский и п. Лазаревское, «провалы» в п. Шевси и г. Сочи (не более 0.5 от максимального значения).

2. Моделирование потенциально возможных цунами в Чёрном море

Пока неясно, возможны ли землетрясения с магнитудой 7 и более непосредственно в бассейне Черного моря. Следующими по силе являются землетрясения с магнитудой 6.5–7. В прошлом столетии два таких землетрясения произошли около побережья Турции с магнитудами 6.7 и 6.8. Первое произошло 20 декабря 1942 года, его магнитуда составила 6.7 и эпицентр имел координаты 40.87 с.ш, и 36.47 в.д. Второе землетрясение случилось 1 февраля 1944 года, оно имело магнитуду 6.8, и его эпицентр находился в точке 41.41 с.ш, и 32.69 в.д. Оба они не вызвали цунами, или, по крайней мере, оно не было зарегистрировано. Поэтому совместно с турецкими коллегами, выполнена модернизация параметров этих землетрясений, чтобы они смогли вызвать цунами. При этом эпицентры землетрясений оставлены такими же, как и в реальных событиях. Модернизированные таким образом землетрясения

могли бы привести к цунами в Черном море, и изучение потенциально возможных событий позволит оценить опасность цунами, возникающих у побережья Турции для российского побережья.

Параметры первого источника цунами (будем называть его событием 1942 г.) выбраны следующими: эпицентр 36.47 в.д., 40.87 с.ш, длина разлома 150 км, ширина 60, глубина очага 10 км, смещение по разрыву 10 м. Угол разлома с меридианом (strike) 345° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 57° и вдоль разлома (slip) 2° . Параметры второго источника (событие 1944 г.) выбраны следующими: эпицентр 32.69 в.д., 41.41 с.ш, длина разлома 120 км, ширина 60 км, глубина очага 10 км, смещение по разрыву 10 м. Угол разлома с меридианом (strike) 332° , угол смещения плиты вглубь от разлома (dip) 77° и вдоль разлома (slip) 31° . С помощью модели Окады, о которой уже неоднократно упоминалось ранее, рассчитаны начальные смещения водной поверхности (рис. 5). В частности, высота 1942 г. цунами составила 2.1 м, а 1944 г. – 3.3 м.

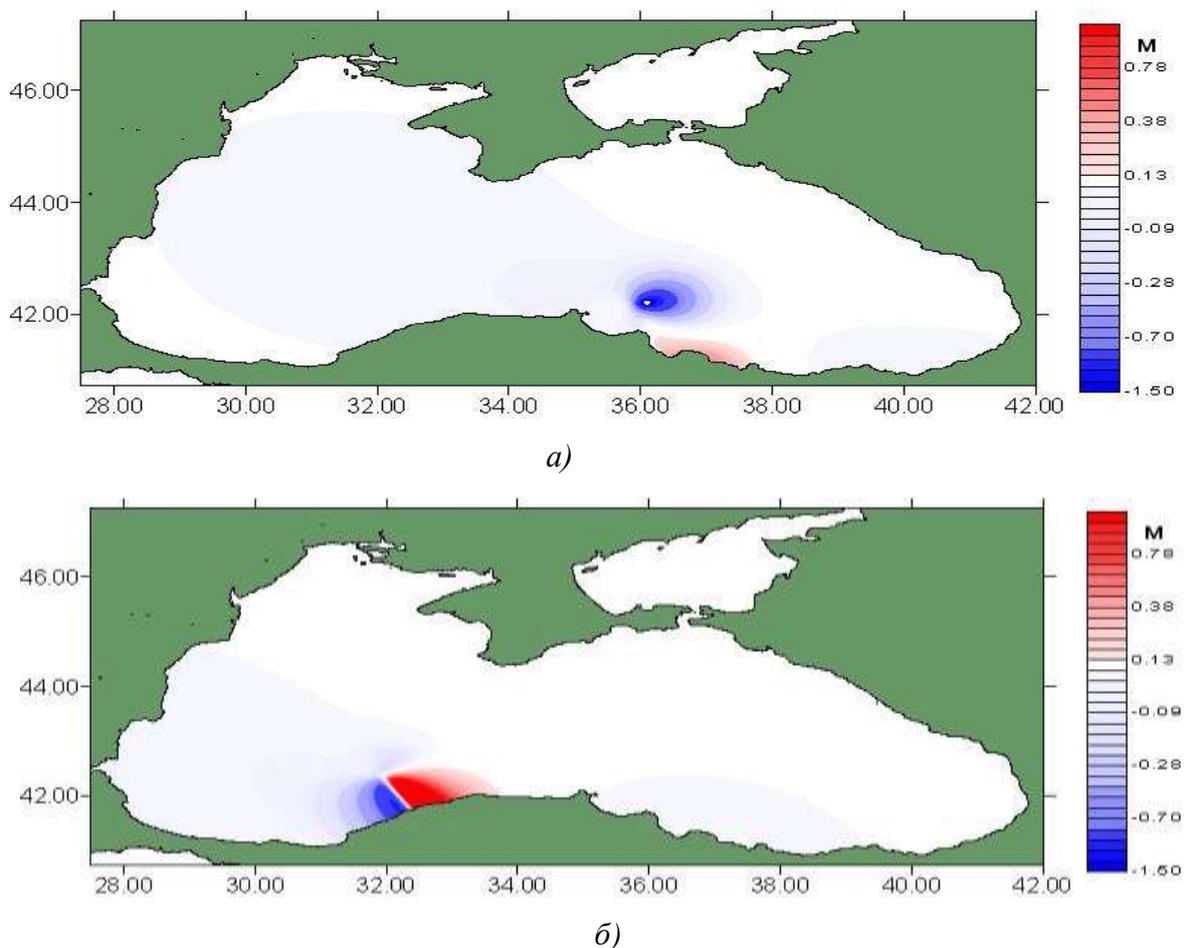


Рис. 5. Начальное смещение уровня воды в событиях 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

Распространение цунами моделировалось на протяжении 10 часов. Распределение максимальных амплитуд цунами в бассейне Черного моря (диаграмма направленности) представлено на рис. 6.

Распределение максимальных высот волн вдоль российского побережья от Новороссийска до Сочи (рис. 7) показывает, что более разрушительная сила цунами приходится на северную и центральную часть побережья. Из рисунка видно, что максимальные высоты 1.6 м получают в районе южнее Анапы и 1.2 м в п. Дивноморское, южнее Геленджика, так же высоты 1.2–1.4 м получают в п. Лазаревское, севернее г. Сочи.

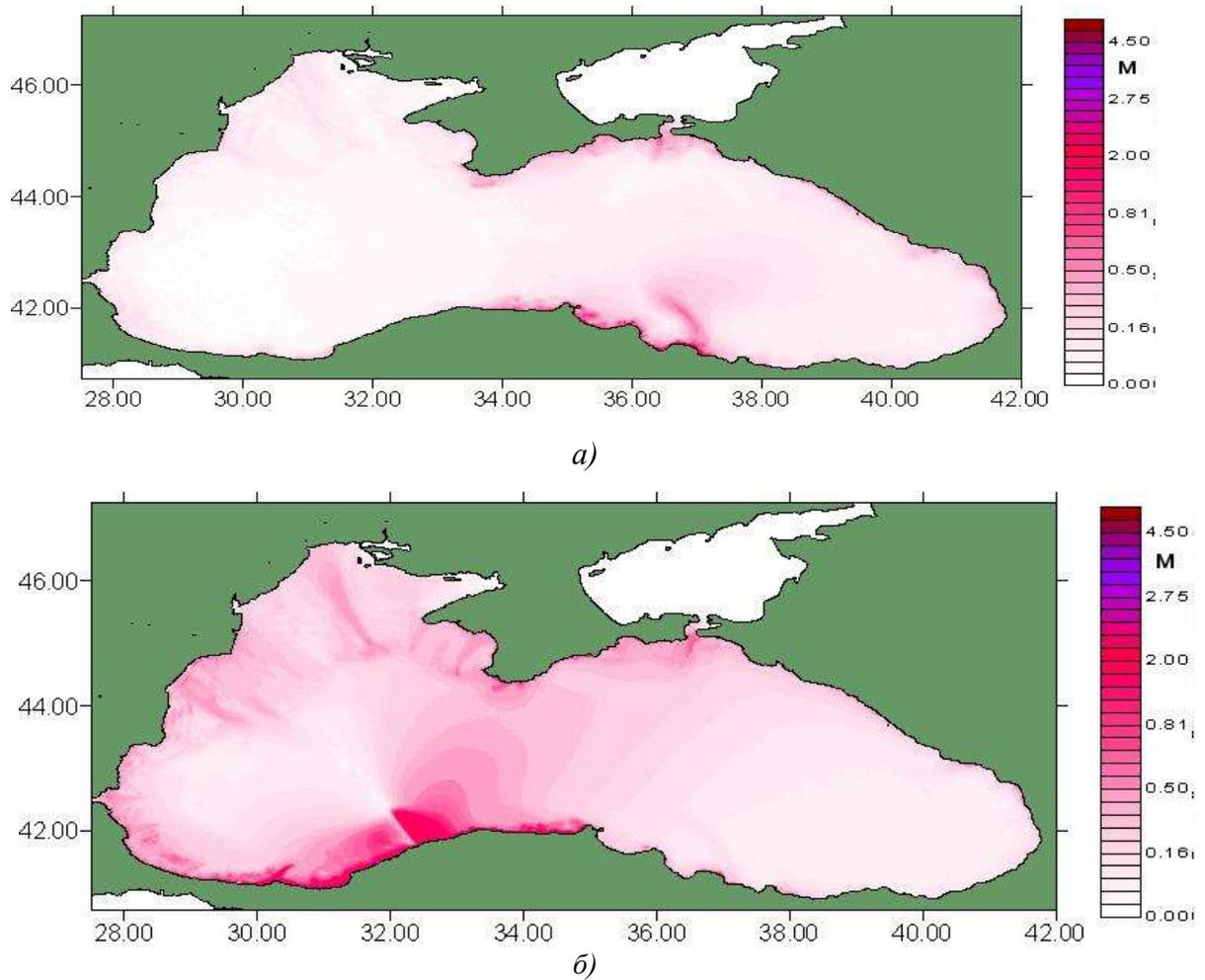


Рис. 6. Распределение максимальных амплитуд во время событий 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

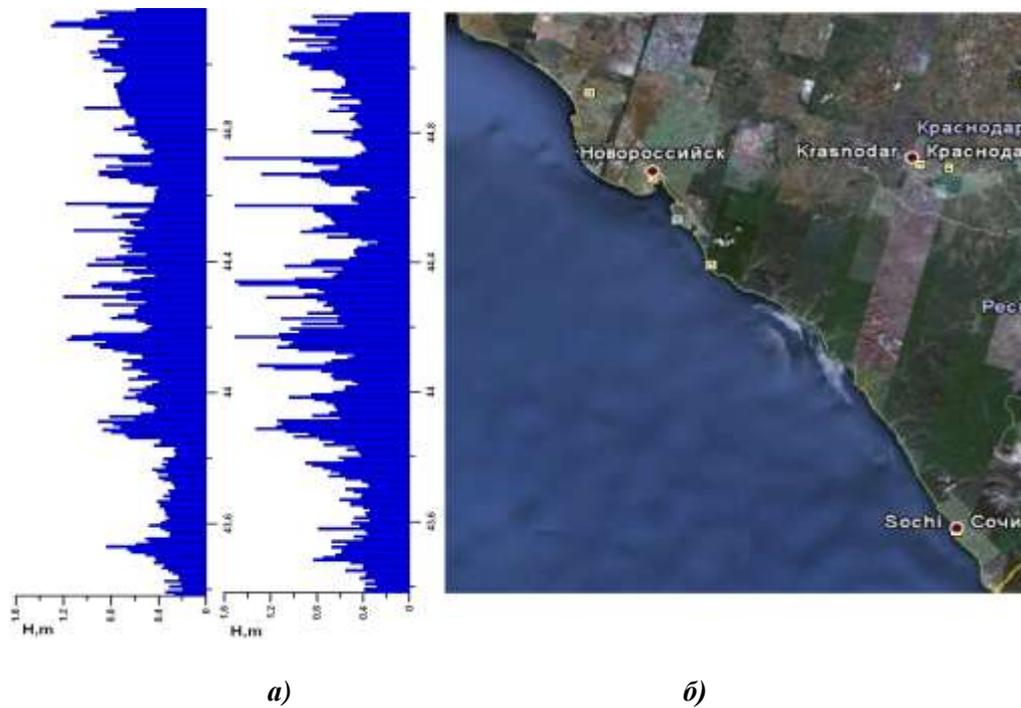


Рис. 7. Распределение высот волн вдоль российского побережья во время событий 1942 г. (а) и 1944 г. (б)

3. Прогнозирование высот волн цунами на российском побережье

Результаты расчетов высот волн для основных пунктов российского побережья Черного моря представлены на рис. 8.

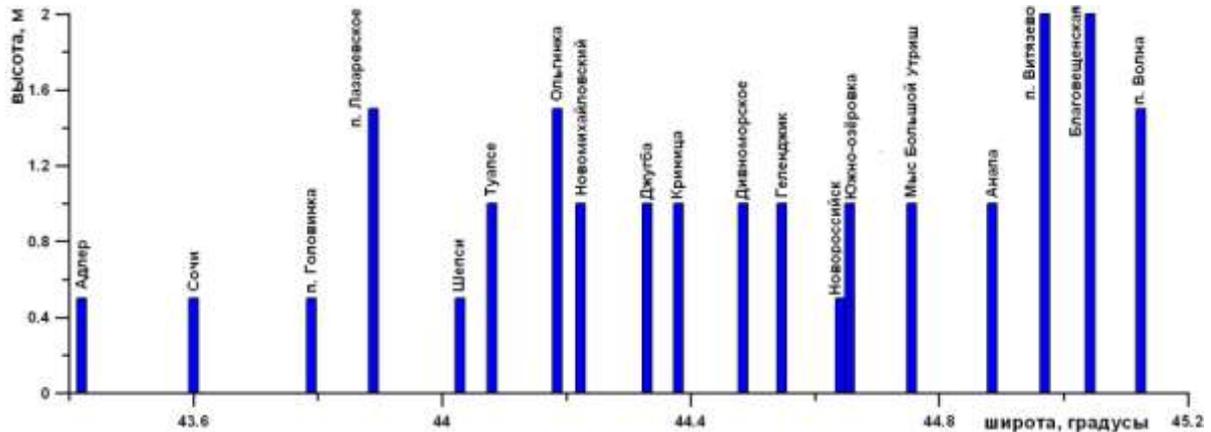


Рис. 8. Распределение прогностических высот волн цунами вдоль российского побережья Черного моря с юга на север

Как отмечалось ранее, в нашем распоряжении нет «расчетных» параметров сильных землетрясений, которые были бы ответственны за цунами в Черном море с повторяемостью раз в 100 лет. Поэтому прогноз выдается на основании моделирования уже имеющихся цунами 20-го столетия и прогностических цунами от «гидродинамических» источников, позволяющих сопоставить высоты цунами в различных пунктах. Кроме того, как уже указывалось, накат волн на берег пока не рассматривается, так что высоты волн цунами задаются в последней мористой точке примерно на глубине 5 метров. Тем не менее, для удобства мы даем для них названия близлежащих населенных пунктов. Вдольбереговая дискретность этих точек имеет масштаб около 0.9 км. Прогностическое значение высоты волны определялось как максимальное значение из всех данных для каждого пункта с точностью до 0.5 метра. В дальнейшем эти цифры могут быть использованы для построения детальной схемы цунамирайонирования населенных пунктов с учетом заливания берега волнами цунами.

По-настоящему сейчас трудно оценить повторяемость прогностических высот волн цунами на российском побережье Черного моря, хотя такие попытки делались и в работе [10] повторяемость разрушительных цунами оценена в 100-500 лет. Кроме того, подчеркнем еще раз, что предлагаемые оценки высот волн цунами не включают локальные эффекты, связанные с возможностью оползневых эффектов. Они основаны только на информации об уже прошедших цунами сейсмического происхождения. Поэтому выдаваемый прогноз характеристик цунами должен рассматриваться как предварительный, который будет уточняться в дальнейшем в нескольких направлениях:

- выделение «расчетных» землетрясений с известной повторяемостью, необходимых для получения оценок повторяемости цунами;
- выделение «расчетных» оползневых явлений, ответственных за локальные цунами вблизи побережья;
- построение детальной карты цунамирайонирования с указанием зон затопления побережья волнами цунами.

Вывод

Цунами в Черном море не является экзотическим событием, и за 2000 лет произошло уже 23 события, так что повторяемость цунами оценивается примерно раз в 100 лет. На российском побережье Черного моря только за последние 100 лет произошло 7 событий, то есть в среднем одно событие в 15 лет. Отсюда видно, что опасность цунами для Черноморского

побережья России не может игнорироваться. В то же время объем количественной информации об исторических цунами крайне мал, поэтому для предварительного прогноза высот цунами мы использовали результаты численного моделирования исторических событий (цунами 1939 и 1966 годов) и возможных прогностических событий, локализованных равномерно в бассейне Черного моря (55). Результаты моделирования показывают, что высоты волн цунами вдоль побережья распределены неравномерно, не превышая двух метров вблизи населенных пунктов. Эти значения могут быть использованы для детального цунамирайонирования отдельных населенных пунктов.

Работа выполнена при поддержке грантов РФФИ (09-05-00971, 11-05-00216) и ГК № 02.740.11.0732.

Библиографический список

1. **Григораш, З.К.** Обзор удаленных мареограмм некоторых цунами в Черном море // Труды СахКНИИ. – Южно-Сахалинск: СахКНИИ, 1972. Вып. 29. С. 271–278.
2. **Григораш, З.К.** Волны цунами, сопровождавшие Анапское землетрясение 12 июля 1966 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // Океанология. 1969. Т. 9. Вып. 6. С. 988–995.
3. **Григораш, З.К.** Мареографные данные о цунами в Черном море, вызванном турецким землетрясением в декабре 1939 г. / З.К. Григораш, Л.А. Корнева // Океанология. 1972. Т. 12. С. 417 – 422.
4. **Доценко, С.Ф.** Цунами в Черном море // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 1995. Т. 30. С. 513–519.
5. **Зайцев, А.И.** Моделирование цунами в Черном море / А.И. Зайцев [и др.] // Известия АИН. Сер. Прикладная математика и механика. 2002. Т. 3. С. 27–45.
6. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в Индийском океане / А.И. Зайцев [и др.] // Доклады РАН. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
7. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев [и др.] // ДАН. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.
8. **Куркин, А.А.** Модифицированный вычислительный комплекс «ЦУНАМИ» для оценки рисков, связанных с цунами / А.А. Куркин [и др.] // Известия АИН РФ. Прикладная математика и механика. 2004. Т. 9. С. 88–100.
9. **Куркин, А.А.** Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 163–172.
10. **Литвиненко, Г.И.** Параметры и характеристики низкочастотных волн сейсмического происхождения в Черном море / Г.И. Литвиненко, С.С. Стрекалов // Гидротехническое строительство. 2001. № 7. С. 5–7.
11. **Никонов, А.А.** Цунами на берегах Черного и Азовского морей // Физика Земли. 1997. № 1. С. 86–96.
12. **Никонов, А.А.** Повторяемость цунами на берегах Черного и Азовского морей // Известия РАН. Физика Земли. 1997. Т. 33. С. 72–87.
13. **Пустовитенко, Б.Г.** Землетрясения Крымско-Черноморского региона / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий, А.В. Горячун. – Киев: Наук. думка, 1989.
14. **Пустовитенко, Б.Г.** Сейсмичность Черноморской впадины / Б.Г. Пустовитенко, В.Е. Кульчицкий // Геофизический журнал. 1991. Т. 13. № 1. С. 14–19.
15. **Пелиновский, Е.Н.** Нелинейная динамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Горький: ИПФ АН СССР, 1982.
16. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. – 276 с.
17. **Соловьева, О.Н.** Цунами в Черном море: исторические события, сейсмические источники и закономерности распространения / О.Н. Соловьева [и др.] // Океанология. 2004. Т. 44. № 5. С. 679–685.
18. **Храмушин, В.Н.** Метод детального цунамирайонирования на примере побережья Анивского залива / В.Н. Храмушин // Океанология. 1994. Т. 34. № 2. С. 218–223.

19. **Koike, N.** Far-field tsunami potential and a real-time forecast system for the Pacific using the inversion method / N. Koike, Y. Kawata, F. Imamura // *Natural Hazards*. 2003. Vol. 29. P. 423–436.
20. **Pelinovsky, E.** Preliminary estimates of tsunami danger for the northern part of the Black Sea // *Phys. Chem. Earth (A)*. 1999. Vol. 24. No. 2. P. 175–178.
21. **Pelinovsky, E.** Analysis of tide-gauge records of the 1883 Krakatau tsunami. Tsunamis: case studies and recent developments / E. Pelinovsky [et al.] // *Advances in Natural and Technological Hazards Research*. Vol. 23. Springer. 2005. P. 57-77.
22. **Rabinovich, A.B.** The 26 December 2004 Sumatra Tsunami: Analysis of Tide Gauge Data from the World Ocean Part 1. Indian Ocean and South Africa / A.B. Rabinovich, R.E. Thomson // *Pure and Applied Geophysics*. 2007. Vol. 164. P. 261–308.
23. **Ranguelov, B.** The nonseismic tsunami observed in the Bulgarian Black Sea on 7 May 2007: was it due to a submarine landslide? / B. Ranguelov [et al.] // *Geophys. Research Letters*. 2007. Vol. 35. L18613, doi: 10.1029/2008GL034905.
24. **Sato, H.** Study on a simplified method of tsunami risk assessment H. Sato [et al.] // *Natural Hazards*. 2003. Vol. 29. P. 325–340.
25. **Vilibic, I.** Possible atmospheric origin of the 7 May 2007 western Black Sea shelf tsunami event / I. Vilibic [et al.] // *J. Geophys. Research*. 2010. Vol. 115, C07006, doi: 10.1029/2009JC005904.
26. **Yalciner, A.** Tsunamis in the Black Sea: comparison of the historical, instrumental and numerical data / A. Yalciner [et al.] // *J. Geophys. Research*. 2004. Vol. 109, No. C12, C12023 10.1029/2003JC002113.

*Дата поступления
в редакцию 28.02.2011*

A.I. Zaytsev, E.N. Pelinovsky, A. Yalciner

THE FORECAST OF THE TSUNAMI WAVES HEIGHTS AT THE RUSSIAN BLACK SEA COAST

In the present work the forecasting of tsunami heights for Russian Coast of the Black Sea is discussed. The numerical simulation of the prognostic events (55) which sources are distributed uniformly in a basin of the Black Sea is performed. Their results are compared with results of the numerical simulations of the historic events (1939 and 1966) and data of tsunami observations. It is used to predict possible tsunami wave heights along the Russian coast of the Black Sea.

Key words: Tsunami, Numerical modeling, Black sea.

УДК 537.86

Е.М. Громов, О.М. Солычева, В.В. Тютин

**РАСПРОСТРАНЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ ВЕКТОРНЫХ ВОЛНОВЫХ ПАКЕТОВ
МАЛОЙ ПРОТЯЖЕННОСТИ В ПЛАВНО НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Государственный университет – Высшая школа экономики, Нижегородский филиал

В рамках третьего приближения теории дисперсии нелинейных волн получено замкнутое уравнение движения центра «масс» векторного волнового пакета в анизотропных средах с произвольным профилем неоднородности. В зависимости от начальных условий показана возможность как локализации траекторий движения коротких пакетов, так и инфинитного движения пакетов. Область локализации коротких пакетов отличается от области локализации протяженных пакетов при тех же начальных условиях и может как превышать, так и уменьшаться по сравнению с областью локализации протяженных волновых пакетов и определяется параметром линейной дисперсии третьего порядка.

Ключевые слова: дисперсия, нелинейность, неоднородность, поляризация, короткий векторный волновой пакет, траектория движения.

Введение

Интерес к динамике коротких нелинейных векторных волновых пакетов в неоднородных средах обусловлен многочисленными приложениями в различных областях физики. Так, в гидродинамике распространение коротких (порядка нескольких длин волн) цугов интенсивных поверхностных волн исследуется, в частности, с проблемой волн «убийц» и волн цунами [1–3]. В нелинейной оптике распространение коротких оптических импульсов в волоконно-оптических линиях связи исследуется, в частности, с проблемой увеличения информационной емкости линий связи [4].

Распространение оптических импульсов достаточно большой протяженности в одномодовых неоднородных линиях хорошо описывается нелинейным уравнением Шредингера (NSE) с неоднородным потенциалом [5–6], учитывающим линейную дисперсию второго порядка, кубичную нелинейность (self-phase modulation) и неоднородный потенциал. В этом случае при произвольном профиле потенциала найдены траектории движения центра «масс» протяженного пакета, а при линейном профиле неоднородности найдено точное «солитонное» решение (солитон Чена) [7]. В двухмодовых волноводах это неоднородные связанные нелинейные уравнения Шредингера (CNSE) [8–10], учитывающие взаимодействие мод через перекрестную фазовую модуляцию (cross-phase modulation) и неоднородный потенциал и связанные уравнения Гинзбурга–Ландау (CGL) [11–13], учитывающие также и линейную дисперсию третьего порядка (third-order linear dispersion) и потери в волноводе.

Уменьшение протяженности волновых импульсов приводит к необходимости учета в модельных нелинейных уравнениях членов более высокого (третьего) порядка малости, соответствующих нелинейным эффектам укрупнения (stepping) [14] и индуцированное рамановское рассеяние (stimulated Raman-scattering) [15]. Так, в одномодовых неоднородных волноводах распространение коротких оптических импульсов может быть описано нелинейным уравнением Шредингера третьего порядка (TNSE) с неоднородным потенциалом [16–22], содержащим как линейное слагаемое, отвечающее линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion), так и нелинейные члены самовоздействия: самоукрупнения (self-stepping) и самоиндуцированное рамановское рассеяние (self-stimulated Raman-scattering). В этом случае при произвольном профиле неоднородного потенциала найдены траектории движения центра «масс» короткого волнового пакета, а при линейном профиле неоднородности найдено точное решение в виде короткого скалярного солитона, обобщающее солитон

Чена [7]. В работе [23] при выполнении условий Хироты получено замкнутое (не требующее знания формы волнового пакета в каждый момент времени) уравнение, описывающее траектории движения пакета в слабо неоднородной среде. Там же была показана возможность «выхода» волнового пакета из «ямы», или, наоборот, – ограниченного движения пакета на вершине «холма», что отличает поведение коротких волновых пакетов от поведения упругих частиц. Отличие траекторий коротких волновых пакетов от траекторий частиц относится к эффектам нелинейной дисперсии.

При распространении коротких векторных оптических импульсов в двухмодовых неоднородных волноводах возникает необходимость учета в каждом из нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка для различных поляризаций еще и перекрестных нелинейных членов третьего порядка малости, соответствующих перекрестному укручению (cross-stepping) и перекрестному индуцированному рамановскому рассеянию (cross-stimulated Raman-scattering) [24–26]. Так возникают два связанных нелинейных уравнения Шредингера третьего порядка (CTNSE) с неоднородным потенциалом, содержащих нелинейные члены третьего порядка малости, описывающие как само воздействие (self-stepping и self-stimulated Raman-scattering), так и перекрестное взаимодействие различных поляризаций (cross-stepping и cross-stimulated Raman-scattering) [24].

В данной работе будет рассмотрена динамика коротких векторных волновых пакетов в плавно неоднородных анизотропных средах. Рассмотрение будет проведено в рамках третьего приближения теории дисперсии нелинейных волн. Будет получено замкнутое уравнение движения центра «масс» векторного волнового пакета при произвольном профиле неоднородности. В зависимости от начальных условий показана возможность как локализации траекторий движения коротких пакетов волн на параболическом профиле, так и инфинитного движения пакетов. Область локализации коротких пакетов отличается от области локализации протяженных пакетов при тех же начальных условиях и может как превышать, так и уменьшаться по сравнению с областью локализации протяженных волновых пакетов и определяется параметром линейной дисперсии третьего порядка.

Постановка задачи

Распространение векторного волнового поля $\vec{E} = \vec{e}_1 U(\xi, t) \exp(i\omega t - ik_u \xi) + \vec{e}_2 W(\xi, t) \exp(i\omega t - ik_w \xi)$ малой протяженностью (в несколько длин волн $k_{u,w} L_{u,w} \gtrsim 1$) и малой длительности (в несколько периодов $\omega T_{u,w} \gtrsim 1$), в слабо анизотропных нелинейных диспергирующих средах с неоднородным потенциалом $\Phi(x)$ достаточно хорошо описывается третьим (абберационным) приближением теории дисперсии нелинейных волн, в котором учитываются члены третьего порядка малости: это линейные члены $\varepsilon^3 \sim \partial^3 U / \partial \xi^3, \partial^3 W / \partial \xi^3$, соответствующие линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion), и нелинейные члены, соответствующие эффектам самоукручения (self-stepping) $\varepsilon^3 \sim \partial(|U|^2 U) / \partial \xi, \partial(|W|^2 W) / \partial \xi$, самоиндуцированного рамановского рассеяния (self-stimulated Raman-scattering) $\varepsilon^3 \sim W \partial(|W|^2) / \partial \xi, U \partial(|U|^2) / \partial \xi$, перекрестного укручения (cross-stepping) $\varepsilon^3 \sim \partial(|W|^2 U) / \partial \xi, (|U|^2 W)'_{\xi}, \partial(W^2 U^*) / \partial \xi, (U^2 W^*)'_{\xi}$ и перекрестного индуцированного рамановского рассеяния (cross-stimulated Raman-scattering) $\varepsilon^3 \sim W (|U|^2)'_{\xi}, U \partial(|W|^2) / \partial \xi, U^* \partial(W^2) / \partial \xi, W^* \partial(U^2) / \partial \xi$. В этом приближении базовыми уравнениями динамики медленных огибающих U и W различных поляризационных компонент при условии малого отличия их волновых чисел $|k_u - k_w| \ll k_{u,w}$ является система двух связанных нелинейных уравнений Шредингера третьего порядка:

$$2i \left[\frac{\partial U}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial U}{\partial x} + \beta \frac{\partial (|U|^2 U + \sigma |W|^2 U)}{\partial x} + \frac{\beta \sigma}{2} \frac{\partial (W^2 U^*)}{\partial x} + \mu U \frac{\partial (|U|^2 + \sigma |W|^2)}{\partial x} + \frac{\mu \sigma}{2} U^* \frac{\partial (W^2)}{\partial x} \right] + \quad (1)$$

$$+ q \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + 2\alpha (|U|^2 + \sigma |W|^2) U + \alpha \sigma W^2 U^* + i\gamma \frac{\partial^3 U}{\partial x^3} + U \cdot \Phi(x) = 0,$$

$$2i \left[\frac{\partial W}{\partial t} + V_g^L \frac{\partial W}{\partial x} + \beta \frac{\partial (|W|^2 W + \sigma |U|^2 W)}{\partial x} + \frac{\beta \sigma}{2} \frac{\partial (U^2 W^*)}{\partial x} + \mu W \frac{\partial (|W|^2 + \sigma |U|^2)}{\partial x} + \frac{\mu \sigma}{2} W^* \frac{\partial (U^2)}{\partial x} \right] + \quad (2)$$

$$+ q \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} + 2\alpha (|W|^2 + \sigma |U|^2) W + \alpha \sigma U^2 W^* + i\gamma \frac{\partial^3 W}{\partial x^3} + W \cdot \Phi(x) = 0,$$

где $V_g^L = \partial\omega/\partial k$ – линейная групповая скорость; $\omega = \omega(k, |U|^2, |W|^2)$ – нелинейное дисперсионное соотношение; $q = -\partial^2\omega/\partial k^2$ – коэффициент линейной дисперсии второго порядка; $\alpha = \partial\omega/\partial(|U|^2) = \partial\omega/\partial(|W|^2)$ – коэффициент кубичной нелинейности (self-phase modulation); σ – коэффициент перекрестной фазовой модуляции (cross-phase modulation) (так, для «керровской» нелинейности $\sigma = 2/3$); $\gamma = -\partial^3\omega/(3\partial k^3)$ – коэффициент линейной дисперсии третьего порядка (third-order linear dispersion); β – коэффициент самоукручения (self-stepping) или нелинейной дисперсии; μ – коэффициент самоиндуцированного рамановского рассеяния (self-stimulated Raman-scattering); U^* и W^* – величины, комплексно-сопряженные U и W соответственно.

Сохранение энергии короткого векторного волнового пакета в неоднородных средах

Определим закон изменения энергии ортогональных волновых полей малой протяженности в системе (1)–(2). Для этого умножим (1) на величину U^* , комплексно-сопряженную к U , и сложим полученное уравнение с комплексно ему сопряжённым. Интегрируя полученное уравнение по x от $-\infty$ до ∞ при нулевых условиях на бесконечности $(U, W)|_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$, получим скорость изменения энергии поляризационной компоненты U :

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 dx = -\sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 \frac{\partial |W|^2}{\partial x} dx - \frac{\sigma}{4} (2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} \left[(U^*)^2 \frac{\partial (W^2)}{\partial x} + U^2 \frac{\partial (W^*)^2}{\partial x} \right] dx. \quad (3)$$

В частном случае при одной пространственной фазовой модуляции различных поляризаций $U = |U| \exp(i\Omega_u(t) + i\phi(x))$, $W = |W| \exp(i\Omega_w(t) + i\phi(x))$ соотношение (3) принимает более простую форму

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 dx = -\frac{3}{2} \sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 \frac{\partial |W|^2}{\partial x} dx.$$

Аналогично из уравнения (2) получим скорость изменения энергии для поляризационной компоненты W :

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |W|^2 dx = -\sigma(2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} |W|^2 \frac{\partial |U|^2}{\partial x} dx - \frac{\sigma}{4} (2\mu - 3\beta) \int_{-\infty}^{+\infty} \left[(W^*)^2 \frac{\partial (U^2)}{\partial x} + W^2 \frac{\partial (U^*)^2}{\partial x} \right] dx. \quad (4)$$

Из (3)–(4) следует, что распространение короткого волнового поля одной поляризации в присутствии волнового поля другой поляризации сопровождается энергообменом между различными поляризационными компонентами. Складывая соотношения (3) и (4), получим закон сохранения энергии векторного волнового пакета:

$$\frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} (|U|^2 + |W|^2) dx = 0. \quad (5)$$

Траектории движения коротких векторных пакетов в неоднородных средах

В дальнейшем будем интересоваться усредненной характеристикой волнового пакета в виде центра «масс» пакета

$$\bar{x} = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} x (|U|^2 + |W|^2) dx,$$

где $N_0 = \int_{-\infty}^{+\infty} (|U|^2 + |W|^2) dx$ – энергия векторного пакета. Найдем скорость движения центра «масс» векторного пакета $V(t) = d\bar{x}/dt$. Умножим (1) на xU^* , вычитая из полученного уравнения комплексно ему сопряженное, и проинтегрируем полученное уравнение по x от $-\infty$ до $+\infty$ при нулевых условиях на бесконечности $(U, W)|_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$. Аналогично умножим (2) на xW^* , вычитая из полученного уравнения комплексно ему сопряженное, и проинтегрируем полученное уравнение по x от $-\infty$ до $+\infty$ при нулевых условиях на бесконечности $(U, W)|_{x \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$. Складывая полученные таким образом соотношения, будем иметь для скорости движения центра «масс» векторного пакета:

$$\begin{aligned} V(t) = V_g + \frac{q}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) dx + \frac{(3\beta + 2\mu)}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (|U|^4 + |W|^4) dx + \\ + \frac{\sigma(3\beta + 2\mu)}{4N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(4|U|^2|W|^2 + (WU^*)^2 + (W^*U)^2 \right) dx - \frac{3\gamma}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial W}{\partial x} \right|^2 \right) dx, \end{aligned} \quad (6)$$

где $\varphi_{u,w}$ – фаза огибающих U и W соответственно: $U = |U|e^{i\varphi_u}$, $W = |W|e^{i\varphi_w}$.

Найдем ускорение короткого векторного пакета. Дифференцируя (6) по времени с учетом скорости изменения плотности импульса векторного волнового пакета

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) = \frac{\alpha}{4} \frac{\partial (|U|^4 + |W|^4)}{\partial x} + \frac{\alpha\sigma}{2} \frac{\partial (|U|^2|W|^2)}{\partial x} - \\ - q \frac{\partial}{\partial x} \left(\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial W}{\partial x} \right|^2 \right) - \beta \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} |U|^4 + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} |W|^4 \right) - \\ - 2(\mu + \beta) \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} \frac{\partial |U|^4}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} \frac{\partial |W|^4}{\partial x} \right) - \frac{\beta\sigma}{4} \frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} \right) \left(4|U|^2|W|^2 + (UW^*)^2 + (U^*W)^2 \right) \right) - \\ - (\mu + \beta)\sigma \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} \right) \frac{\partial (4|U|^2|W|^2 + (UW^*)^2 + (U^*W)^2)}{\partial x} + \frac{1}{2} \frac{d\Phi}{dx} (|U|^2 + |W|^2), \end{aligned} \quad (7)$$

получим для величины ускорения центра «масс» пакета

$$\begin{aligned} a(t) = \frac{dV}{dt} = \frac{3\alpha\gamma - q\beta}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial^2 \varphi_u}{\partial x^2} |U|^4 + \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial x^2} |W|^4 \right) dx + \\ + \frac{\sigma(3\alpha\gamma - q\beta)}{8N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial^2 \varphi_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi_w}{\partial x^2} \right) \left(4|U|^2|W|^2 + (UW^*)^2 + (U^*W)^2 \right) dx - \\ - \frac{q}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\Phi}{dx} (|U|^2 + |W|^2) dx - \frac{3\gamma}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\Phi}{dx} \left(\frac{\partial \varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial \varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) dx. \end{aligned} \quad (8)$$

Полагая в дальнейшем параметры исходной системы (1)–(2) связанными соотношением $3\alpha\gamma - q\beta = 0$, уравнение (8) примет вид

$$a(t) = -\frac{q}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\Phi}{dx} (|U|^2 + |W|^2) dx - \frac{3\gamma}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{d\Phi}{dx} \left(\frac{\partial\varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial\varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) dx. \quad (9)$$

Будем рассматривать плавно неоднородные среды, масштаб неоднородности которых L_Φ много больше масштабов неоднородности огибающих векторного волнового пакета $L_{u,w}$: $L_\Phi \gg L_{u,w}$. В этом случае из (9) получим для ускорения векторного пакета

$$a(t) = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_{x=\bar{x}} \left(q + \frac{3\gamma}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial\varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial\varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) dx \right). \quad (10)$$

Разделив (10) на $(d\Phi/dx)_{\bar{x}}$ и дифференцируя полученное соотношение по времени, будем иметь:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{a(t)}{(d\Phi/dx)_{\bar{x}}} \right) = -\frac{3\gamma}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\partial}{\partial t} \left(\frac{\partial\varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial\varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right) dx. \quad (11)$$

С учетом соотношения (7) для скорости изменения плотности импульса соотношение (11) примет вид

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left(\frac{a(t)}{(d\Phi/dx)_{\bar{x}(t)}} \right) = & -\frac{3\gamma}{4} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_{\bar{x}(t)} - \frac{3\gamma(\mu + \beta)}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial^2\varphi_u}{\partial x^2} |U|^4 + \frac{\partial^2\varphi_w}{\partial x^2} |W|^4 \right) dx - \\ & - \frac{3\gamma(\mu + \beta)\sigma}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial^2\varphi_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\varphi_w}{\partial x^2} \right) \left(4|U|^2|W|^2 + (UW^*)^2 + (U^*W)^2 \right) dx. \end{aligned} \quad (12)$$

При $\mu + \beta = 0$ из (12) получим уравнение для траекторий движения коротких векторных волновых пакетов в плавно неоднородной среде

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{a(t)}{(d\Phi/dx)_{\bar{x}}} \right) = -\frac{3\gamma}{4} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_{\bar{x}}. \quad (13)$$

С учетом (10) для величины начального ускорения пакетов $a_0 = \left(\frac{d^2\bar{x}}{dt^2} \right)_{t=0} = -\frac{1}{2} \left(\frac{d\Phi}{dx} \right)_{\bar{x}_0} (q + 3\gamma p_0)$

первый интеграл уравнения (13) имеет вид

$$\left(\frac{1}{(d\Phi/dx)_{\bar{x}}} \frac{dV}{dt} \right)^2 + \frac{3\gamma V}{2} = \frac{1}{4} (q + 3\gamma p_0)^2 + \frac{3\gamma V_0}{2} = C_0, \quad (14)$$

где $\bar{x}_0 = (\bar{x})_{t=0}$ – начальная координата пакета,

$$\begin{aligned} V_0 = \left(\frac{d\bar{x}}{dt} \right)_{t=0} = & V_g + qp_0 + \frac{\beta}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} (|U|^4 + |W|^4)_{t=0} dx + \\ & + \frac{\beta\sigma}{4N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(4|U|^2|W|^2 + (WU^*)^2 + (W^*U)^2 \right)_{t=0} dx - \frac{3\gamma}{2N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\left| \frac{\partial U}{\partial x} \right|^2 + \left| \frac{\partial W}{\partial x} \right|^2 \right)_{t=0} dx, \end{aligned}$$

начальная скорость пакета; $p_0 = \frac{1}{N_0} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\frac{\partial\varphi_u}{\partial x} |U|^2 + \frac{\partial\varphi_w}{\partial x} |W|^2 \right)_{t=0} dx$ – начальный импульс векторного волнового пакета. В частности, при начальной фазе огибающей пакета, равной $\varphi_{u,w} = k_0 x$, получим для начального импульса очевидное соотношение $p_0 = k_0$.

Из (14) следует, что скорость пакета может принимать значения $\gamma V \leq 2C_0/3$.

Интегрируя (14), получим для траекторий коротких волновых пакетов

$$\frac{1}{3}\left(C_0 - \frac{3}{2}\gamma V\right)^{3/2} - C_0\left(C_0 - \frac{3}{2}\gamma V\right)^{1/2} + \frac{1}{2}\left(\frac{3\gamma}{2}\right)^2 \cdot \Phi(\bar{x}) = C. \quad (15)$$

1. При $C_0 > 0$, отвечающем условию $(q + 3\gamma p_0)^2 + 6\gamma V_0 > 0$, траектории движения из (15) описываются уравнением

$$\frac{1}{3}(1-v)^{3/2} - (1-v)^{1/2} + \frac{1}{2}\frac{\sqrt{C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}) = \frac{1}{3}(1-v_0)^{3/2} - (1-v_0)^{1/2} + \frac{1}{2}\frac{\sqrt{C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}_0), \quad (16)$$

где $v = V(\bar{x})/V_* \leq 1$, $v_0 = V_0/V_*$ и $V_* = 2C_0/3\gamma$.

На рис. 1 приведена фазовая плоскость уравнения (16) при $\frac{1}{2}\frac{\sqrt{C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(x) = x^2$, $\bar{x}_0 = 0$ и различных начальных значениях v_0 .

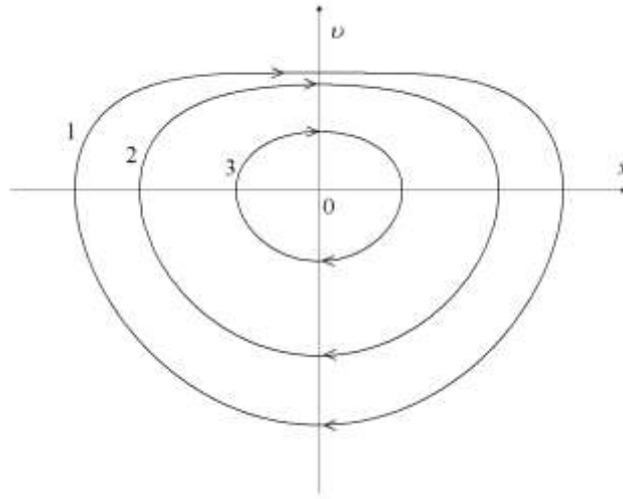


Рис. 1. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям $v_0(1) > v_0(2) > v_0(3)$

При достаточно малых значениях скорости движения пакетов, отвечающих условию $|v| \ll 1$, траектории движения пакетов из (16) с учетом разложений

$$\sqrt{1-v} \approx 1 - \frac{1}{2}v - \frac{1}{8}v^2 - \frac{1}{16}v^3 \quad \text{и} \quad (1-v)^{3/2} \approx 1 - \frac{3}{2}v + \frac{3}{8}v^2 + \frac{1}{16}v^3$$

удовлетворяют соотношению

$$v^2\left(1 + \frac{1}{2}v\right) + 2\frac{\sqrt{C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}) = v_0^2\left(1 + \frac{1}{2}v_0\right) + 2\frac{\sqrt{C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}_0). \quad (17)$$

Данное соотношение описывает траектории 1 на рис. 1 в окрестности начала координат. В частности, при достаточно малых значениях γ , удовлетворяющих соотношениям $\gamma p \ll q$ и $\gamma V_0 \ll q$, из (17), удерживая члены порядка γ , получим

$$V^2(\bar{x})\left(1 + \frac{3\gamma V(\bar{x})}{q^2}\right) + q\left(1 + \frac{3\gamma}{q}\left(p_0 - \frac{V_0}{q}\right)\right)\Phi(\bar{x}) = \text{const}. \quad (18)$$

Точки поворота пакетов $V(\bar{x}_c) = 0$ при малых значениях γ из (18) определяются уравнением $q(\Phi(\bar{x}_c) - \Phi(\bar{x}_0)) = V_0^2(1 - 3\gamma p_0/q)$. Так, при $3\gamma p_0/q > 0$ область локализации коротких волновых пакетов сужается по сравнению с областью локализации протяженных пакетов, для которых $\gamma = 0$ при тех же начальных скоростях движения пакетов, а при $3\gamma p_0/q < 0$ – расширяется.

2. При $C_0 = 0$, отвечающем условию $(q + 3\gamma p_0)^2 = -6\gamma V_0$, траектории движения из (15) описываются уравнением

$$v^{3/2} + \Phi(\bar{x}) = v_0^{3/2} + \Phi(\bar{x}_0), \quad (19)$$

в котором $v = -\frac{2}{3} \frac{V}{\gamma^{1/3}}$, $v_0 = -\frac{2}{3} \frac{V_0}{\gamma^{1/3}}$ и $\gamma V \leq 0$.

На рис. 2 приведена фазовая плоскость уравнения (19) при $\Phi(x) = x^2$, $\bar{x}_0 = 0$ и различных начальных значениях v_0 .

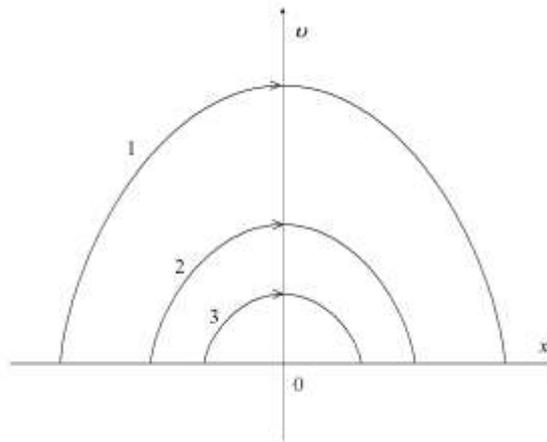


Рис. 2. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям $v_0(1) > v_0(2) > v_0(3)$

3. При $C_0 < 0$, отвечающем условию $6\gamma V_0 + (q + 3\gamma p_0)^2 < 0$, траектории движения пакетов из (15) описываются уравнением

$$\frac{1}{3}(v-1)^{3/2} + (v-1)^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{-C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}) = \frac{1}{3}(v_0-1)^{3/2} + (v_0-1)^{1/2} + \frac{1}{2} \frac{\sqrt{-C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(\bar{x}_0), \quad (20)$$

в котором $v = V(\bar{x})/V_* \geq 1$. Скорость движения пакетов из (20) в ноль не обращается, что приводит к инфинитному (нелокализованному) характеру движения пакетов, а при достижении скорости пакета критического значения $V_* = 2C_0/3\gamma$ ускорение пакета обращается в ноль и пакет движется с постоянной скоростью $V = V_*$. На рис. 3 приведена фазовая плоскость

уравнения (20) при $\frac{1}{2} \frac{\sqrt{-C_0}}{V_*^2} \cdot \Phi(x) = x^2$, $\bar{x}_0 = 0$ и различных начальных значениях v_0 .

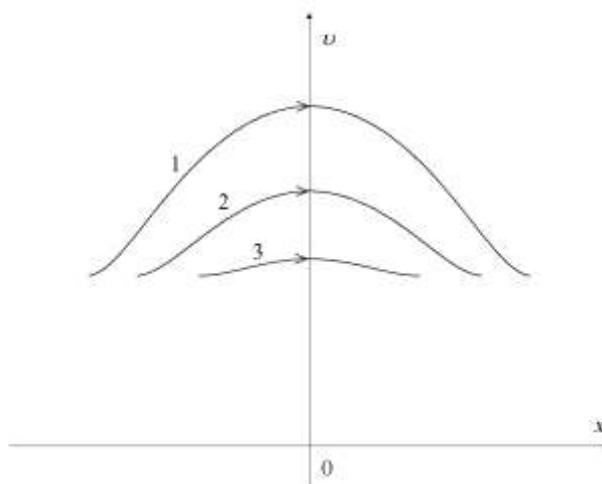


Рис. 3. Кривые 1, 2 и 3 соответствуют значениям $v_0(1) > v_0(2) > v_0(3)$

Вывод

В данной работе проанализировано движение векторных волновых пакетов малой протяженности в анизотропных средах с неоднородностью произвольного профиля. Получено замкнутое уравнение, описывающее траектории движения центра «масс» волновых пакетов. В зависимости от параметров неоднородной среды и начальных условий, возможны как локализованные движения волновых пакетов, так и нелокализованные. Размеры области локализации движения коротких волновых пакетов могут быть как больше, так и меньше соответствующих размеров области локализации движения протяженных волновых пакетов. Это различие относится к эффектам линейной дисперсии третьего порядка.

Работа проведена при поддержке РФФИ (проект № 11 – 02 – 01307)

Библиографический список

1. **Yang, Y.** Solitons in Field Theory and Nonlinear Analysis / Y. Yang. Springer, New York, 2001.
2. **Dickey, L.A.** Soliton Equation and Hamiltonian Systems / L.A. Dickey. World Scientific, New York, 2005.
3. **Kivshar, Y.S.** Optical Solitons: From Fibers to Photonic Crystals / Y.S. Kivshar, G.P. Agrawal // Academic, San Diego, 2003.
4. **Agrawal, G.P.** Fiber Optic Communication Systems // Wiley, New York, 2002.
5. **Zakharov, V.E.** Exact theory of two-dimensional self-focusing and one-dimensional self-modulation of waves in nonlinear media / V.E. Zakharov, A.B. Shabat // Sov. Phys. JETP. 1972. V. 34. P.62 -69.
6. **Hasegawa, A.** Transmission of Stationary Nonlinear Optical Physics in Dispersive Dielectric Fibers I: Anomalous Dispersion / A. Hasegawa, F. Tappert // Appl. Phys. Lett. 1973. V. 23. N. 3. P. 142 – 144.
7. **Chen, H.H.** Nonlinear wave and soliton propagation in media with arbitrary inhomogeneities / H.H. Chen, C.S. Liu // Phys. Fluids. 1978. V.21. N. 3. P. 377–380.
8. **Manakov, S.V.** On the theory of two-dimensional stationary self focussing of electromagnetic waves // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1973. V. 65. P. 505-516; Sov. Phys. JETP. 1974. V.38. P. 248-253.
9. **Fordy, A.P.** Nonlinear Schrodinger equations and simple Lie algebras / A.P. Fordy, P.P. Kulish // Commun. Math. Phys. 1983. V. 89. P. 427–443.
10. **Menyuk, C.R.** Nonlinear pulse-propagation in birefringent optical fibers // Optics Letters. 1987. V.12. P.614; J. Opt. Soc. Am. B. 1988. V. 5. P. 392.
11. **Cundiff, S.T.** Observation of Polarization-Locked Vector Solitons in an Optical Fiber / S.T. Cundiff [et al.] // Phys. Rev. Lett. 1999. V. 82. 3988; Akhmediev [et al.] // Opt. Lett. 1998. V. 23. P. 852.
12. **Tang, D.Y.** Observation of high-order polarization-locked vector solitons in a fiber laser / D.Y. Tang [et al.] // Phys. Rev. Lett. 2008. V.101. 153904.
13. **Christodoulides, D.N.** Vector solitons in birefringent nonlinear dispersive media / D. N. Christodoulides, R. I. Joseph // Opt. Lett. 1988. V.13. N.1. P. 53–55.
14. **Oliviera, J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliveira, M.A. Moura // Phys. Rev. E. 1998, V.57. P. 4751–4755.
15. **Gordon, J.P.** Theory of the soliton self-frequency shift // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 662–664.
16. **Kodama, Y.** Optical solitons in a monomode fiber // J. Stat. Phys. 1985. V. 39. P. 597–614.
17. **Zaspel, C.E.** Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. Lett. 1999. V.82. N.4. P.723–726.
18. **Hong, B.** New Jacobi functions solitons for the higher-order nonlinear Schrodinger equation / B. Hong, D. Lu // Inter. Journal of Nonlinear Science. 2009. V. 7. N. 3. P. 360– 67.
19. **Karpman, V.I.** The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B. 2004. V. 39. P. 341–350.
20. **Gromov, E.M.** Nonlinear dynamics of short wave trains in dispersive media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 110 (1996) 137; JETP. 83 (1996) 73–79.
21. **Gromov, E.M.** Short optical solitons in fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 2000. V.10. N.3. P. 551–558.

22. **Gromov, E.M.** Dynamics of wave packets in the frame of third-order nonlinear Schrödinger equation / E.M. Gromov, L.V. Piskunova, V.V. Tyutin // Physics Letters A. 1999. V. 256. P. 153–158.
23. **Gromov, E.M.** Short intense wave packets in smoothly inhomogeneous media / E.M. Gromov, V.V. Tyutin, D.E. Vorontzov // Phys. Letters A. 1999. V.257. P.182–188.
24. **Kim, J.** A coupled higher-order nonlinear Schrodiger equation including higher-order bright and dark soltons // ETRI Journal. 2001. V.23. N.1. P. 9–15.
25. **Lu, F.** Vector soliton fission / F. Lu, W.H. Lin, W.H. Knox, G.P. Agrawal // Phys. Rev. Lett. 2004. V.93. N.18. 183901. P. 75–90.
26. **Gromov, E.M.** Short vector soliton / E.M. Gromov, V.V. Tyutin, D.E. Vorontzov // Physics Letters A. 2001. V. 287. issue 3-4. P. 233–239.

*Дата поступления
в редакцию 08.02.2011*

E.M. Gromov, O.M. Solycheva, V.V. Tyutin

SHORT VECTOR WAVE PACKETS MOTION IN SMOOTHLY INHOMOGENEOUS MEDIA

In the frame of the third – order nonlinear wave dispersion theory the equation of motion of a vector wave packets mass center taken in to account arbitrary inhomogeneity profile is obtained. As short vector wave packets localized motion as infinite motion is shown. Short vector wave packets localizations area can be as bigger as smaller in comparison with long vector wave packets localizations area. The effect depend from third – order linear dispersion parameter.

Key words: dispersion, nonlinearity, inhomogeneity, polarization, short vector wave - packets, motion trajectory.

УДК 532.62

Д.А. Масленников, Л.Ю. Катаева, О.Е. Куркина, А.А. Куркин

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ ТОНКОЙ ПЛЁНКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ПЕРИОДИЧЕСКИ ИЗМЕНЯЮЩЕГОСЯ ВНЕШНЕГО ПОЛЯ СКОРОСТЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено численное моделирование движения тонкой плёнки на поверхности океана. Построен алгоритм на основе итерационно-интерполяционного метода для моделирования динамики пленки под действием внешнего поля скоростей. Разработан программный комплекс, реализующий данный алгоритм.

Ключевые слова: тонкая плёнка, загрязнения, итерационно-интерполяционный метод, численное моделирование.

В связи с расширением добычи нефти на континентальном шельфе, а также с транспортировкой нефтепродуктов повышается угроза нефтяных загрязнений. Опасность нефтяного загрязнения обусловлена тем, что нефть является поверхностно активным веществом (ПАВ) и образует тонкий слой на поверхности воды. С этим связана важность работ, моделирующих движение плёнки.

Задача распространения плёнки может быть сформулирована следующим образом [1]:

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

В данном уравнении Γ – это концентрация ПАВ, Γ_0 – начальная концентрация, u и v это проекции внешнего поля скорости, задаваемые в следующей форме: $f(x, y, t) = A \cos(qt - kx + \varphi_1) \cos(\omega t - ly + \varphi_2)$. Начальные и граничные условия:

$$\Gamma(x, y, t = 0) = \Gamma_0, \quad \Gamma|_{y=0} = \Gamma_0, \quad \frac{\partial \Gamma}{\partial y} \Big|_{y=y_0} = 0, \quad \Gamma(0, y, t) = \Gamma\left(\frac{2\pi}{k}, y, t\right). \quad (2)$$

Для учёта периодических граничных условий по оси x решение ищется на области размером $\frac{6\pi}{k}$, то есть периодическое граничное условие заменяется условиями

$$\frac{\partial \Gamma}{\partial x} \Big|_{x=-\frac{2\pi}{k}} = \frac{\partial \Gamma}{\partial x} \Big|_{x=\frac{4\pi}{k}},$$

что хотя и увеличивает время вычислений, но не требует использования циклической прогонки.

Реализованный алгоритм состоит из нескольких блоков: Model, Solver2D, Solver1D, Border Condition, TDMA. Model определяет способ дискретизации по времени, вычисляет коэффициенты уравнения и граничных условий для сведения их к обобщённому виду, делегируя решение этого уравнения блоку Solver2D. Solver2D преобразует многомерное уравнение во множество одномерных уравнений гиперболического или параболического вида [2, 3], затем они решаются с помощью Solver1D. Solver1D реализует модифицированную схему итерационно-интерполяционного метода [4]. Он делегирует дискретизацию граничных условий блоку BorderCondition. Итоговая схема (3) – (4), реализуемая данным алгоритмом, имеет вид:

$$\frac{1}{\Delta t} \left(\left(\Gamma_{i-1,j}^{n+1/2} + 4\Gamma_{i,j}^{n+1/2} + \Gamma_{i+1,j}^{n+1/2} \right) - \left(\Gamma_{i-1,j}^n + 4\Gamma_{i,j}^n + \Gamma_{i+1,j}^n \right) \right) + 6 \frac{\left(u_{i+s,j}^n \Gamma_{i+s,j}^n - u_{i-1+s,j}^n \Gamma_{i-1+s,j}^n \right)}{\Delta x} =$$

$$= D \frac{\Gamma_{i-1,j}^{n+1/2} - 2\Gamma_{i,j}^{n+1/2} + \Gamma_{i+1,j}^{n+1/2}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2\tau} \left(\Gamma_{i-1,j}^n + 4\Gamma_{i,j}^n + \Gamma_{i+1,j}^n - 6\Gamma_0 \right), \quad (3)$$

$$\frac{1}{\Delta t} \left(\left(\Gamma_{i,j-1}^{n+1} + 4\Gamma_{i,j}^{n+1} + \Gamma_{i,j+1}^{n+1} \right) - \left(\Gamma_{i,j-1}^{n+1/2} + 4\Gamma_{i,j}^{n+1/2} + \Gamma_{i,j+1}^{n+1/2} \right) \right) + 6 \frac{\left(u_{i,j+s}^n \Gamma_{i,j+s}^{n+1/2} - u_{i,j-1+s}^n \Gamma_{i,j-1+s}^{n+1/2} \right)}{\Delta x} =$$

$$= D \frac{\Gamma_{i,j-1}^{n+1} - 2\Gamma_{i,j}^{n+1} + \Gamma_{i,j+1}^{n+1}}{\Delta x^2} + \frac{1}{2\tau} \left(\Gamma_{i,j+1}^{n+1/2} + 4\Gamma_{i,j}^{n+1/2} + \Gamma_{i,j-1}^{n+1/2} - 6\Gamma_0 \right), \quad (4)$$

где $s = 0$, если n – нечётное, и $s = 1$ в противном случае.

В алгоритме также используются критерии выбора размера шага по времени на основе критериев устойчивости по диффузионному и конвективному члену. Максимальный шаг определяется следующим соотношением:

$$\Delta t \leq \min \left(\frac{1}{4\Delta x} A_u, \frac{1}{4\Delta y} A_v, \frac{5D}{\Delta x^2}, \frac{5D}{\Delta y^2} \right), \quad (5)$$

где A_u, A_v – амплитуда скоростей u и v соответственно.

Главное окно программного комплекса содержит в своей верхней части главное меню, в нижней части – строку состояния, а в центральной – MDI зону (Multiple document interface) для работы с окнами построенных графиков. Главное меню служит для управления программным комплексом, а в строке статуса отображается его текущее состояние.

После начала вычислений в MDI зоне появляется график, в котором отображается решение на текущем шаге. Справа отображается цветовая шкала. Для удобства результаты могут быть выведены в файл, чтобы визуализировать их с помощью внешней программы.

Для ввода параметров в программе предусмотрены диалоги. Диалог, представленный на рис. 1, позволяет пользователю задать значения скорости u или v , в зависимости от выбранного пункта подменю «Параметры - Начальные условия». Диалог показывает формулу для скорости с параметрами и поля, содержащие текущие значения этих параметров, которые может изменить пользователь. Параметр k , введённый в этом диалоге для одной из скоростей u или v , автоматически применяется к другой скорости, и определяет размер периода по x .

Рис. 1. Диалог Поля скоростей

Диалог, представленный на рис. 2, служит для ввода основных параметров, таких как размер области, в которой рассматривается процесс, число узлов расчётной сетки, константы исходной модели, а также параметры отображения результатов.

Основные параметры

Размеры реальной области

Размер периода по x = 75,7010277973444

Размер области по y = 75,7010277973444

Расчетная сетка

Число узлов по x = 40

Число узлов по y = 40

Константы

Коэффициент релаксации tau = 900

Коэффициент диффузии D = 50

Начальная концентрация F0 = 1

Параметры отображения

Пикселей на расчётный узел = 5

Пауза отображения (мс) = 200

Шаг времени для графика = 1

Шагов времени для графика = 10

OK Отмена

Рис. 2. Диалог Поля скоростей

В блоке «Размеры реальной области» нужно ввести размер области по y, тогда как размер области по x определяется размером периода, ведённом в прошлом диалоге. В следующем блоке вводятся параметры расчётной сетки. Чем больше узлов, тем выше точность, но тем больше время вычисления. В следующем блоке указываются константы.

Блок «Параметры отображения» отвечает за визуализацию результатов. Решение показывается в MDI-области. Параметр «Пауза отображения» определяет время, на которое будут остановлены вычисления после каждого отображения. Этот параметр нужно делать ненулевым, если расчёты идут слишком быстро. «Шаг времени для графика» определяет, через какие промежутки времени моделируемого процесса будет производиться отображение. Кроме того, данный параметр влияет на шаг времени в вычислениях, чтобы шаг времени для отображения был кратен шагу время в вычислениях. Параметр «Шагов времени для графика» определяет, сколько раз будет выполнено отображение на графике, прежде чем расчёт будет завершён. После запуска программного комплекса, необходимо задать поля скорости с помощью диалогов, запускающихся из соответствующих пунктов подменю «Параметры – Поля скоростей». Затем с помощью пункта меню «Параметры - Основные» нужно указать размеры расчётной сетки, шаг по времени и параметры вывода результатов на экран. После этого запустить расчёт с помощью пункта меню «Расчёт - Запустить».

В программном комплексе есть возможность настроить вывод результатов. Число пикселей на расчётный узел показывает размер цветного блока, в который будет преобразована точка расчётной сетки на графике. Пауза отображения показывает, на какое время будут приостановлены вычисления после вывода результата. Шаг времени для графика определяет, через какие промежутки времени моделируемого процесса выводить результаты вычислений на экран или файл. Число шагов времени для графика показывает, сколько раз будут выведены результаты и, следовательно, до какого момента времени моделировать процесс. Для контроля корректности вводимых данных предусмотрена их проверка на корректность. Например, при решении данной задачи возможны следующие ошибки: наличие отрицательных размеров области, некорректное количество узлов, введение отрицательный коэффициент

диффузии, нулевой коэффициент релаксации, некорректное задание параметров отображения. Особенно следует отметить ошибку переполнения, которая может возникать при введении несогласованных параметров.

Программный комплекс был протестирован при параметрах, показанных на рис. 1-2, причём скорости u и v равны. На рис. 3 показан начальный профиль концентрации на момент времени $t=1$ с.

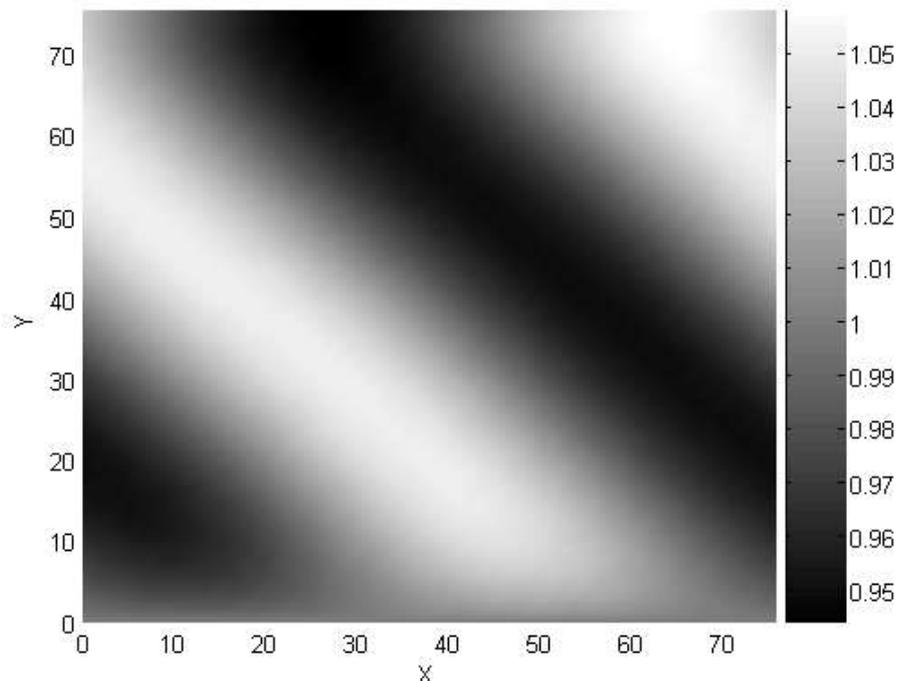


Рис. 3. Распределение концентрации П АВ в момент $t=1$ с

На рис. 4-5 представлена динамика профиля концентрации. Таким образом, с течением времени форма профиля становится более устойчивой, при этом профиль продолжает смещаться вследствие переменного внешнего поля скоростей.

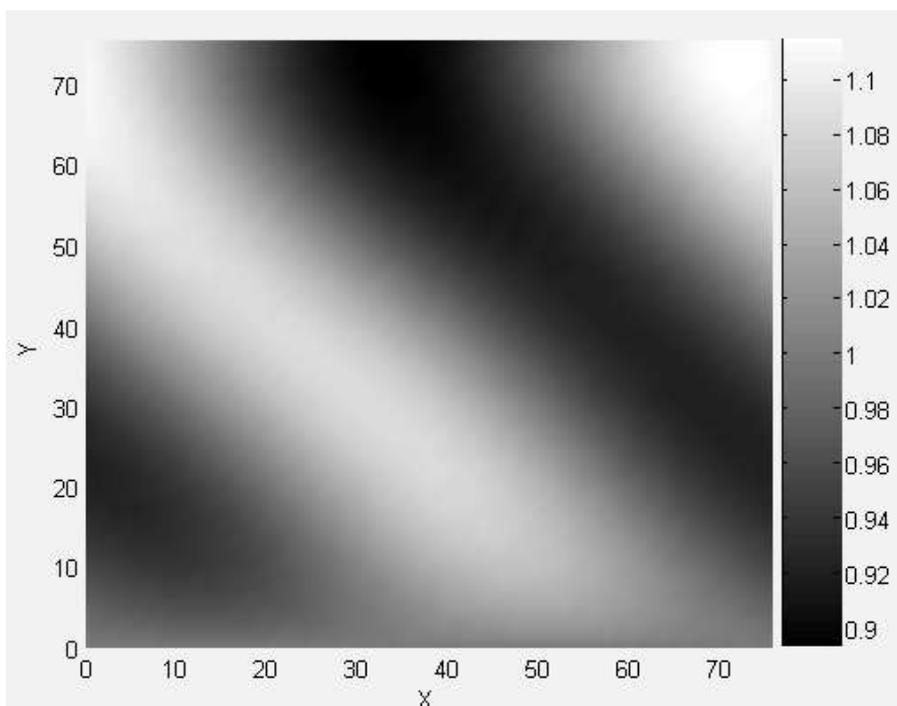


Рис. 4. Распределение концентрации П АВ в момент $t=2,5$ с

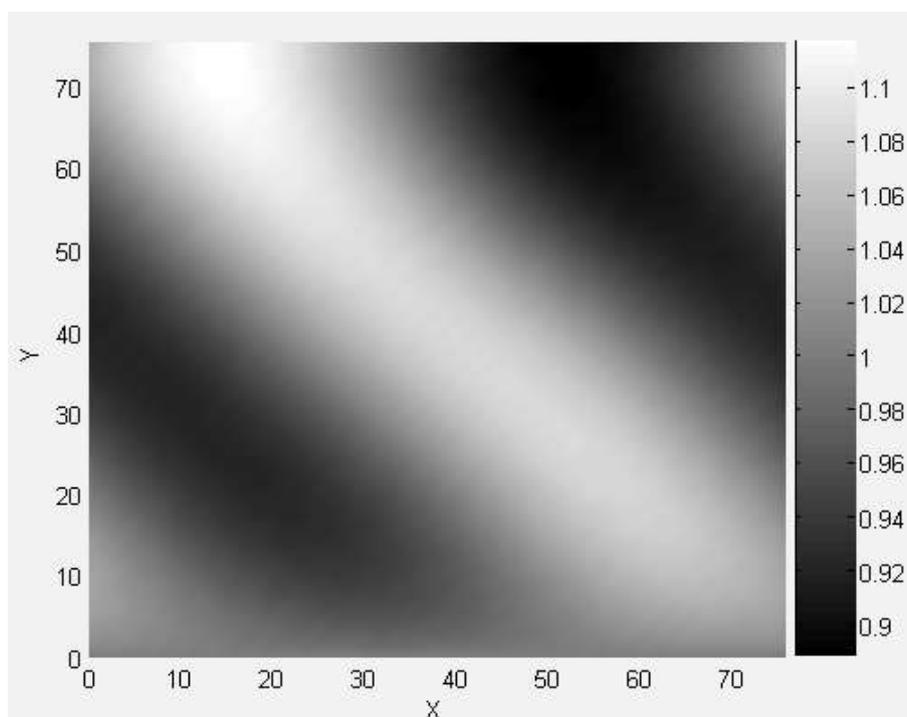


Рис. 5. Распределение концентрации ПАВ в момент $t=20$ с

Полученные в результате численного моделирования количественные и качественные характеристики соответствуют известным представлениям. Полученная численная схема позволяет обчислывать задачи такого класса и моделировать движение тонкой плёнки.

Библиографический список

1. **Пелиновский, Е.Н.** Пленки ПАВ на морской поверхности: препринт Института теплофизики СО АН СССР / Е.Н. Пелиновский, Т.Н. Талипова. 1990. № 219-90. – 42 с.
2. **Яненко, Н.Н.** Метод дробных шагов решения многомерных задач математической физики / Н.Н. Яненко. – Новосибирск: Наука, 1967. – 196 с.
3. **Катаева, Л.Ю.** Особенности дискретизации многомерных нелинейных задач. Наука и техника транспорта. 2008. № 4. С. 13–16.
4. **Катаева, Л.Ю.** Оценка эффективности итерационно-интерполяционного метода при решении двумерных уравнений гиперболического типа / Л.Ю. Катаева Д.А. Масленников // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. 2009. № 4. С. 9–17.

Дата поступления
в редакцию 08.02.2011

D.A. Maslennikov, L.Yu. Kataeva, O.E. Kurkina, A.A. Kurkin

MODELING THE MOVEMENT OF A THIN SLICK INDUCED BY PERIODICALLY EXTERNAL VELOCITY FIELD

The numeric simulation of the movement of the thin slick on the surface of the ocean is considered. Algorithm based on the iteration-interpolation method for modeling dynamics of thin slick induced by external velocity field. . Software system that implements this algorithm was developed.

Key words: thin slick, surface-active substances, ocean, pollution, the iteration-interpolation method, numerical simulation.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 519.72

В.А. Утробин

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ПЕРЦЕПТИВНОГО ПРОСТРАНСТВА. ПЕРСПЕКТИВА ПРИ БОЛЬШИХ УГЛАХ ЗРЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы построения перспективы в перцептивном пространстве с учетом его нелинейных свойств. Приводятся алгоритмы и примеры построения перспективы фасада объекта и системы объектов с использованием нелинейной проекционной поверхности, представленной на планигоне, с позиций теории активного восприятия изображений.

Ключевые слова: зрительное восприятие, информационная модель, нелинейная перспектива.

Хорошо известно, что зрительное восприятие отдельного объекта вне его связи с окружающим пространством затруднено, если вообще возможно. Это связано с тем, что если объект не имеет окружения, то человек не имеет возможности сравнить его с другими объектами сцены и восприятие становится аконстантным [1]. Поэтому зрительное восприятие пространства и пространственных отношений реализуется в первую очередь, а само пространство при этом выполняет функцию глобальной (абсолютной) системы отсчета, в которой движется или находится как наблюдаемый объект, так и сам наблюдатель.

Установлено несоответствие результатов восприятия величин законам геометрической оптики (Евклид), т.е. зависимость между величиной изображения на сетчатке и видимой величиной предмета не является линейной. Аналогичное несоответствие наблюдается между формой изображения на сетчатке и кажущейся формой предмета при разных его положениях в пространстве (Р. Декарт). Эти несоответствия называются *константностью восприятия величины* (и формы). Явление константности восприятия (т.е. сохранение чего-либо в независимости от проекции на сетчатке) современные нейрофизиологи объясняют существованием так называемой психологической (перцептивной) перспективы. Такое сохранение, с точки зрения математики, связано с нелинейными преобразованиями в системе зрительного восприятия, обосновывающими нелинейную перспективу, интуитивно использующуюся в живописных рисунках.

Как средство – изображения, перспектива и живописный рисунок с натуры, служат общей цели. Однако пути, ведущие к достижению поставленной цели, для них различны. Построение перспективных изображений следует строгим геометрическим правилам. В рисунке же геометрические построения – вспомогательное, проверочное средство.

Если линейная перспектива – это «отвлеченные» геометрические построения, то перспективное построение живописного рисунка подчинено законам зрительного восприятия. Поэтому в теории перспективы выделяют две самостоятельные части – теорию линейной перспективы на основе проективной геометрии и физиологическую оптику, исследующую свет, зрение и пределы зрительного восприятия. Их несоответствие связано следующими причинами: замена двух глаз одним идеальным (циклопическим) глазом; замена двух зри-

тельных осей одним центральным лучом; замена сферической (почти сферической) поверхности сетчатки касательной к ней плоскостью. Более того, еще С.И. Вавилов отмечал, что живая особь нуждается в правильном представлении об окружающем пространстве и объектах в нем, а не в правильных оптических изображениях. И.М. Сеченов указывал, что глаз уже при первых встречах с внешним миром видит не образы на сетчатке, а причины, производящие эти образы. Например, размеры предметов, находящихся неподалеку от нас, несмотря на их движение и удаление, кажутся не меняющимися по размерам, и только в отношении очень далеких предметов мы замечаем, что они стали маленькими [2].

Цель работы – показать один из возможных способов коррекции изображения для систем технического зрения с использованием планигона как основного инструмента теории активного восприятия [3, 4] и базового утверждения [2]: *коррективы восприятия не являются случайными; они всегда закономерны и последовательны; для достижения сходства и правильности пространственной передачи на перспективных изображениях необходимо стремиться к наиболее верному воспроизведению образа восприятия, а не сетчаточного изображения.*

1. Способ координатной сетки

Простейшим геометрическим методом перспективных построений, разработанным в XV веке, является сетка квадратов. По современной классификации этот метод относится к разряду фронтальных перспектив, так как для его применения обязательно расположение картинной плоскости параллельно одной из фасадных сторон изображаемого объекта.

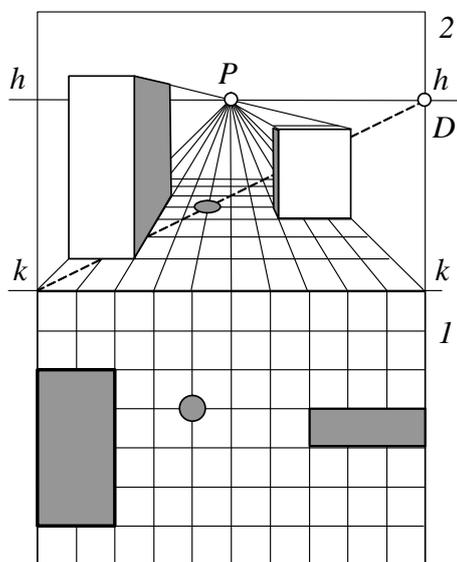


Рис. 1. Пример построения фронтальной перспективы

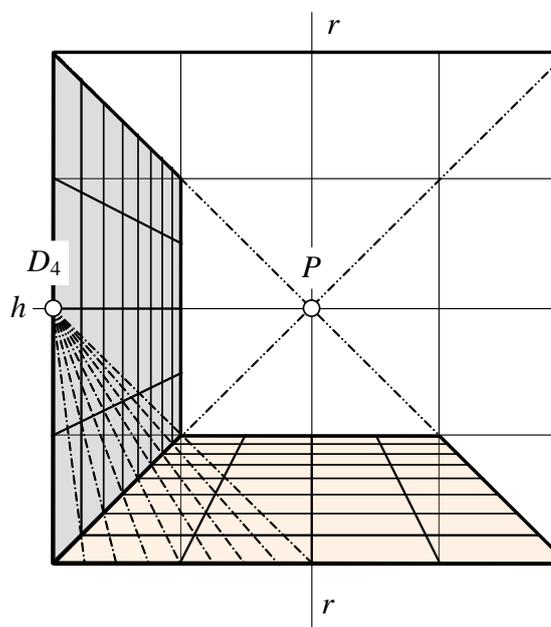


Рис. 2. Способ координатной сетки с использованием планигона

Порядок построения фронтальной перспективы следующий (рис. 1):

1. Имеется план местности I (вид сверху) с нанесенной на него сеткой. Необходимо знание положения точки зрения O относительно картинной плоскости и высоты линии горизонта hh (с главной точкой схода P).
2. В точку P сходятся все линии сетки, перпендикулярные картинной плоскости 2 с основанием картины kk .
3. От точки P по линии hh откладывается дистанционная точка D на расстоянии d , соответствующем удаленности наблюдателя от картинной плоскости.
4. Диагональ из точки D позволяет построить сетку квадратов на предметной плоскости, соответствующую сетке квадратов на плане.

5. После построения перспективы сетки квадратов в нее вписывается план объектов на местности с точным соблюдением перспективных сокращений. Фасад объекта (или объектов), параллельный картинной плоскости, сохраняется.

Усовершенствованным методом относительно сетки квадратов является способ построения при помощи перспективных масштабов координатной сетки (рис. 2). За оси координат принимаются: основание картины kk , на котором нанесен в натуральную величину масштаб широт; глубинная прямая с нанесенным на ней масштабом глубин; перпендикуляр (параллельный главной вертикали rr) к предметной плоскости, находящейся в плоскости картины, на котором отложен натуральный масштаб высот. С помощью главной точки схода P и дистанционной точки D_4 строится масштабная сетка на двух координатных плоскостях. Имея план изображаемой местности с объектами, можно быстро и правильно разместить в картинной плоскости все эти объекты. Поскольку планигон – сетка квадратов, то его использование в описанном методе максимально эффективно.

2. Подход к построению перспективы протяженного объекта

Для правильной передачи общего вида пространственно протяженных, имеющих большие угловые размеры объектов и максимального сходства с натурой выделяют следующие отклонения от правил линейной перспективы:

- плавное искривление прямых линий;
- использование нескольких точек схода для объективно параллельных линий;
- преувеличение проекционных размеров предметов дальнего плана.

Например, перспективное искривление горизонтальных линий можно наблюдать, встав

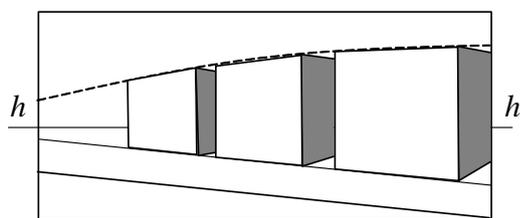


Рис. 3. Перспективные искривления горизонтальной прямой

перед протяженным фасадом здания против его центра. Если мысленно продлить линии карниза в обе стороны, то в перспективе такая прямая пересечет горизонт в двух диаметрально противоположных точках.

На рис. 3 показано перспективное искривление горизонтальной прямой, возникающее при соединении карнизов зданий равной высоты, расположенных вдоль прямой линии. Если же карнизу каждого из зданий поставить в соответствие прямую линию, то получим несколько точек схода. Поэтому искривлению прямых линий перспективных объектов можно поставить в соответствие использование нескольких точек схода.

Рассмотрим пример построения перспективы фасада здания (рис. 4) [2]. Для этого необходимо знать позицию наблюдателя относительно объекта, габариты объекта, план и положение проекционной поверхности, которая должна быть нелинейной. Пусть объект имеет высоту H . Положение наблюдателя O определяется углами зрения в плане, считая от оси, перпендикулярной к фасаду ($\beta_1 = 28^\circ$, $\beta_2 = 64^\circ$). Вертикальные углы на карниз здания равны $\alpha_1 = 16,5^\circ$, $\alpha_2 = 9^\circ$ (поскольку вертикальные углы зрения малы (менее 30°), то перспективные сокращения по вертикали незначительны и образующие проекционной поверхности – вертикальные прямые). Если расположить проекционную поверхность по дуге окружности A_1C , то получим перспективное изображение объекта, которое соответствует сетчаточному изображению (с высотой в перспективе $0,5H$, рис. 4, z). Проекция на вертикальную плоскость (как картинную) при расположении главной точки перспективы по середине угла зрения в плане на фасад объекта также будет совпадать с проекционным изображением на сферическую поверхность. Для естественной (художественной) передачи перспективных отношений с учетом нелинейных преобразований необходимо следу в плане A_1C поставить в соответствие новый след A_1B_0 . При этом положение точки B_0 находится из соотношения $\frac{OB_0}{OB_1} = \frac{h_B}{H}$, где

h_B – перспективная величина изображенной в картинной плоскости высоты $H = BB_1 = AA_1$. В приведенном примере отношение h_B/H равно 0,58; поэтому $OB_0 = 0,58OB_1$. Полученное положение проекционной поверхности позволяет определить проекционную величину основания фасада A_1B_0 и высоту h_B .

Анализ живописных полотен, проведенный в работе [2], показал:

1. Отклонение от правил линейной перспективы является не случайным, а выступает как отражение в рисунках объективных закономерностей зрительного восприятия.

2. Отклонение проекционной поверхности от нормального положения по отношению к лучу зрения показывает, что перспективные сокращения изменяются не прямо пропорционально увеличению расстояния до объекта, как это принято в линейной перспективе, а иначе: чем более величина такого отклонения в сторону объекта, тем менее перспективные сокращения.

3. Установлено, что форма и положение некоторой обобщенной проекционной поверхности (как усредненной на множестве проанализированных рисунков), представленной следом в плане для фасада объекта, расположенного параллельно горизонтальной координатной оси x , – часть окружности с точкой зрения O (позицией наблюдателя), расположенной по середине радиуса $R = 2r$, и центральным углом в 120° .

Таким образом, форма следа проекционной поверхности в плане – окружность радиусом R с центром в точке K , находящейся на расстоянии $r = R/2$ от точки O на координатной оси y , если фасад здания в плане параллелен оси x (рис. 5, а).

С позиций геометрии, во-первых, имеем часть правильного шестиугольника, составленного из двух правильных треугольников, для которых высота равна $\sqrt{3}$, если длина стороны равна двум единицам длины. В результате половина правильного треугольника – прямоугольный треугольник со сторонами 1, 2, $\sqrt{3}$.

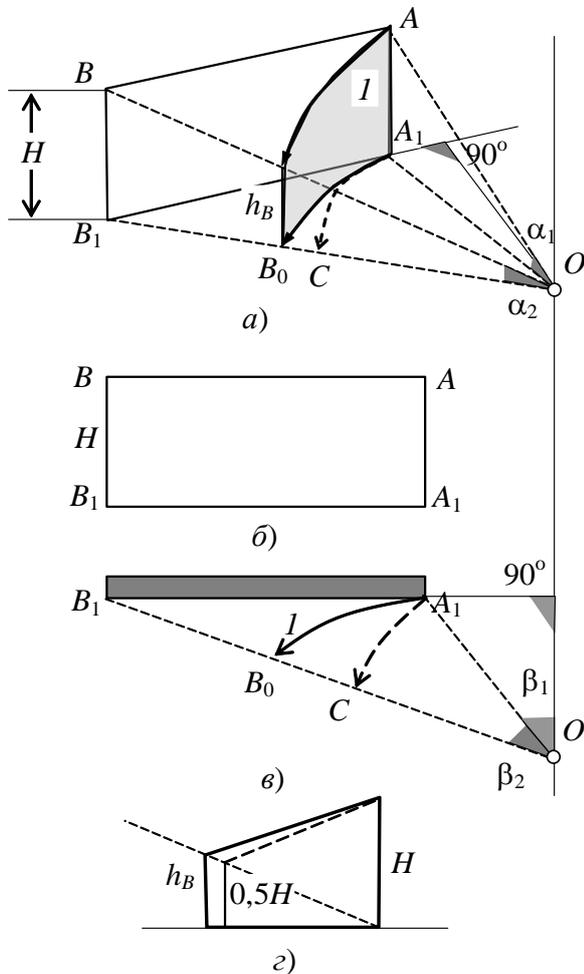


Рис. 4. Подход к построению перспективы фасада с использованием нелинейной проекционной поверхности I [2]:

а – общий вид в пространстве; б – фасад здания; в – план; г – перспектива фасада

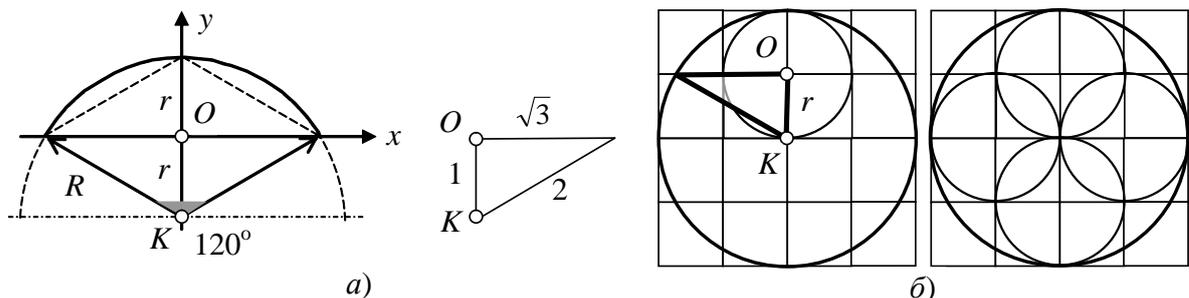


Рис. 5. К геометрии следа проекционной поверхности

Во-вторых, пара окружностей с центрами K и O , радиусами R и r , где $R = 2r$, образует систему формирования гипоциклоиды, которая в силу соотношения $r/R = 1/2$ вырождается в диаметр неподвижной окружности. Аналогичные конструкции можно наблюдать на планигоне (рис. 5, б). Поэтому планигон – удобный инструмент построения перспективных изображений.

3. Алгоритм формирования перспективы протяженного объекта

В соответствии с изложенным, алгоритм формирования перспективы следующий: имеем положение наблюдателя в произвольной точке O относительно объекта – фасада здания, параллельного горизонтальной оси x внешней системы координат, план и габариты объекта. Необходимо найти положение проекционной поверхности для следа A_1B_0 (в обозначениях по рис. 4).

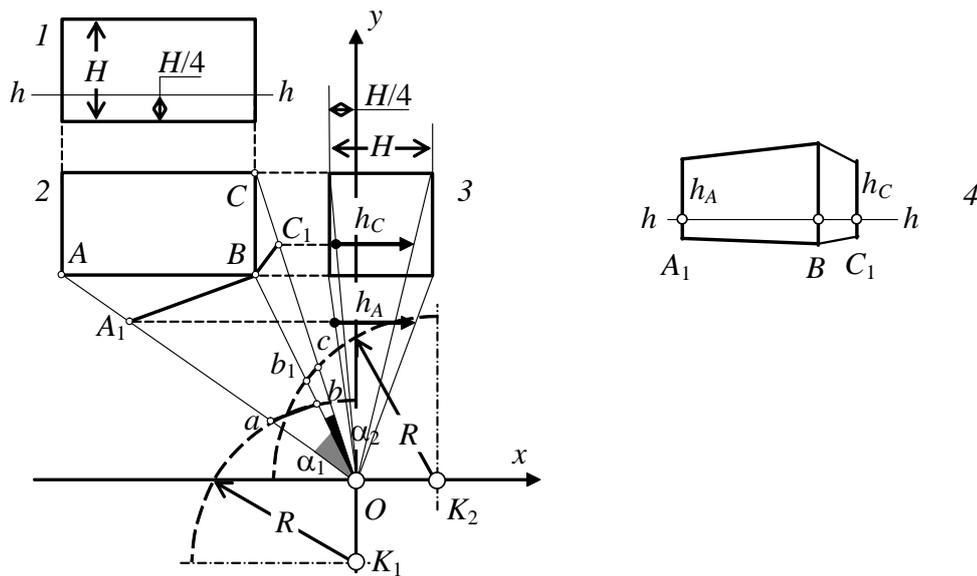


Рис. 6. Пример построения перспективы прямоугольного объекта:
1 – фасад; 2 – план по виду сверху; 3 – план по виду сбоку; 4 – перспектива

Порядок построения (рис. 6) [2]:

1. Из произвольной точки K_1 , находящейся на оси y , проходящей через позицию наблюдателя O , проводится дуга окружности радиусом R при условии, что точка O лежит на середине радиуса, а дуга пересекает лучи угла зрения α_1 на фасад объекта в плане.

В результате: хорда ab определяет положение картинной плоскости с ее следом A_1B , параллельным ab ; отрезок A_1B определяет размер фасада в перспективе.

2. Из произвольной точки K_2 , находящейся на оси x , проходящей через позицию O , проводится дуга окружности радиусом, для которого точка O лежит на середине радиуса (на рис. 6 использован тот же радиус R), при условии, что она пересекает лучи зрения угла α_1 на боковую стену объекта.

В результате: хорда b_1c определяет положение картинной плоскости с ее следом BC_1 , параллельным b_1c , а отрезок BC_1 – перспективный размер стены в плоскости, параллельной предметной.

3. Необходимые для построения перспективы высоты h_A , h_C видимых ребер объекта определяются с использованием плана по виду сбоку. При этом ребро объекта, проходящее через точку B , имеет натуральную высоту H .

Описанный алгоритм построения перспективы объекта, наблюдаемого с фасада, можно относительно просто реализовать на планигоне при решении задачи определения положения следа картинной плоскости (рис. 7).

Предположим, что из плана, представленного на планигоне (рис. 7, а), известно следующее: $OB = d$ – дистанция до вершины B объекта, имеющего длину L ; углы β_1, β_2 , определяющие угол зрения $\alpha = \beta_2 - \beta_1$.

Примем (для простоты вычислений) условие – объект «привязан» к верхней части планигона так, что вершина A принадлежит левому обрамлению планигона, а объект (на заданном уровне разрешения) упорядочен в верхней строке матрицы планигона. Кроме того, пусть $R = 2a$, $OK_1 = a$ (a – размер клетки планигона). В этом случае получаем: $AO = 5a$; $\operatorname{tg}\beta_2 = \frac{4}{3}$, $\beta_2 \approx 53,13^\circ$; $\operatorname{tg}\gamma_1 = \frac{3}{4}$, $\gamma_1 \approx 36,87^\circ$.

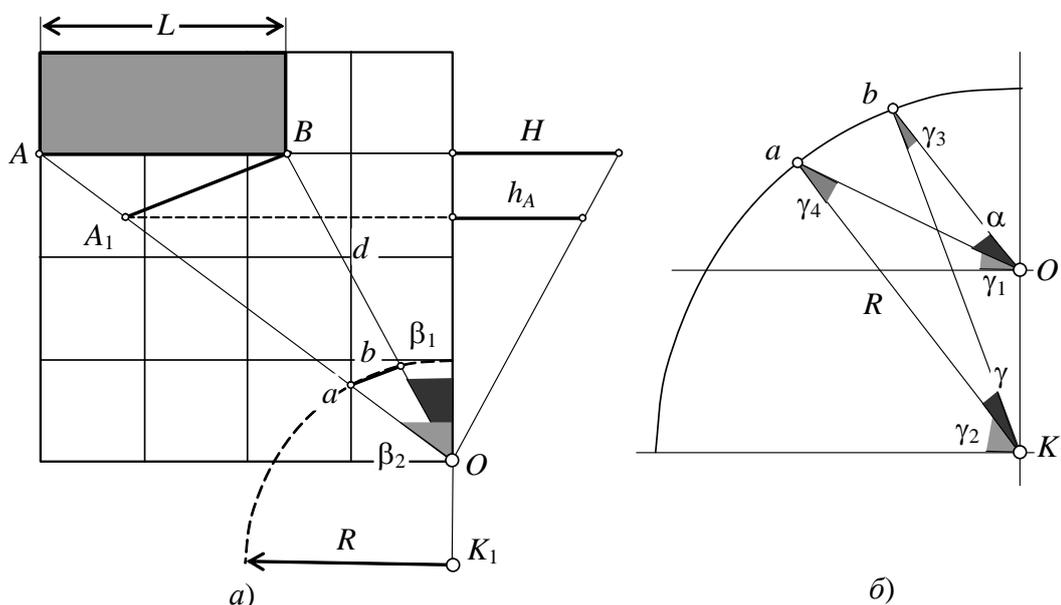


Рис. 7. Определение положения следа картинной плоскости на планигоне

Из треугольника aOK_1 в соответствии с теоремой синусов находим (рис. 7, б):

$$aO = R \frac{\cos\gamma_2}{\cos\gamma_1}; \sin\gamma_4 = \frac{a}{R} \cos\gamma_1 = 0,8 \frac{a}{R} = 0,4; \gamma_4 \approx 23,58^\circ; \gamma_2 \approx 60,45^\circ; aO = 1,233a.$$

Аналогично из треугольника bOK_1 получаем:

$$\sin\gamma_3 = \frac{a}{R} \cos(\gamma_1 + \alpha), \gamma_3 = \arcsin\left(\frac{a}{R} \cos(\gamma_1 + \alpha)\right); bO = R \frac{\cos(\alpha + \gamma_1 + \gamma_3)}{\cos(\alpha + \gamma_1)}.$$

Отсюда следует

$$OA_1 = \frac{aO}{bO} d = 0,6165d \frac{\cos(\alpha + \gamma_1)}{\cos(\alpha + \gamma_1 + \gamma_3)}.$$

Например: для $\alpha = 10^\circ$, получаем $OA_1 \approx 1,072d$; $\alpha = 30^\circ$, $OA_1 \approx 1,184d$; $\alpha = 45^\circ$, $OA_1 \approx 1,227d$.

Зная две стороны треугольника A_1BO – d и OA_1 , и угол α между ними, можно найти перспективную длину фасада объекта (в соответствии с теоремой косинусов):

$$A_1B = \sqrt{OA_1^2 + d^2 - 2d \cdot OA_1 \cos\alpha}.$$

Использование планигонов в роли предметной плоскости (с планом объекта) позволяет относительно просто решать измерительные задачи (на рассматриваемом уровне разрешения). Из треугольника ABO (см. рис. 7, а) получаем значение расстояния d в единицах масштаба a (размер клетки планигона) $d = \frac{3a}{\cos\beta_1}$. В силу теоремы синусов из этого же треуголь-

ника при условии, что размер объекта равен L , находим $d = L \frac{\sin \gamma_1}{\cos \alpha}$. Следовательно, единица

масштаба планигона равна $a = \frac{L \cos \beta_1 \sin \gamma_1}{3 \sin \alpha} = \frac{L \cos \beta_1 \cos(\alpha + \beta_1)}{3 \sin \alpha}$. Поскольку объект «привязан» к обрамлению планигона и выполняется условие $\sin \gamma_1 = 0,6 = \text{const}$, то $a = \frac{L \cos \beta_1}{5 \sin \alpha}$, а

так как $\beta_1 = 90^\circ - \alpha - \gamma_1 = 53,13^\circ - \alpha$, имеем

$$a = \frac{L \sin(\alpha + 53,13^\circ)}{5 \sin \alpha}. \quad (1)$$

Пример 1. Пусть $\alpha = 30^\circ$; в этом случае $a = 0,368L$. Если $L = 100\text{м}$, то $a = 36,8\text{м}$, а на планигоне объект размером L займет 2,72 доли от общей длины планигона (допустимо решить и обратную задачу: зная масштаб на планигоне, можно получить оценку длины объекта L из (1)).

Пример 2. Пусть длина объекта L кратна (клеточной) длине планигона, т.е. $L = \{3a, 2a, a\}$. Тогда соответствующие углы по курсу равны $\beta_1 = \text{arctg}\{1/3, 2/3, 1\} = \{18,43^\circ; 33,69^\circ; 45^\circ\}$ (на рассматриваемом уровне разрешения). Этим углам соответствуют углы зрения $\alpha = \{34,7^\circ; 19,44^\circ; 8,13^\circ\}$. В результате масштаб на планигоне изменяется в соответствии с правилом (при фиксированном размере объекта L) $a = \{0,333L; 0,5L; L\}$. Отсюда следует, что для быстрой оценки необходимых параметров удобны курсовые углы $\beta_1 = \{33,69^\circ; 45^\circ\}$. Однако при этом существенно изменяются расстояния до объекта $d = \{3,61L; 4,24L\}$.

4. Перспективные построения системы объектов

Одно из основных требований построения перспективы ансамбля – это не только правильность перспективного построения отдельных объектов, но и соблюдение пространственных соотношений, определяющих целостность восприятия пропорций, размеров и расположения окружающих сооружений. В работе [2] по результатам анализа живописных полотен и рисунков с натуры улиц, площадей, интерьеров установлены следующие закономерности (рис. 8):

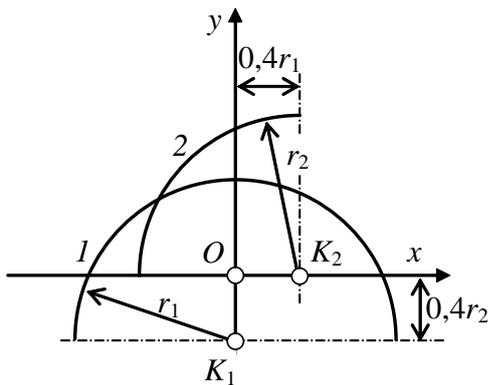


Рис. 8. Проекционные поверхности 1, 2 в плане

- проекционные поверхности 2 – дуги окружностей, центр которых K_2 лежит на оси x , а точка O делит радиус окружности в отношении $2/3$.

Отметим, что кривизна проекционных поверхностей выше, чем у поверхностей, используемых при построении перспективы одиночного объекта. В работе [2] утверждается, что соотношение $2/3$ в отличие от половинного деления – $1/2$ позволяет более реалистично строить перспективы замкнутых объемов (в частности, объекты заднего плана зрительно приближаются к наблюдателю).

Алгоритм построения перспективы ансамбля объектов рассмотрим на примере по ра-

- для построения перспективы необходимы три проекционные поверхности в плане; одна из них 1 служит для определения проекционных размеров горизонтальных отрезков, две другие 2 (на рис. 8 показана только одна из них) – для определения перспективных сокращений высот фасадов;

- проекционные поверхности 1 – дуги окружностей с центрами на координатной оси y , на которой находится позиция наблюдателя с точкой зрения O , делящей радиус в отношении $2/3$; при этом между точкой O и центром окружности K_1 находится меньшая часть радиуса;

боте [2]. Необходимо построить перспективу площади прямоугольной формы (в плане), окруженной с трех сторон объектами равной высоты (рис. 9). Имеем позицию наблюдателя с точкой зрения O , угол зрения α и высоту объектов H . Порядок построения:

1. Строятся проекционные поверхности с центрами K_1 и K_2 с делением радиусов r_1, r_2 в отношении $2/3$ (рис. 9, б). В результате определяются положения следов картинных плоскостей: A_0B_0 ; B_0C_0 ; C_0D_0 , видимых наблюдателем с позиции O . Порядок их нахождения следующий: отрезок A_0B_0 параллелен хорде ab проекционной поверхности с центром K_2 ; отрезок B_0C_0 параллелен хорде bc проекционной поверхности с центром K_1 ; длины отрезков определяются углами AOB , BOC , COD соответственно.

2. Хорды A_0b_1 , D_0c задают размеры боковых сторон площади, видимых наблюдателем, и используются при построении перспективы площади (рис. 9, в). Дальняя сторона BC площади определяется размером отрезка B_0C_0 (а не b_1c), обеспечивая тем самым эффект увеличения размеров объектов заднего плана.

3. Проекции высот H_A, H_B, H_C, H_D определяются с помощью разреза площади (рис. 9, а) с точкой схода O и линией горизонта hh (если она необходима).

4. Имея все необходимые размеры – длины и высоты, строится перспектива (рис. 9, в).

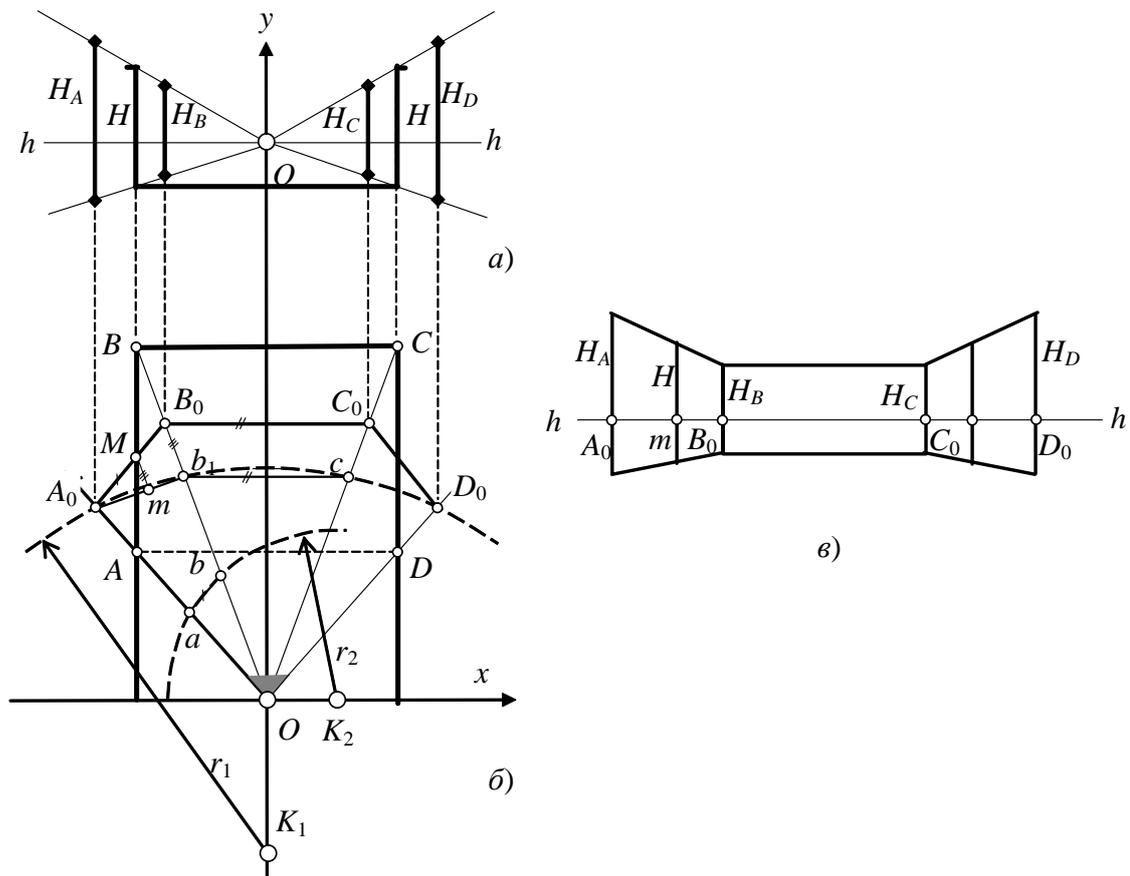


Рис. 9. Построение перспективы площади:

а – разрез площади и формирование высот в зависимости от угла зрения;
б – план площади; *в* – перспектива площади с объектами равных высот

Аналогично можно построить перспективу улицы, помещения, тоннеля и других замкнутых пространств.

Наша задача – формализовать процесс построения перспективы с использованием планигона как инструмента. Для этого рассмотрим два варианта построения проекционных поверхностей: B_1 – вариант половинного деления радиусов r_1, r_2 ; B_2 – вариант деления в отношении $2/3$.

В₁. На планигоне зададим систему координат (x, y) и позицию O наблюдателя (рис. 10,а). Построим следы трех проекционных поверхностей с центрами K_{11}, K_{12}, K_{13} и радиусами $r_{11} = 2a, r_{12} = 3a/2, r_{13} = a$, где a – длина стороны планигона. Уравнения соответствующих окружностей:

$$\begin{cases} (x - \frac{a}{2})^2 + (y + a)^2 = 4a^2; \\ (x - \frac{a}{2})^2 + (y + \frac{3}{4}a)^2 = \frac{9}{4}a^2; \\ (x - \frac{a}{2})^2 + (y + \frac{a}{2})^2 = a^2. \end{cases} \quad (2)$$

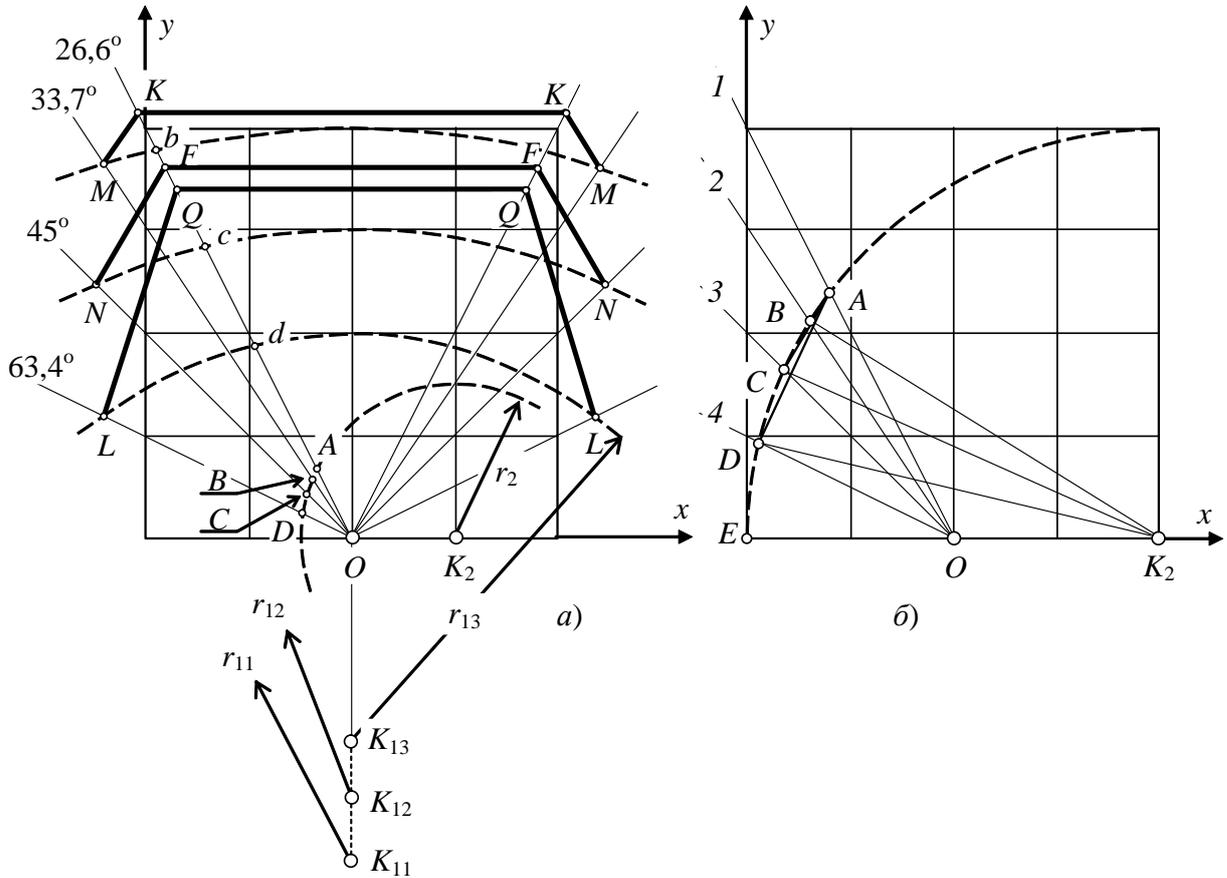


Рис. 10. Следы картинных плоскостей на планигоне по варианту **В₁**

Зададим четыре луча, исходящие из точки O под углами, определяющие три угла зрения наблюдателя: $\pm 26,6^\circ; \pm 33,7^\circ; \pm 45^\circ; \pm 63,4^\circ$, и представленные уравнениями:

$$\begin{cases} 2x + y = a; \\ 2x + \frac{4}{3}y = a; \\ 2x + 2y = a; \\ 2x + 4y = a. \end{cases} \quad (3)$$

Координаты точек L, N, M – результат пересечения соответствующих прямых из (2), (3):

$$L(-0,1a; 0,3a); N(\frac{7 - \sqrt{63}}{8}a; \frac{\sqrt{63} - 3}{8}a) \approx N(-0,12a; 0,62a);$$

$$M(\frac{25 - 8\sqrt{12}}{26}a; \frac{6\sqrt{12} - 9}{13}a) \approx M(-0,1a; 0,91a),$$

определяют положение начала следов боковых картинных плоскостей, наблюдаемых под углами: $7,1^\circ$; $18,4^\circ$; $36,8^\circ$.

Примечание. С точностью до десятых допустимо принять, что точки L, N, M (аналогично для правой части относительно позиции наблюдателя) находятся на одном уровне по оси x с координатой $-0,1a$.

Для нахождения координат точек K, F, Q – концов боковых картинных плоскостей (в плане) построим след проекционной поверхности с центром K_2 и уравнением

$$(x - a)^2 + y^2 = a^2, \quad (4)$$

представленном на рис. 10, б в упрощенном виде (относительно рис. 10, а).

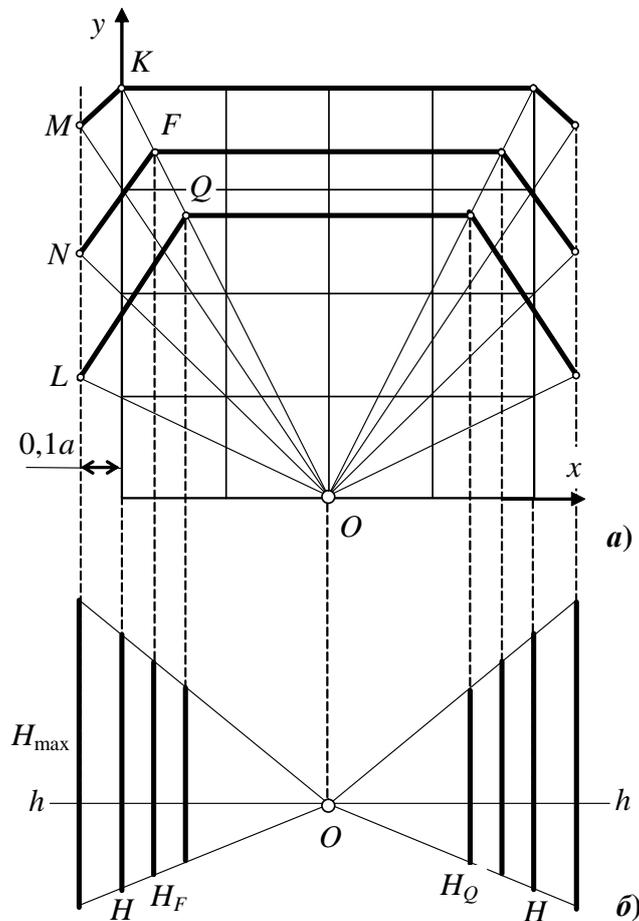


Рис. 11. Следы картинных плоскостей на планигоне по варианту B_2

Пусть α – центральный угол, под которым видны хорды дуг AB, AC, AD , а γ – угол наклона этих хорд к оси x . Тогда координаты точек A, B, C, D , длины хорд и углы α, γ , определяемые из (3), (4), равны:

$$A\left(\frac{a}{5}; \frac{3a}{5}\right); \quad B\left(\frac{17-2\sqrt{43}}{26}a; \frac{6\sqrt{43}-12}{52}a\right) \approx B(0,15a; 0,52a);$$

$$C\left(\frac{3-\sqrt{7}}{4}a; \frac{\sqrt{7}-1}{4}a\right) \approx C(0,09a; 0,41a); \quad D\left(\frac{9-2\sqrt{19}}{10}a; \frac{\sqrt{19}-2}{10}a\right) \approx D(0,03a; 0,24a);$$

$$AB \approx 0,09a; \quad AC \approx 0,22a; \quad AD \approx 0,40a;$$

$$\alpha(AB) \approx 5,2^\circ; \quad \alpha(AC) \approx 12,6^\circ; \quad \alpha(AD) \approx 23,2^\circ;$$

$$\gamma(AB) \approx 55,7^\circ; \quad \gamma(AC) \approx 59,4^\circ; \quad \gamma(AD) \approx 64,7^\circ.$$

Зная значения углов γ , определяющих угловые коэффициенты соответствующих линий, содержащих отрезки MK, NF, LQ , определяем координаты необходимых точек:

$$K(-0,02a; 1,03a); \quad F(0,05a; 0,90a); \quad Q(0,12a; 0,76a),$$

а также координаты точек b, c, d и длины хорд, соответствующих размерам боковых картинных плоскостей (в плане):

$$b(0,028a; 0,944a); \quad c(0,146a; 0,708a); \quad d(0,264a; 0,472a),$$

$$Mb \approx 0,137a; \quad Nc \approx 0,278a; \quad Ld \approx 0,403a.$$

Длины горизонтальных следов картинных плоскостей составляют:

$$KK = 1,04a \approx a; \quad FF = 0,90a; \quad QQ = 0,76a.$$

В₂. Для варианта деления радиусов проекционных поверхностей в отношении $(0,6 + 0,4)r$, где r может быть равен $r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_2$, поступаем аналогично рассмотренному ранее подходу. В результате получаем:

1) координаты необходимых точек:

$$L(-0,07a; 0,28a); \quad N(-0,1a; 0,6a); \quad M(-0,09a; 0,89a); \quad A(0,22a; 0,57a); \quad B(0,17a; 0,50a);$$

$$C(0,1a; 0,4a); \quad D(0,03a; 0,23a); \quad Q(0,16a; 0,68a); \quad F(0,08a; 0,85a); \quad K(0; a); \quad b(0,03a; 0,93a);$$

$$c(0,15a; 0,70a); \quad d(0,27a; 0,46a);$$

2) углы α и γ :

$$\alpha(AB) \approx 5,7^\circ, \quad \alpha(AC) \approx 14,1^\circ, \quad \alpha(AD) \approx 26,4^\circ; \quad \gamma(AB) \approx 50,3^\circ, \quad \gamma(AC) \approx 54,4^\circ, \quad \gamma(AD) \approx 60,5^\circ;$$

3) длины отрезков:

$$AB \approx 0,09a, \quad AC \approx 0,22a, \quad AD \approx 0,40a, \quad Mb \approx 0,132a, \quad Nc \approx 0,270a, \quad Ld \approx 0,380a,$$

$$KK = a, \quad FF = 0,84a, \quad QQ = 0,68a.$$

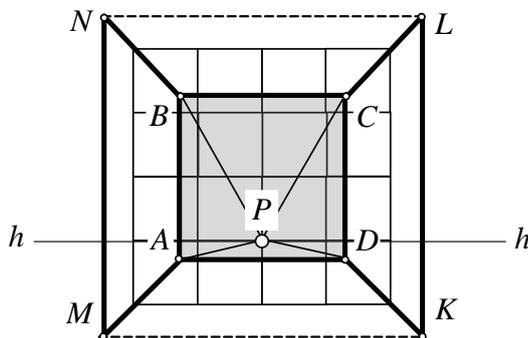


Рис. 12. Панорама ансамбля

Высоты по вариантам определяются одинаково по способу, показанному на рис. 9, а (рис. 11, б): если координаты точек M, N, L по оси x одинаковы и равны $-0,1a$, параметр a равен высоте объектов H , то максимальная высота на уровне точек M, N или L при разных углах зрения находится из соотношения

$$\frac{H_{\max}}{H} = \frac{0,6a}{0,5a}$$

и равна $H_{\max} = 1,2H$.

Если задана линия горизонта hh , то ее уровень относительно основания картины соответствует

ет $h(H_{\max}) = 1,2h(H)$.

На рис. 12 показана панорама ансамбля объектов, а в табл. 1 приведены необходимые ее размеры.

Таблица 1

Параметры панорамы

Угол зрения	Вариант	MK	MN	AD	AB
$\pm 33,7^\circ$	B_1	$1,26a$	$1,2H$	a	H
	B_2	$1,26a$	$1,2H$	a	H
$\pm 45^\circ$	B_1	$1,46a$	$1,2H$	$0,9a$	$0,9H$
	B_2	$1,39a$	$1,2H$	$0,84a$	$0,84H$
$\pm 63,4^\circ$	B_1	$1,56a$	$1,2H$	$0,76a$	$0,76H$
	B_2	$1,44a$	$1,2H$	$0,68a$	$0,68H$

Из сопоставления способов следует, что при относительно малом угле зрения $\pm 33,7^\circ$, допустимо использовать любой из способов. Тем не менее, при увеличении угла зрения второй способ наделен эффектом относительно большего приближения к наблюдателю картинной плоскости заднего плана. При этом размеры боковых «стен» перспективы не зависят от

выбора способа (с точностью до десятых). В результате панорама, реализованная по второму способу (при меньших размерах по оси x), дает больше информации о той части пространства, которая находится «по курсу» движения наблюдателя. Поэтому, используя изложенную методику построения перспективы, можно строить с малыми вычислительными затратами необходимые модели внешнего окружения при движении наблюдателя.

Библиографический список

1. **Литвак, И.И.** Основы построения аппаратуры отображения в автоматизированных системах / И.И. Литвак, Б.Ф. Ломов, И.Е. Соловейчик. – М.: Сов. радио, 1975. – 352 с.
2. **Федоров, М.В.** Рисунок и перспектива / М.В. Федоров. – М.: Искусство, 1960. – 209 с.
3. **Утробин, В.А.** Информационные модели системы зрительного восприятия для задач компьютерной обработки изображений: учеб. пособие / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2001. – 234 с.
4. **Утробин, В.А.** Компьютерная обработка изображений: Информационные модели этапа понимания: учеб. пособие / В.А. Утробин; НГТУ. – Н. Новгород, 2006. – 247 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A. Utrobin

INFORMATION MODEL OF PERCEPTUAL SPACE. PROSPECT AT THE HIGH ANGLES OF VISION

Considered questions of prospect construction in perceptual space, given its nonlinear properties. Algorithms and examples of prospect construction of an object facade and system of objects with use of the nonlinear projective surface, presented on planigons, from positions of the theory of active perception of images are resulted.

Key words: Visual perception, informational model, nonlinear prospect.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕНЕНИЯ ПОРЯДКОВ КРИВЫХ И ПОВЕРХНОСТЕЙ БЕЗЬЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предлагается новый метод изменения порядков полиномов кривых и поверхностей Безье, сводящийся к единой формуле как для увеличения, так и уменьшения размерностей характеристической сети.

Ключевые слова: кривая, поверхность, Безье, полином, узловая сеть.

Широкое распространение в практике конструирования сложных линий и поверхностей получили линии и поверхности Безье, обладающие большой гибкостью, простотой модификации и свойством принадлежности выпуклой оболочке массива узловых точек. Одной из важных операций модификации объекта Безье является изменение числа точек, определяющих его конфигурацию. Увеличение этого числа позволяет повысить гибкость объекта, а уменьшение без изменения формы объекта – понизить сложность его модели и трудоемкость ее использования.

1. Изменение порядка линии Безье

Начнем рассмотрение проблемы с однопараметрической векторной модели *линии Безье*, описываемой в пространстве R^r размерности $r \in \{2, 3\}$ следующими разложениями:

- по узловым точкам $\mathbf{u}_0 \div \mathbf{u}_n \in R^r$, составляющим матрицу $\mathbf{U}_n = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \dots \ \mathbf{u}_n] \in R^{r \times (n+1)}$:

$$\mathbf{p}(t) = \sum_{i=0}^n b_{ni}(t) \mathbf{u}_i = \mathbf{U}_n \mathbf{B}_n(t) \quad \forall t \in [0, 1], \quad (1)$$

где $b_{ni}(t) = C_n^i t^i (1-t)^{n-i}$ — весовые функции базиса Бернштейна, составляющие вектор-столбец $\mathbf{B}_n(t) = [b_{n0}(t) \ b_{n1}(t) \ \dots \ b_{nn}(t)]^T$;

- по базисным функциям параметра, составляющим вектор-столбец $\mathbf{T}_n(t) = [1 \ t \ \dots \ t^n]^T$:

$$\mathbf{p}(t) = \sum_{i=0}^n \mathbf{s}_i t^i = \mathbf{S}_n \mathbf{T}_n(t) \quad \forall t \in [0, 1], \quad (2)$$

где $\mathbf{S}_n = [\mathbf{s}_0 \ \mathbf{s}_1 \ \dots \ \mathbf{s}_n] \in R^{r \times (n+1)}$ — матрица параметрических коэффициентов $\mathbf{s}_0 \div \mathbf{s}_n \in R^r$;

- по узловым точкам и базисным функциям параметра:

$$\mathbf{p}(t) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n h_{ij} \mathbf{u}_i t^j = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \mathbf{T}_n(t) \quad \forall t \in [0, 1], \quad (3)$$

где $\mathbf{H}_n \in R^{(n+1) \times (n+1)}$ — верхняя треугольная матрица весовых коэффициентов

$$h_{ij} = (-1)^{j-i} C_n^j C_n^i \quad \forall 0 \leq i \leq j \leq n, \quad (4)$$

связанная с вектором $\mathbf{B}_n(t)$ и матрицей \mathbf{S}_n следующими соотношениями:

$$\mathbf{B}_n(t) = \mathbf{H}_n \mathbf{T}_n(t), \quad \mathbf{S}_n = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n. \quad (5)$$

Модификация характеристической полилинии (ХП) $\mathbf{u}_0 \mathbf{u}_1 \dots \mathbf{u}_n$ означает проведение операций с ее вершинами: перемещения имеющихся, *добавления* новых и *удаления* лишних. После каждой операции кривая Безье перестраивается по (1). Если перенос узловой точки не

вызывает затруднений (это можно сделать ручным вводом ее координат или вектора переноса, либо захватом и перетаскиванием мышью), то добавление или удаление вершин ХП влечет изменение порядка полинома до $n' \neq n$ и новые размер и состав узловой матрицы $\mathbf{U}'_{n'}$.

Несомненный научный интерес представляет такое изменение порядка линии Безье, при котором ее форма остается неизменной, т. е. $\mathbf{p}'(t) = \mathbf{p}(t)$. В литературе по компьютерной геометрии и графике дается решение лишь одной из двух названных задач изменения порядка — только *увеличения* и только на единицу, т. е. $n' = n + 1$. В [1] предлагается умножить сумму (1) на тождество $(t + 1 - t) \equiv 1$, формально инкрементирующее степень полинома, и привести слагаемые к виду с весовыми функциями $n + 1$ -й степени $C_{n+1}^i t^i (1-t)^{n+1-i}$, $i \in [0, n + 1]$. В результате не совсем простых преобразований получается следующий алгоритм инкрементирования размера характеристической полилинии:

$$\mathbf{u}'_0 = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}'_i = \frac{i}{n+1} \mathbf{u}_{i-1} + \left(1 - \frac{i}{n+1}\right) \mathbf{u}_i \quad \forall i = \overline{1, n}, \quad \mathbf{u}'_{n+1} = \mathbf{u}_n. \quad (6)$$

В [2] этот же результат приведен без вывода. Но ни в одном из этих уважаемых источников не исследованы свойства полученной линии $\mathbf{p}'(t)$.

Ключевым моментом разрабатываемого нового алгоритма является тот факт, что *реальная* степень полинома $\mathbf{p}'(t) = \mathbf{s}'_0 + \mathbf{s}'_1 t + \dots + \mathbf{s}'_{n+1} t^{n+1}$, повторяющего форму полинома (2), равна n , а не $n + 1$, так же, как, например, реальная степень полинома $1 + 2t + 0t^2$ равна одному, а не формально двум. Действительно, нулевая разность векторных полиномов $\mathbf{p}'(t) - \mathbf{p}(t)$, равная

$$(\mathbf{s}'_0 - \mathbf{s}_0) + (\mathbf{s}'_1 - \mathbf{s}_1)t + \dots + (\mathbf{s}'_n - \mathbf{s}_n)t^n + \mathbf{s}'_{n+1}t^{n+1} = \mathbf{O}_{r,1}$$

на всем непрерывном интервале $t \in [0, 1]$, возможна лишь при $\mathbf{s}'_i = \mathbf{s}_i \quad \forall i \in [0, n]$ и $\mathbf{s}'_{n+1} = \mathbf{O}_{r,1}$. Здесь и далее $\mathbf{O}_{M,N}$ обозначает нулевую $M \times N$ -матрицу. Таким образом, связав векторы параметрических коэффициентов $\mathbf{S}_n = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n$ и $\mathbf{S}_{n+1} = \mathbf{U}'_{n+1} \mathbf{H}_{n+1}$ зависимостью $\mathbf{S}_{n+1} = [\mathbf{S}_n \quad \mathbf{O}_{r,1}]$ и вычислив по (4) невырожденные матрицы весовых коэффициентов \mathbf{H}_n и \mathbf{H}_{n+1} , получим вектор вершин новой характеристической полилинии размера $n + 1$:

$$\mathbf{U}'_{n+1} = [\mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \quad \mathbf{O}_{r,1}] \mathbf{H}_{n+1}^{-1} = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \mathbf{K}_{n,n+1}, \quad (7)$$

где $\mathbf{K}_{n,n+1} = \mathbf{E}_{n+1,n+2} \mathbf{H}_{n+1}^{-1}$ — верхний $(n + 1) \times (n + 2)$ -блок матрицы \mathbf{H}_{n+1}^{-1} . Здесь и далее $\mathbf{E}_{M,N}$ обозначает $M \times N$ -матрицу нулей с $\min\{M, N\}$ единицами на главной диагонали.

Простота полученного матричного решения несравнима с трудоемким в выводе и относительно сложным в программировании циклическим алгоритмом (6). А естественное обобщение формулы (7) на характеристическую полилинию *произвольного* размера $n' > n$:

$$\mathbf{U}'_{n'} = [\mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \quad \mathbf{O}_{r,n'-n}] \mathbf{H}_{n'}^{-1} = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \mathbf{K}_{n,n'}, \quad (8)$$

где $\mathbf{K}_{n,n'} = \mathbf{E}_{n+1,n'+1} \mathbf{H}_{n'}^{-1}$, способное увеличить порядок линии Безье сразу на $n' - n \geq 2$ единиц, вообще нигде не рассматривалось, хотя можно было потрудиться и получить аналогичный (6) алгоритм путем умножения (1) на $(t+1-t)^{n'-n}$ и сборки слагаемых с весовыми функциями $C_{n'}^i t^i (1-t)^{n'-i}$.

Пример 1. Проиллюстрируем работу методов (7), (8) увеличения порядка линии Безье без изменения ее формы на трех задачах.

1. Преобразуем по (7) двухзвенную ХП $\mathbf{u}_0 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2$ в трехзвенную $\mathbf{u}'_0 \mathbf{u}'_1 \mathbf{u}'_2 \mathbf{u}'_3$ (рис. 1, а) с помощью матриц \mathbf{H}_2 и \mathbf{H}_3 , элементы которых вычислены по (4):

$$\mathbf{H}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_3 = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 \\ 0 & 3 & -6 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_3^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1/3 & 2/3 & 1 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{2,3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1/3 & 2/3 & 1 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_2 \mathbf{K}_{2,3} = \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 2/3 & 2/3 & 0 \\ 0 & 0 & 1/3 & 1 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{u}'_0 \ \mathbf{u}'_1 \ \mathbf{u}'_2 \ \mathbf{u}'_3] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2] \mathbf{H}_2 \mathbf{K}_{2,3},$$

$$\mathbf{u}'_0 = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}'_1 = \frac{1}{3} \mathbf{u}_0 + \frac{2}{3} \mathbf{u}_1, \quad \mathbf{u}'_2 = \frac{2}{3} \mathbf{u}_1 + \frac{1}{3} \mathbf{u}_2, \quad \mathbf{u}'_3 = \mathbf{u}_2.$$

2. Преобразование по (7) трехзвенной ХП $\mathbf{u}_0 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_3$ в четырехзвенную $\mathbf{u}'_0 \mathbf{u}'_1 \mathbf{u}'_2 \mathbf{u}'_3 \mathbf{u}'_4$ (рис. 1, б) выполним с помощью матриц \mathbf{H}_3 и \mathbf{H}_4 :

$$\mathbf{H}_4 = \begin{bmatrix} 1 & -4 & 6 & -4 & 1 \\ 0 & 4 & -12 & 12 & -4 \\ 0 & 0 & 6 & -12 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 4 & -4 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_4^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1/4 & 1/2 & 3/4 & 1 \\ 0 & 0 & 1/6 & 1/2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{3,4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1/4 & 1/2 & 3/4 & 1 \\ 0 & 0 & 1/6 & 1/2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_3 \mathbf{K}_{3,4} = \begin{bmatrix} 1 & 1/4 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3/4 & 1/2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/2 & 3/4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/4 & 1 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{u}'_0 \ \mathbf{u}'_1 \ \mathbf{u}'_2 \ \mathbf{u}'_3 \ \mathbf{u}'_4] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \mathbf{u}_3] \mathbf{H}_3 \mathbf{K}_{3,4},$$

$$\mathbf{u}'_0 = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}'_1 = \frac{1}{4} \mathbf{u}_0 + \frac{3}{4} \mathbf{u}_1, \quad \mathbf{u}'_2 = \frac{1}{2} \mathbf{u}_1 + \frac{1}{2} \mathbf{u}_2, \quad \mathbf{u}'_3 = \frac{3}{4} \mathbf{u}_2 + \frac{1}{4} \mathbf{u}_3, \quad \mathbf{u}'_4 = \mathbf{u}_3.$$

Результаты решения обеих задач полностью совпадают с (6).

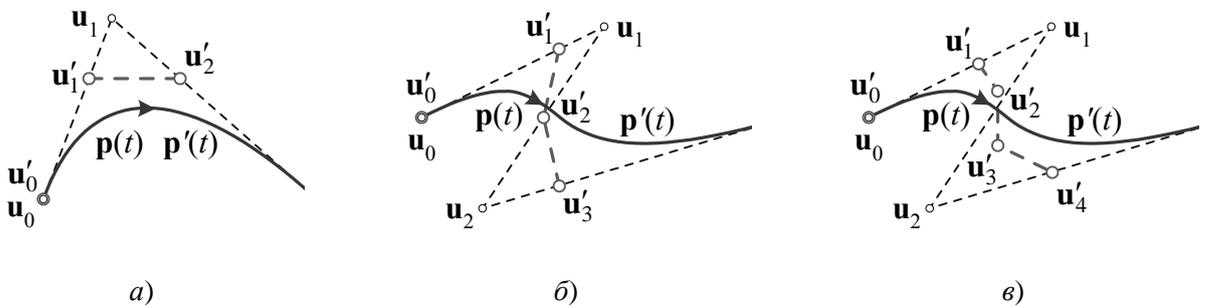


Рис. 1. Увеличение порядков кривых Безье

3. Создадим по (8) пятизвенную ХП $\mathbf{u}'_0 \mathbf{u}'_1 \mathbf{u}'_2 \mathbf{u}'_3 \mathbf{u}'_4 \mathbf{u}'_5$ из трехзвенной $\mathbf{u}_0 \mathbf{u}_1 \mathbf{u}_2 \mathbf{u}_3$ (рис. 1, в) с помощью матрицы \mathbf{H}_5 :

$$\mathbf{H}_5 = \begin{bmatrix} 1 & -5 & 10 & -10 & 5 & -1 \\ 0 & 5 & -20 & 30 & -20 & 5 \\ 0 & 0 & 10 & -30 & 30 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & -20 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{H}_5^{-1} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{K}_{3,5} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0.2 & 0.4 & 0.6 & 0.8 & 1 \\ 0 & 0 & 0.1 & 0.3 & 0.6 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 1 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_3 \mathbf{K}_{3,5} = \begin{bmatrix} 1 & 0.4 & 0.1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0.6 & 0.3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0.6 & 0.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.1 & 0.4 & 1 \end{bmatrix}, \quad [\mathbf{u}'_0 \ \mathbf{u}'_1 \ \mathbf{u}'_2 \ \mathbf{u}'_3 \ \mathbf{u}'_4 \ \mathbf{u}'_5] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \mathbf{u}_3] \mathbf{H}_3 \mathbf{K}_{3,5},$$

$$\mathbf{u}'_0 = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}'_1 = \frac{4\mathbf{u}_0 + 6\mathbf{u}_1}{10}, \quad \mathbf{u}'_2 = \frac{\mathbf{u}_0 + 6\mathbf{u}_1 + 3\mathbf{u}_2}{10}, \quad \mathbf{u}'_3 = \frac{3\mathbf{u}_1 + 6\mathbf{u}_2 + \mathbf{u}_3}{10}, \quad \mathbf{u}'_4 = \frac{6\mathbf{u}_2 + 4\mathbf{u}_3}{10},$$

$$\mathbf{u}'_5 = \mathbf{u}_3.$$

Вот так вместо двух преобразований, поочередно выполняемых по (6), сразу создается шеститочечная характеристическая полилиния.

Операция *удаления* лишней вершины из полилинии $\mathbf{u}_0\mathbf{u}_1\dots\mathbf{u}_n$, состоящей из $n > 1$ отрезков, производится для уменьшения ее избыточного размера и исключения характеристических точек, слабо влияющих на форму линии Безье. Наименьшим влиянием обладает срединная точка \mathbf{u}_m с округленным до ближайшего целого числа номером $m = \langle n/2 \rangle$ (при нечетном n таких точек две — с номерами $\lfloor n/2 \rfloor$ и $\lceil n/2 \rceil$). Ее вес не превышает величины $b_{nm}(m/n)$, стремящейся к нулю при больших значениях n . Таким образом, центральные точки многозвенных ХП можно удалять почти безболезненно для формы линии Безье, которая в результате этой операции все же *изменяется*.

Возможность понижения порядка линии Безье *без изменения ее формы* определяется *реальной* степенью полинома n' , которая должна быть *меньше* формальной степени n , задаваемой числом звеньев ХП $\mathbf{u}_0\mathbf{u}_1\dots\mathbf{u}_n$. Примеры различия этих степеней дают совпадающие линии $p(t)=p'(t)$ на рис. 1, построенные на ХП разных размеров. Назовем разность формальной и реальной степеней полинома *дефектом степени* $d=n-n'$.

Дефект степени полинома равен числу нуль-векторных полиномиальных коэффициентов $\mathbf{s}_{n'+1}=\dots=\mathbf{s}_n=\mathbf{O}_{r,1}$ на правом конце матрицы $\mathbf{S}_n=\mathbf{U}_n\mathbf{H}_n$. Если расположение характеристических точек $\mathbf{u}_0 \div \mathbf{u}_n$ таково, что дефект степени $d > 0$, то *минимальная* ХП $\mathbf{u}'_0\mathbf{u}'_1\dots\mathbf{u}'_{n'}$ состоит из $n'=n-d$ звеньев, а $n'+1$ ее вершин находятся из уравнения $\mathbf{U}_n\mathbf{H}_n=[\mathbf{U}'_{n'}\mathbf{H}'_{n'} \quad \mathbf{O}_{r,d}]$ с использованием матрицы $\mathbf{G}_{n,n'}=\mathbf{H}_n\mathbf{E}_{n+1,n'+1}$ — левого $(n+1)\times(n'+1)$ -блока матрицы \mathbf{H}_n :

$$\mathbf{U}'_{n'}=\mathbf{U}_n\mathbf{G}_{n,n'}\mathbf{H}'_{n'}{}^{-1}. \quad (9)$$

Пример 2. Линия Безье пятого порядка построена на ХП с вершинами $\mathbf{u}_0=[10 \ 0]^T$, $\mathbf{u}_1=[22 \ 6]^T$, $\mathbf{u}_2=[19 \ 12]^T$, $\mathbf{u}_3=[11 \ 15]^T$, $\mathbf{u}_4=[8 \ 12]^T$ и $\mathbf{u}_5=[20 \ 0]^T$ (рис. 2). Найти реальную степень полинома и построить характеристическую полилинию минимального порядка.

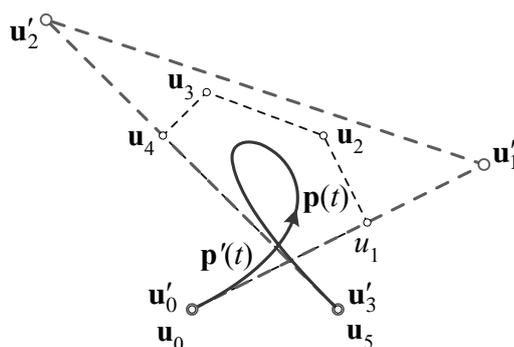


Рис. 2. Уменьшение порядка кривой Безье

Решение. С помощью матрицы \mathbf{H}_5 из *примера 1* вычислим матрицу полиномиальных коэффициентов кривой Безье:

$$\mathbf{S}_5=\mathbf{U}_5\mathbf{H}_5=\begin{bmatrix} 10 & 60 & -150 & 100 & 0 & 0 \\ 0 & 30 & 0 & -30 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Два правых нулевых столбца $\mathbf{s}_4=\mathbf{s}_5=\mathbf{O}_{2,1}$ дают дефект степени полинома $d=2$ и его реальную степень $n'=3$. По (9) находим характеристические точки *кубической* кривой Безье, полностью совпадающей с исходной линией формально пятого порядка:

$$\mathbf{G}_{5,3}=\begin{bmatrix} 1 & -5 & 10 & -10 \\ 0 & 5 & -20 & 30 \\ 0 & 0 & 10 & -30 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{G}_{5,3}\mathbf{H}_3^{-1}=\begin{bmatrix} 1 & -2/3 & 1 & -4 \\ 0 & 5/3 & -10/3 & 15 \\ 0 & 0 & 10/3 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$[\mathbf{u}'_0 \ \mathbf{u}'_1 \ \mathbf{u}'_2 \ \mathbf{u}'_3] = [\mathbf{u}_0 \ \mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \mathbf{u}_3 \ \mathbf{u}_4 \ \mathbf{u}_5] \mathbf{G}_{5,3} \mathbf{H}_3^{-1},$$

$$\mathbf{u}'_0 = \mathbf{u}_0, \quad \mathbf{u}'_1 = \frac{5\mathbf{u}_1 - 2\mathbf{u}_0}{3} = \begin{bmatrix} 30 \\ 10 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}'_2 = \frac{10\mathbf{u}_2 - 10\mathbf{u}_1 + \mathbf{u}_0}{3} = \begin{bmatrix} 0 \\ 20 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{u}'_3 = \frac{10\mathbf{u}_3 - 20\mathbf{u}_2 + 15\mathbf{u}_1 - 4\mathbf{u}_0}{3} = \begin{bmatrix} 20 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

Алгоритмы увеличения (8) и уменьшения (9) порядка характеристической полилинии кривой Безье сливаются в **единый алгоритм** изменения ее порядка с n до n' :

$$\mathbf{U}'_{n'} = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{H}_{n'}^{-1}. \tag{10}$$

Повышение порядка линии Безье возможно до *произвольного* формального значения $n' > n$, при этом реальная степень полинома остается равной n . Понижение порядка до реального значения $n' < n$ возможно лишь при наличии у полинома дефекта степени $d = n - n' > 0$, равного числу правых нулевых столбцов матрицы $\mathbf{S}_n = \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n$.

2. Изменение порядков поверхности Безье

Распространим линейный алгоритм (10) на изменение порядков n и m двухпараметрического полинома *поверхности Безье* в пространстве \mathbb{R}^3 :

$$\mathbf{p}(t, \tau) = \mathbf{B}_n^T(t) \mathbf{U}_{n,m} \mathbf{B}_m(\tau) = \mathbf{T}_n^T(t) \mathbf{S}_{n,m} \mathbf{T}_m(\tau) = \mathbf{T}_n^T(t) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U}_{n,m} \mathbf{H}_m \mathbf{T}_m(\tau) \quad \forall t, \tau \in [0, 1], \tag{11}$$

строящейся на характеристической полигональной сети (ХПС) $\mathbf{U}_{n,m} = \{\mathbf{u}_{ij}\}$. Сеть составлена из узловых точек \mathbf{u}_{ij} , пронумерованных индексами $i \in [0, n]$ и $j \in [0, m]$ в порядке соединения вершин ребрами. Аналогично (5) элементы разложений (11) связаны соотношениями

$$\mathbf{B}_n(t) = \mathbf{H}_n \mathbf{T}_n(t), \quad \mathbf{B}_m(\tau) = \mathbf{H}_m \mathbf{T}_m(\tau), \quad \mathbf{S}_{n,m} = \mathbf{H}_n^T \mathbf{U}_{n,m} \mathbf{H}_m. \tag{12}$$

На рис. 3 показано несколько поверхностей, построенных по (11). Им присущи все свойства объектов Безье, подробно рассмотренные в [1 – 3].

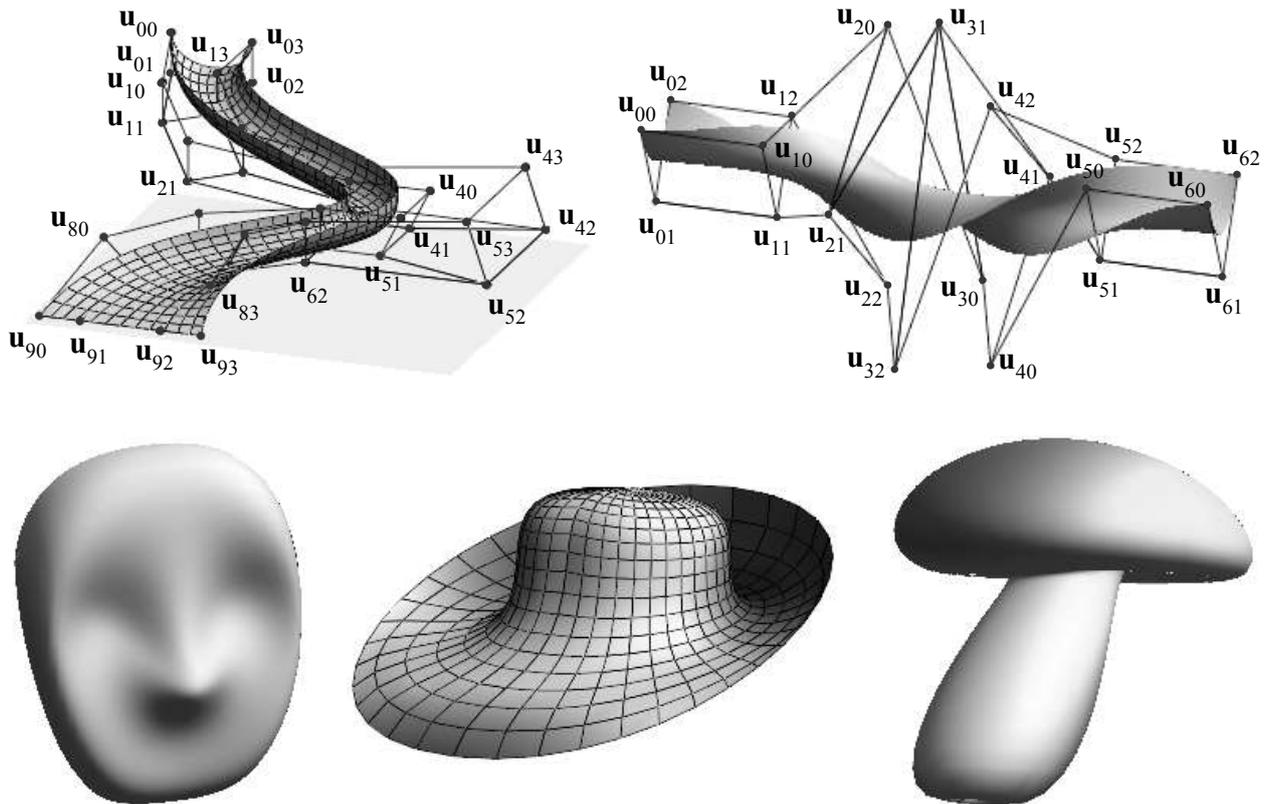


Рис. 3. Поверхности Безье

Операции добавления и удаления узловых вершин изменяют размеры сети и степени n и m двухпараметрического полинома $\mathbf{p}(t, \tau)$. В отличие от кривой Безье, в ХПС одноименной поверхности добавляются или удаляются не отдельные вершины, а только целые полилинии $\mathbf{u}_{0k}\mathbf{u}_{1k} \dots \mathbf{u}_{nk}$ и/или $\mathbf{u}_{k0}\mathbf{u}_{k1} \dots \mathbf{u}_{km}$ в параметрических направлениях t и/или τ . В результате в новой сети $\mathbf{U}'_{n',m'} = \{\mathbf{u}'_{ij}\}$ с узловыми размерностями $(n'+1) \times (m'+1)$ перераспределяется влияние вершин на значения функции

$$\mathbf{p}'(t, \tau) = \sum_{i=0}^{n'} \sum_{j=0}^{m'} b_{n'i}(t) b_{m'j}(\tau) \mathbf{u}'_{ij} = \mathbf{B}_{n'}^T(t) \mathbf{U}'_{n',m'} \mathbf{B}_{m'}(\tau) \quad \forall t, \tau \in [0, 1]. \quad (13)$$

Рассмотрим два способа изменения размеров характеристической сети, отличающиеся изменчивостью формы поверхности Безье.

1. В *ручном* режиме добавление новых или удаление лишних полилиний ХПС приводит к перенумерации ее вершин и перестройке поверхности по (13), поскольку при новых степенях $n \neq n'$ и $m \neq m'$ ее определяют уже другие весовые функции Бернштейна $b_{n'i}(t)$ и $b_{m'j}(\tau)$.

Таким образом, **ручное изменение порядков характеристической полигональной сети изменяет форму поверхности Безье**. На рис. 4 показано, как это выглядит для второй поверхности из рис. 3 при добавлении в ее ХПС новой полилинии $\mathbf{u}'_{60}\mathbf{u}'_{61}\mathbf{u}'_{62}$ и удалении средней полилинии $\mathbf{u}_{30}\mathbf{u}_{31}\mathbf{u}_{32}$.

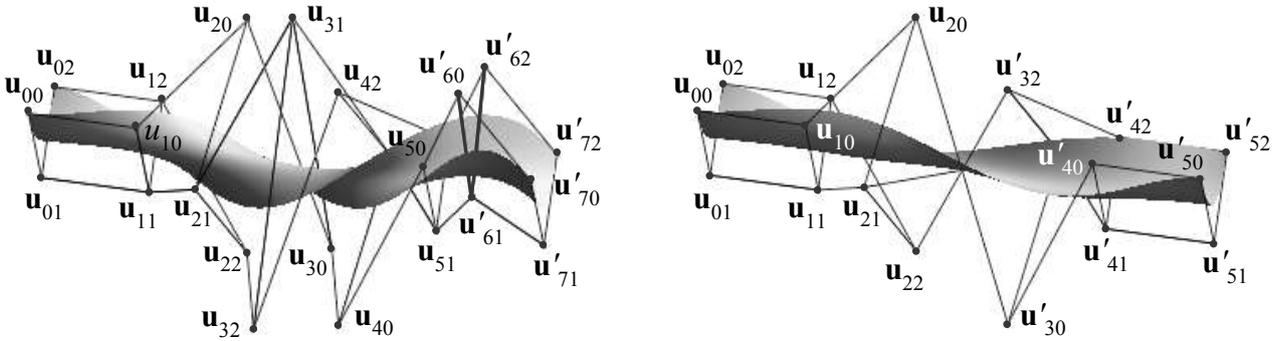


Рис. 4. Ручное изменение порядков поверхности Безье

2. В интерактивном проектировании более удобно *алгоритмическое* изменение размеров ХПС, при котором происходит перераспределение ее вершин с *сохранением формы* поверхности Безье. Это позволяет быстро получить новую характеристическую сеть желаемых размерностей и продолжить ее дальнейшее редактирование, плавно и предсказуемо конструируя требуемую поверхность.

Новая конфигурация ХПС находится из условия совпадения старой (11) и новой (13) моделей $\mathbf{p}(t, \tau) = \mathbf{p}'(t, \tau)$:

$$\mathbf{T}_{n'}^T(t) \mathbf{H}_{n'}^T \mathbf{U}'_{n',m'} \mathbf{H}_{m'} \mathbf{T}_{m'}(\tau) = \mathbf{T}_n^T(t) \mathbf{H}_n^T \mathbf{U}_{n,m} \mathbf{H}_m \mathbf{T}_m(\tau).$$

Этому уравнению удовлетворяет поверхностное решение

$$\mathbf{U}'_{n',m'} = (\mathbf{H}_n \mathbf{E}_{n+1,n'+1} \mathbf{H}_{n'}^{-1})^T \mathbf{U}_{n,m} (\mathbf{H}_m \mathbf{E}_{m+1,m'+1} \mathbf{H}_{m'}^{-1}), \quad (14)$$

обобщающее линейный аналог (10) сразу на обе задачи — как добавление характеристических полилиний, так и их удаление. По (14) может быть найдена ХПС с увеличенной размер-

ностью в одном параметрическом направлении и с уменьшенной — в другом, например, с $n' > n$ и $m' < m$. Более того, изложенный метод дает решения восьми задач изменения размерностей ХПС во всех возможных сочетаниях порядков $n' < n$, $n' = n$, $n' > n$ и $m' < m$, $m' = m$, $m' > m$.

Увеличение порядков характеристической сети n и/или m на $d = n' - n > 0$ и/или $\delta = m' - m > 0$ возможно всегда. При этом матрицы полиномиальных коэффициентов

$$S'_{n',m} = \begin{bmatrix} S_{n,m} \\ O_{d,m+1} \end{bmatrix}, \quad S'_{n,m'} = [s_{n,m} | o_{n+1,\delta}], \quad S'_{n',m'} = \begin{bmatrix} S_{n,m} & | & o_{n+1,\delta} \\ O_{d,m+1} & | & O_{d,\delta} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

вычисляемые на новой сетке U' по формуле $S'_{n',m'} = H_n^T U'_{n',m'} H_{m'}$, содержат d нулевых строк и/или δ нулевых столбцов. Это означает, что реальные порядки биполиномиальной функции $p'(t, \tau)$ остались равными n и m .

Уменьшение размеров характеристической сети на $d = n - n' > 0$ и/или $\delta = m - m' > 0$ возможно не всегда, а лишь при условии, что реальные порядки поверхности $p(t, \tau)$, зависящие от расположения вершин ее ХПС, меньше формальных, т. е. $n' < n$ и/или $m' < m$. Дефекты степеней d и δ равны числам нулевых строк и столбцов в матрице полиномиальных коэффициентов $S_{n,m} = H_n^T U_{n,m} H_m$, принимающей одну из следующих форм:

$$\begin{bmatrix} S_{n',m'} \\ O_{d,m+1} \end{bmatrix}, \quad [s_{n',m'} | o_{n+1,\delta}], \quad \begin{bmatrix} S_{n',m'} & | & o_{n'+1,\delta} \\ O_{d,m+1} & | & O_{d,\delta} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

В отсутствие нулевых строк и столбцов понижение порядков ХПС невозможно.

Работа алгоритма изменения размерностей ХПС проиллюстрирована на рис. 5. Исходная поверхность (рис. 5, а) порядков $n = 4$ и $m = 3$ построена на сетке $U_{4,3}$ из 5×4 узлов и имеет в (16) матрицу $S_{4,3}$ первого типа, содержащую одну нижнюю нулевую строку. Значит, дефект степени равен $d = 1$, а реальный t -порядок полинома $p(t, \tau)$ составляет $n' = n - d = 3$. Это подтверждает поверхность (рис. 5, б), построенная на сетке $U'_{3,3}$ узловой размерности 4×4 . Третья поверхность (рис. 5, в) демонстрирует возможность одновременного понижения t -порядка до реального $n' = 3$ и формального повышения τ -порядка до формального $m' = 6$.

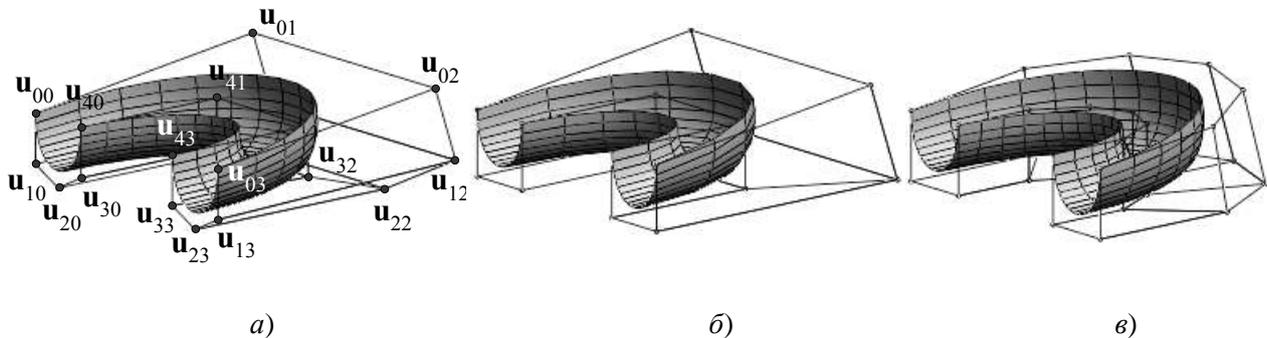


Рис. 5. Алгоритмическое изменение порядков поверхности Бэзье

Вывод

В результате предпринятых усилий разработан новый единый алгоритм произвольного изменения порядков линий и поверхностей Бэзье. Получены условия, при которых становится возможным понижение порядков полиномов этих графических объектов.

Библиографический список

1. Компьютерная геометрия: учеб. пособие для студ. вузов / Н.Н. Голованов [и др.]. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 512 с.
2. **Роджерс, Д.** Математические основы машинной графики / Д. Роджерс, Дж. Адамс. – М.: Мир, 2001. – 604 с.
3. **Фокс, А.** Вычислительная геометрия. Применение в проектировании и на производстве / А. Фокс, М. Пратт. – М.: Мир, 1982. – 304 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

E.A Nikulin

**NEW METHOD OF BÉZIER CURVES AND SURFACES
ORDER MODIFICATION**

Proposing a new method to modify an order of polynoms for Bézier curves and surfaces which reduces to a single formula for both increasing and decreasing of a characteristic grid dimension.

Key words: curve, surface, Bézier, polynom, meshed network.

УДК 629.5.051.05

Е.Н. Поселенов, А.В. Преображенский

ОБЛАСТИ РАБОТОСПОСОБНОСТИ АВТОРУЛЕВОГО С ПД-РЕГУЛЯТОРОМ

На математических моделях, управляемых на курсе судов, рассматриваются области параметров авторулевого с пропорционально-дифференциальным регулятором, в которых качество управления соответствует предъявляемым требованиям. Математические модели с не перекрывающимися областями работоспособности авторулевого, имитирующие существенные изменения характеристик речных судов под влиянием внешней среды, предлагаются в качестве тестовых для испытаний алгоритмов управления движением судна заданным курсом.

Ключевые слова: авторулевой, математические модели, ПД-регулятор, области управляемости.

Для лабораторных испытаний новых, более эффективных алгоритмов автоматического управления движением речного судна по заданной траектории, и совершенствования тренажеров судоводителя необходим набор математических моделей, отражающих разнообразие характеристик управляемости водоизмещающих судов в различных условиях движения. Значительное влияние внешней среды на управляемость судна подтверждается наблюдаемой в ряде случаев неработоспособностью авторулевого с пропорционально-дифференциальным (ПД) регулятором фиксированной настройки. Например, при выходе судна на мелкую воду амплитуда колебаний курса возрастает до недопустимых значений и приходится переходить на ручное управление. Изменение размеров и расположения области значений параметров ПД-регулятора: коэффициентов « K_p » и « K_d » при пропорциональной и дифференциальной составляющих управляющего воздействия, в которой обеспечивается удовлетворительное качество регулирования (области «работоспособности» регулятора, или «управляемости» объекта ПД-регулятором) можно рассматривать как признак существенного изменения характеристик управляемости объекта. Целью данной работы является поиск моделей управляемых на курсе судов, для которых области управляемости ПД-регулятором малы по размеру и взаимно не перекрываются. Такие модели, имитирующие экстремальные изменения динамики объекта с сохранением его управляемости, могут использоваться в качестве тестовых для оценки эффективности алгоритмов управления.

В работе исследуется вид областей управляемости ПД-регулятором модификаций базовой модели судна с различными значениями коэффициентов уравнений модели. Известен ряд моделей управляемых на курсе судов, отличающихся количеством нелинейностей в уравнениях и методикой расчета коэффициентов по конструктивным параметрам судна и рулевого устройства. При исследовании управляемости расчетных математических моделей, параметрической идентификации модели судна и сравнении натуральных осциллограмм скорости рысканья судна и его моделей, рассчитанных по разным методикам, преимуществ какого-либо одного типа моделей не было обнаружено [1, 2]. Подбором коэффициентов уравнений модели и введением постоянной поправки к углу перекаладки руля для конкретного участка пути судна удавалось добиться весьма точного совпадения движений модели и объекта. Значения коэффициентов уравнений модели, подобранные для различных участков пути, изменялись в широких пределах, в отдельных случаях изменялся знак некоторых коэффициентов, так что значительную разницу параметров моделей объектов «судно» и «судно-среда» следует считать нормальным явлением. Степень совпадения движений модели и объекта была практически одинакова при использовании моделей разных типов. Поэтому при исследовании областей управляемости в качестве базовой модели объекта управления (ОУ) была использована наиболее простая модель Р.Я. Першица [3] с одной нелинейностью:

$$\frac{d\beta}{dt} = -q_2\beta - r_2\omega - s_2U - h|\beta|\beta, \quad \frac{d\omega}{dt} = -q_3\beta - r_3\omega - s_3U, \quad \frac{d\varphi}{dt} = \omega, \quad (1)$$

где ω – угловая скорость судна в горизонтальной плоскости (скорость рысканья); β – угол дрейфа; U – угол перекладки руля; φ – курсовой угол; t – безразмерное время (его единица равна времени прохождения судном расстояния, равного длине корпуса судна).

При моделировании системы регулирования (рис. 1) предполагалось, что рулевой привод (РП) имеет зону нечувствительности $\pm 0,2^\circ$, руль перекачивается со скоростью $3^\circ/\text{с}$ в диапазоне $\pm 30^\circ$, характеристика датчика курса (ДК) имеет зону нечувствительности $\pm 0,2^\circ$, а характеристика датчика угловой скорости ω (ДУС) – зону нечувствительности $\pm 0,02^\circ/\text{с}$. Единица безразмерного времени принималась равной 15 с. Рассматривался процесс выхода на заданный курс при начальном отклонении от курса 3° . Авторулевой считался работоспособным, если амплитуда колебаний курса в установившемся режиме не превышала 1° .

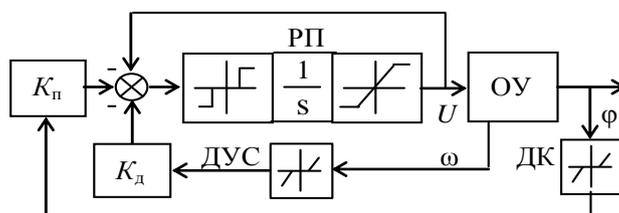


Рис. 1. Структурная схема модели авторулевого

Рассматривались модификации базовой модели с коэффициентами уравнений, указанными в безразмерных единицах (табл. 1), где U_k – критический угол перекладки руля, ограничивающий зону неоднозначности «диаграммы управляемости» – статической характеристики $\omega(U)$, ω_0 – установившееся значение ω при $U = 0$.

Таблица 1

	q_2	r_2	s_2	h	q_3	r_3	s_3	ω_0	U_k
Диапазон значений	0,16 1,5	-0,5 -0,75	-0,11 -0,27	1 5	-2,5 -13	3 7,2	-1,2 -3	0 1,2	0 0,43
Модель 1	0,22	-0,6	-0,11	1,07	-5,4	3,2	-1,2	1,2	0,43
Модель 2	0,22	-0,67	-0,13	1,7	-4,83	4,31	-1,87	0,34	0,1
Модель 3	0,476	-0,68	-0,12	2,27	-5,5	4,55	-1,26	0,2	0,04
Модель 4	-1	-0,32	-0,16	21,4	-1,9	1,25	-0,18	0,1	0,1
Модель 5	-3,84	0,095	-0,34	240	-0,75	0,09	-0,22	0,1	0,09
Модель 6	-0,66	0,435	-0,5	3,2	-2	1,5	-0,4	0,02	0
Модель 7	-0,66	0,435	-1	3,2	-2	1,5	-0,4	0,02	0

Параметры моделей 1...3 рассчитаны теоретически. Наиболее сложными в управлении считаются неустойчивые на прямом курсе суда с повышенным значением параметров ω_0 и U_k . Поэтому работоспособность ПД - регулятора проверялась, в первую очередь, на моделях с большим разбросом значений параметра ω_0 . Чтобы определить теоретически допустимый разброс значений ω_0 , был проведен расчет коэффициентов уравнений моделей виртуальных судов. Рассматривались модели, получаемые при всех возможных комбинациях следующих значений конструктивных параметров: $L/B = 6$ и 8 , $T/L = 0,03$ и $0,06$, $\delta = 0,55, 0,65, 0,75, 0,85$, $\sigma = 0,94, 0,96, 0,98$, $K_R = 0,05$ (всего 48 моделей), где L , B и T – длина, ширина и осадка судна, δ и σ – коэффициенты полноты корпуса и площади диаметрали, K_R – коэффициент эффективности руля. Диапазон значений коэффициентов уравнений модели, полученных в результате расчета, указан в первой строке табл. 1. Модель 1 представляет виртуальное судно с максимальным среди рассмотренных моделей значением параметра ω_0 , модель 2 соответствует судну типа «УИ Пятилетка», считающемуся достаточно сложным в управлении, модель 3 взята из справочника [3] как пример хорошо управляемой.

Область управляемости модели 2 показана на рис. 2, а. Она ограничена линиями 1 и 3. При малых значениях параметра K_n (значения $K_n < 2$ не рассматривались) амплитуда автоколебаний курса A_φ превышает 1° . Если значение K_n выходит за пределы области, ограниченной линией 1, угол перекладки руля достигает ограничения и колебания курса неограниченно возрастают. Примеры осциллограмм переходных процессов модели 2 при настройке параметров регулятора вблизи границ 3 и 1 области управляемости приведены на рис. 3, а, б.

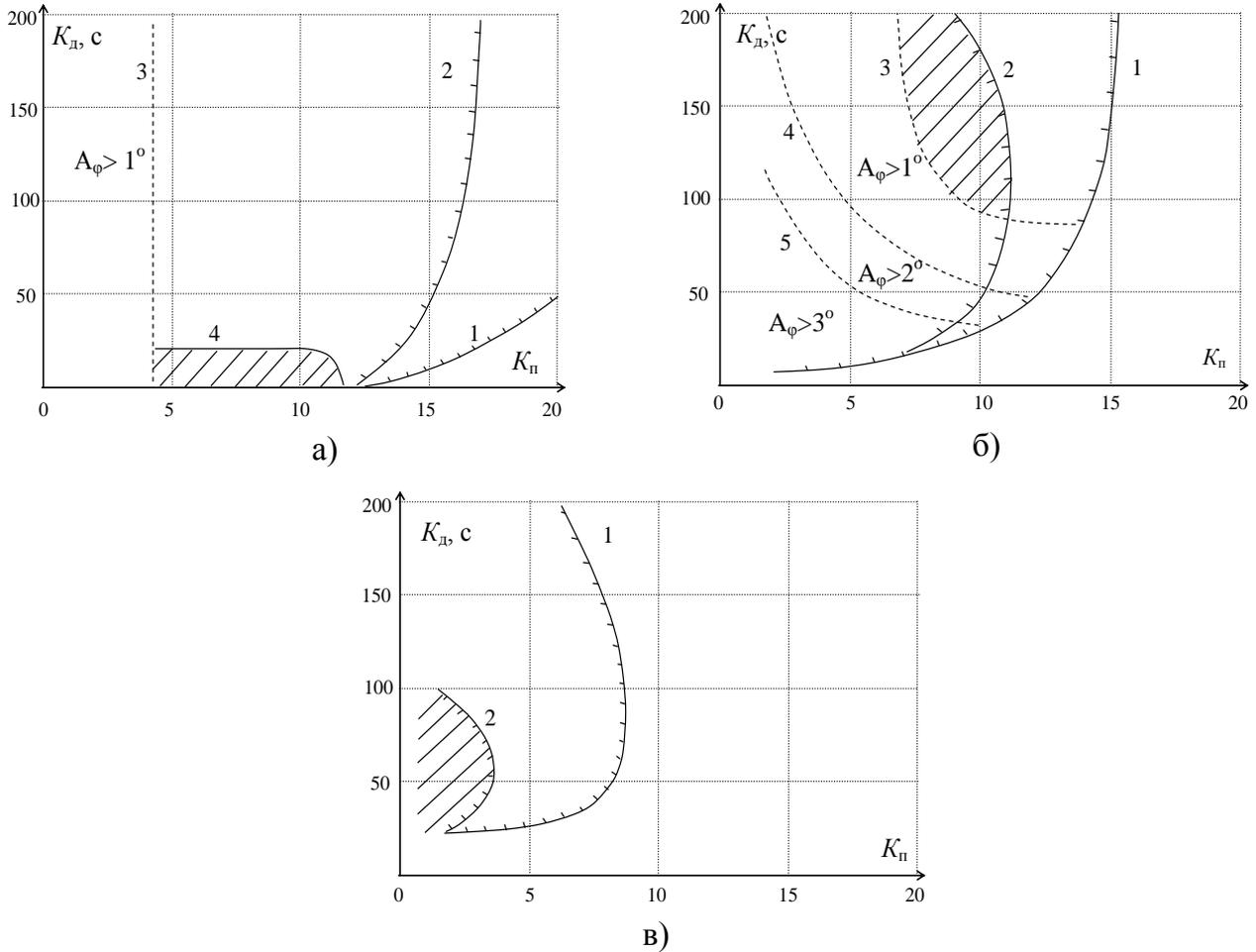


Рис. 2. Области управляемости (1–5) моделей 2, 4, 7

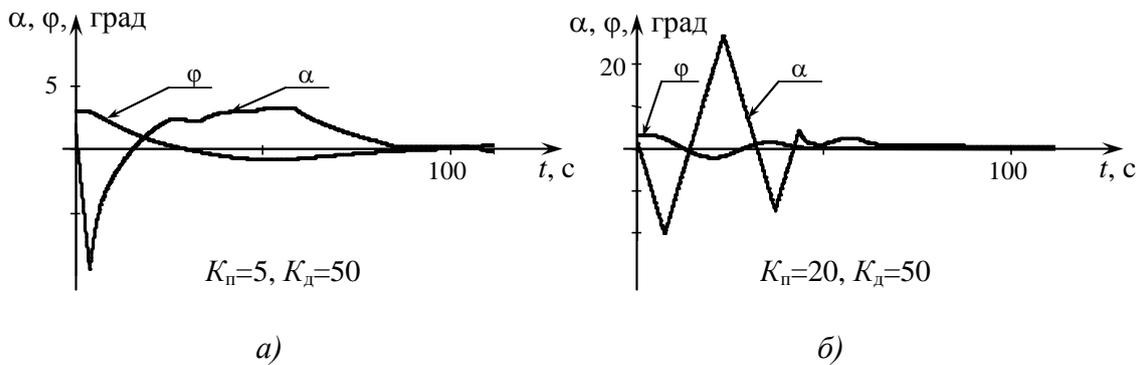


Рис. 3. Осциллограммы переходных процессов модели 2

Области управляемости моделей 1 и 3, несмотря на большую разницу значений параметров ω_0 и U_k , почти такие же, как у модели 2.

Модели 4–6 взяты из работы [4], где приведены результаты параметрической иденти-

фикации характеристик управляемости судна типа «Волгонефть» по натурным данным. У этих моделей диаграмма управляемости особенно сильно отличается по виду от диаграмм управляемости расчетных моделей (рис. 4), и, кроме того, наблюдается необычное соотношение коэффициентов s_3 и s_2 . Эти коэффициенты одного порядка, в то время как у расчетных моделей $s_2 \approx 0,1 s_3$. Увеличение коэффициента s_2 означает усиление влияния на угловую скорость ω , угла дрейфа по сравнению с управляющим воздействием, что может ухудшить управляемость.

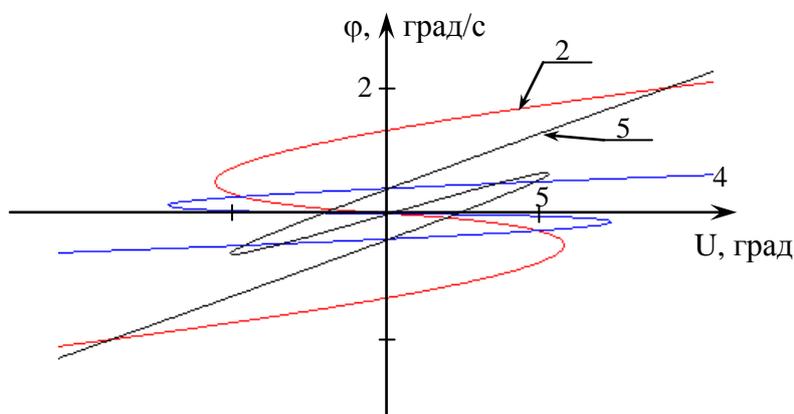


Рис. 4. Статические характеристики (2, 4, 5) моделей 2, 4, 5

У модели 4 область управляемости ограничена линиями 1 и 3 (рис. 2, б). Линии 4 и 5 – границы областей с различными амплитудами автоколебаний курса.

У моделей 5 и 6 верхняя по параметру K_n граница области управляемости проходит приблизительно так же, как линия 1 у модели 4.

Модель 7 – это модель 6 с увеличенным в два раза коэффициентом s_2 . Область управляемости модели 7, показанная на рис. 2, в, ограничена линией 1.

Для снижения частоты переключений руля, вызванных рысканьем судна по курсу вследствие случайных внешних возмущающих воздействий на корпус судна, в контур управления авторулевого устанавливают фильтр низкой частоты. Его полоса пропускания задается с учетом характеристик возмущающих воздействий. При введении в канал измерения угловой скорости ω фильтра Баттерворта пятого порядка с полосой пропускания 1 рад/с, границы управляемости моделей 2, 4 и 7 сместились из положения 1 в положение 2. В результате области управляемости моделей 4 и 7 (заштрихованы на рис. 2, б, в) значительно уменьшились. У модели 2 параметры автоколебаний курса в области управляемости практически не изменились, но переход к стационарному режиму стал происходить с колебаниями, усиливающимися при увеличении параметра K_n (рис. 5, а, б). Чтобы уменьшить эти колебания до приемлемой величины, параметры регулятора необходимо устанавливать в заштрихованной области, ограниченной линией 4 (рис. 2, а).

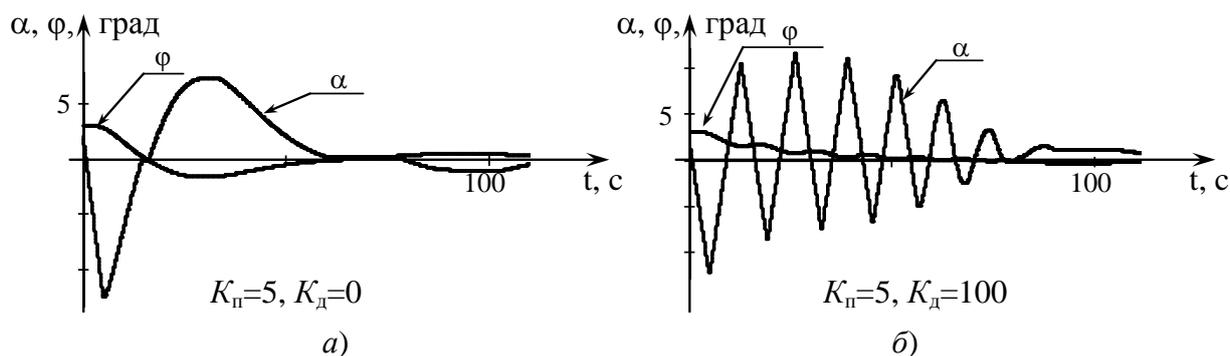


Рис. 5. Осциллограммы переходных процессов модели 2 с фильтром

Таким образом, модели 2, 4, 7 обладают взаимно не перекрывающимися областями управляемости ПД - регулятором. Эти модели имитируют существенные изменения динамики объекта, являющиеся причиной наблюдаемой на практике неработоспособности авторулевого с ПД - регулятором фиксированной настройки даже в спокойных по внешним признакам условиях движения. Модели 2, 4, 7 целесообразно использовать при разработке и испытаниях новых, интеллектуальных алгоритмов управления курсом судна, конкурирующих по качеству управления с опытным судоводителем.

Библиографический список

1. **Гурылев, М.В.** Оценка управляемости судов на математических моделях / М.В. Гурылев, А.В. Преображенский // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. серия / ВГАВТ. 2002. Вып. 1. С. 74–79.
2. **Гурылев, М.В.** Идентификация математических моделей управляемых на курсе речных судов / М.В. Гурылев, А.В. Преображенский // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. серия / ВГАВТ. Вып. 1. 2002. С. 113–119.
3. Справочник по теории корабля / под ред. Я.И. Войткунского. – Л.: Судостроение, 1985. – 544 с.
4. **Чиркова, М.М.** Чередование областей различных статико-динамических особенностей объекта с изменением его чувствительности к управляющему воздействию // Моделирование и оптимизация сложных систем: межвуз. сб. научн. тр. / ВГАВТ.– Н. Новгород. 1997. Вып. 273. Ч. 1. С. 188–208.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

E.N. Poselenov, A.V. Preobrazhensky

THE REGIONS OF CAPACITY FOR WORK OF AUTOMATIC PILOT WITH PD-REGULATOR

A controllability region of mathematical ship models on a plane of PD-regulator parameters is considerate. The mathematical models with non-covering regions that imitate the essential change of river ships controllability by environment influence are suggested for testing of steering algorithms.

Key words: autopilot, mathematical models, PD - regulator, controllability regions.

УДК 519.2

Л.В. Кулагина

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ БАЗЫ ДАННЫХ
ДЛЯ КОРПОРАТИВНЫХ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются методы построения информационных систем на распределенной базе данных. Предлагается математическое описание процессов создания и передачи данных на распределенные серверы.

Ключевые слова: базы данных, информационные системы, клиент серверные технологии, математическая модель, теория массового обслуживания.

Большинство систем, с которыми человек имеет дело, являются сложными. Попытка их математического описания с помощью детерминистических моделей приводит к большой погрешности истинного положения вещей. При решении задач анализа и проектирования таких систем приходится считаться с тем, что случайность является определяющей для процессов, протекающих в системах. При этом пренебрежение случайностью приводит к искажению, к ошибкам в выводах и практических рекомендациях.

Первые задачи теории систем массового обслуживания были рассмотрены в начале XX века. Эти задачи были актуальны в связи со стремлением упорядочить работу телефонной сети и разработать методы, позволяющие заранее повысить качество обслуживания потребителей в зависимости от числа используемых устройств. Оказалось, что ситуации, возникающие на телефонных станциях, являются типичными не только для телефонной связи. Работа аэродромов, морских и речных портов, магазинов, терминальных классов, электронных вычислительных комплексов, радиолокационных станций и т.д. может быть описана в рамках теории систем массового обслуживания. Работа корпоративной информационной системы (КИС) тоже может быть описана с помощью теории массового обслуживания. Например: обмен данными между серверами, поддержание в актуальном состоянии структуры распределенных баз данных, формирование отчетных форм при помощи приложения, в котором идет обращение к серверу баз данных. На рис. 1 представлена схема формирования отчетных форм. Данные процессы являются системой массового обслуживания и относятся к классу – системы с ожиданием (с очередью), причем обслуживание упорядоченное, т.е. запросы обрабатываются в порядке поступления. Данные системы являются системами неограниченным ожиданием. Любой запрос рано или поздно будет обслужен.

В рассматриваемых задачах каждый запрос к базе данных требует его обработки в течение некоторого случайного промежутка времени, зависящего от содержания запроса. Таким образом, работу сервера можно рассматривать как операцию массового обслуживания, состоящую из элементарных операций – обработки отдельных запросов. Одной из характерных особенностей системы массового обслуживания является наличие некоторого потока событий (запросов).

Под потоком событий понимается последовательность однородных событий, появляющихся одно за другим в случайные моменты времени. В общем случае это дает последовательность случайных точек, которые делят числовую ось времени на случайные интервалы. Приведем примеры потоков: последовательность вызовов на телефонной станции, поток заявок на ремонт какого-то оборудования, поток отказов (сбоев) ЭВМ и т.д. В данной работе мы имеем дело с потоком запросов пользователей к базе данных и поддержании ее в актуальном состоянии.

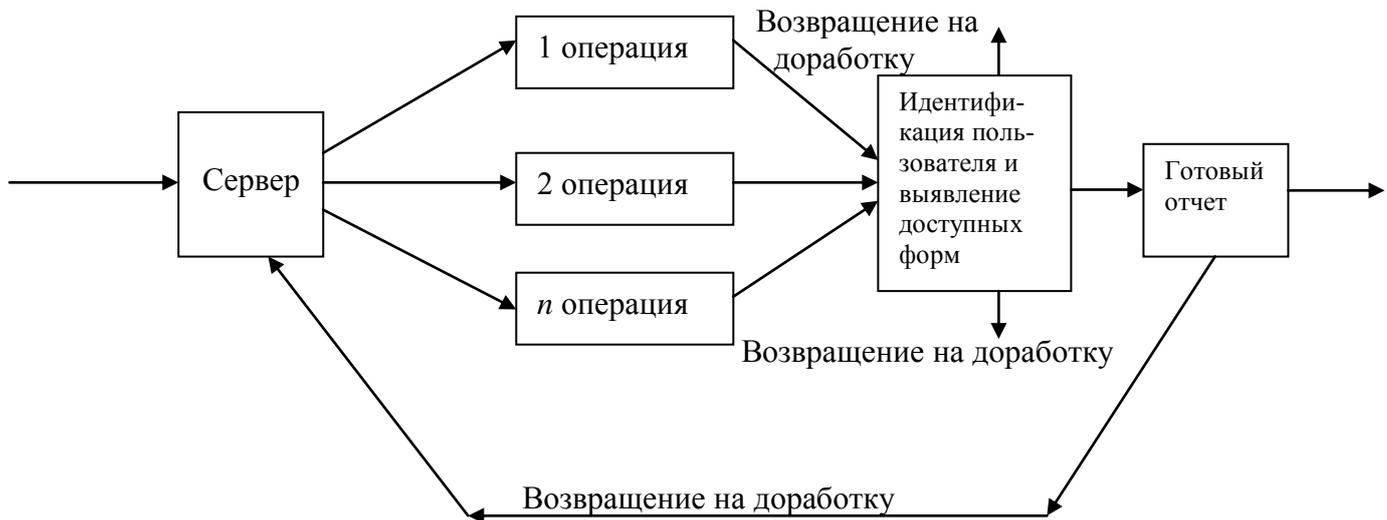


Рис. 1. Структурная схема потока запросов на построение отчетных форм

Главной характеристикой любого потока является его интенсивность λ , которая равна среднему числу событий, происходящих за единицу времени. Рассмотрим частный случай, когда интенсивность является постоянной величиной. Пусть T случайная величина, равная времени между соседними обращениями к базе данных, тогда ее функция распределения вероятности равна:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (1)$$

а, следовательно, функция плотности вероятности T имеет вид:

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t}, \quad t > 0. \quad (2)$$

Кроме того, известно, что числовые характеристики случайной величины T определяются равенствами:

$$M(T) = 1/\lambda, \quad (3)$$

$$D(T) = 1/\lambda^2. \quad (4)$$

Если на предприятии с числом пользователей, равным 1000, обращения к системе происходят с постоянной интенсивностью, примерно 10 обращений в минуту, то данный поток запросов является потоком Пальма, т.е. обладает свойствами ординарности и стационарности с ограниченным последствием. Вероятность обращений к базе данных за промежуток времени длительностью t , независимо от начала и конца этого промежутка, определяется по формуле Пуассона:

$$P_t(k) = (\lambda t)^k e^{-\lambda t} / k!. \quad (5)$$

Зафиксируем t и найдем наиболее вероятное значение $k=k_0$, т.е. k , при котором вероятность $P_t(k)$ наибольшая. Для этого необходимо решить неравенства:

$$P_t(k_0-1) \leq P_t(k_0) \quad (6) \quad \text{и} \quad P_t(k_0) \geq P_t(k_0+1). \quad (7)$$

Используя формулу Пуассона, получаем, что $\lambda t - 1 \leq k_0 \leq \lambda t$.

Рассмотрим теперь математическую модель механизма создания и передачи на распределенные серверы печатных форм отчетности, который рассмотрен в работе [1-3]. При формировании отчетных форм возникает поток запросов пользователей к базе данных. Данный поток не обладает постоянной интенсивностью, а следовательно, является нестационарным пуассоновским потоком с мгновенной плотностью $\lambda(t)$:

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow \infty} \frac{M(t + \Delta t) - M(t)}{\Delta t}, \quad (8)$$

тогда функция плотности распределения будет иметь вид:

$$f(\tau) = \lambda(t_0 + \tau) e^{-\int_{t_0}^{t_0+\tau} \lambda(t) dt}, \quad (9)$$

где τ – временной интервал, на который попадает n событий.

Исходя из изложенного, можно математически описать работу информационной системы на уровне приложений и базы данных.

Одной из наиболее сложных задач при разработке ИС, построенных на распределенной базе данных, является задача организации взаимодействия входящих в ее состав функциональных элементов (ФЭ), представляющих собой функционально завершенные программные единицы приложений – процедуры, функции, объекты и серверы, которые хранят процедуры баз данных, команды Transact_SQL. Управление ФЭ предлагается проводить на двух уровнях: приложения и базы данных. Управление ФЭ на уровне приложения подробно разобраны в работах [4-7]. Рассмотрим подробнее управление ФЭ в ИС на уровне БД. Для описания структуры ИС любого уровня сложности достаточно нескольких типов элементов: набора ФЭ и анализатора состояний. Разработка анализатора состояний, использующего непосредственно проблемные данные, для каждой ИС является задачей уникальной и не менее сложной, чем создание структуры взаимодействия ФЭ. Для упрощения данной задачи определим уровень абстрактного описания состояния ИС. Рассмотрим ИС как некоторый объект, который состоит из набора функциональных элементов F_1, F_2, \dots, F_n и может находиться в конечном множестве состояний в абстрактном пространстве состояний. Каждое из состояний ИС зависит от значений данных хранящихся в БД и характеризуется признаками состояния P_1, P_2, \dots, P_m в абстрактном многомерном пространстве состояний. Для регистрации признаков состояния в БД [4-6] заводится служебная таблица «Sign_of_condition». Ее структура представлена в табл. 1.

Таблица

Структура признака состояния базы данных

№ п/п	Название поля	Тип поля
1	Kod	Int IDENTITY
2	Name	Char
3	Sign	Bit in not null
5	Old_Sign	Bit in not null
4	Kod_DB	Tinyint
6	Condition	char
7	Condition_TRUE	char
8	Condition_FALSE	char
9	Condition_Invert_Sing	char

Признак состояния в таблице представляет собой запись. Рассмотрим один из признаков состояния более подробно. Признак состояния представляет собой логическое поле Sign, принимающее два значения: либо установлен, либо сброшен. В логическом поле Sign хранится текущее положение признака. В логическом поле Old_Sign хранится предыдущее значение признака. Изменение предыдущего значения происходит при отработке триггера данной таблицы на UPDATE. Пространство признаков представляет собой гиперпространство. Поскольку признак принимает два значения, то работу ИС можно описать в виде переходов между вершинами m -мерного гиперкуба. Значение конкретного признака зависит от условия данного признака, хранящегося в поле «Condition» и написанного на Transact-SQL. Во время проверки условия функциональные элементы могут работать тремя способами, отличающимися между собой условием запуска ФЭ. С каждым способом запуска будут связаны свои ФЭ. Пусть с первым способом запуска, назовем его «пролог», связаны определенные ФЭ, которые полностью и последовательно выполняются при каждой установке значения «уста-

новлен». Данные ФЭ перечисляются в поле «Condition_TRUE», согласно требованиям Transact-SQL. С установкой значения «сброшен» связан второй способ запуска ФЭ, называемый «Эпилогом». ФЭ выполняются аналогичным образом и перечисляются в поле «Condition_FALSE». Кроме этого, есть еще один способ запуска ФЭ, называемый «Очередью». При каждой смене значения ПС выполняются элементы «Очереди». Введение служебной таблицы «Sign_of_condition» с признаками абстрактного пространства состояний позволяет более легкими средствами построить типовой анализатор состояния ИС - Контроллер Состояний (КС), входящий в состав подсистемы управления ИС, предназначенный для управления запуском ФЭ в зависимости от изменений в данных ИС. Для построения КС можно использовать службу «SQL Server Agent». Работа «SQL Server Agent» строится с использованием компонента следующего типа: «Jobs» (задание). Компоненты этого типа описывают задания, которые выполняются автоматически в соответствии с установленным расписанием или вызываются вручную при необходимости. Кроме этого, задания могут вызываться в моменты простоя процессора. Для облегчения построения КС в базе данных заводятся две процедуры. Первая процедура «EXE_Sign» предназначена для работы с конкретной записью в таблице «Sign_of_condition». Другая процедура «EXE_ALL_Sign» представляет собой курсор по всем строчкам таблицы «Sign_of_condition», предназначенной для конкретной базы данных или для всех баз распределенной ИС. Данные в эту таблицу заносятся на центральном сервере и, если необходимо, реплицируются на другие распределенные серверы механизмами, описанными в [7, 8]. Периодически при запуске задания происходит проверка условий и изменения признаков состояний, которые осуществляются последовательным перебором. После отработки последнего зарегистрированного ПС в «Sign_of_condition» управление передается первому, а затем циклически просматриваются все условия признаков состояния и запускаются необходимые функциональные элементы.

Переход из одного состояния в другое возможен в результате выполнения какого-либо ФЭ или изменений данных с клиентских мест, или репликаций данных. Будем также считать, что каждый ФЭ выполняется только в том случае, когда база данных переходит в некоторое множество заранее определенных состояний, т.е. действия ФЭ являются реакцией ИС на переход в эти состояния.

Для описания структуры приложения любого уровня сложности было рассмотрено несколько типов элементов: набора функциональных элементов (ФЭ) и анализатора состояний. Классом особых объектов являлся элемент признак состояния (ПС), который принимает одно из двух значений: «установлен» или «сброшен». Работа данной системы может быть описана по показательному закону с параметром μ , т.е.

$$f(t) = \mu e^{-\mu t}, \quad t > 0. \quad (10)$$

Из этого следует, что поток обслуживания – простейший.

Обозначим данную систему через S , а ее состояния через S_0 – установлен, а S_1 – сброшен. Из состояния S_0 в S_1 систему, очевидно, переводит поток заявок с интенсивностью λ ; из S_0 в S_1 — «поток обслуживания» с интенсивностью μ .

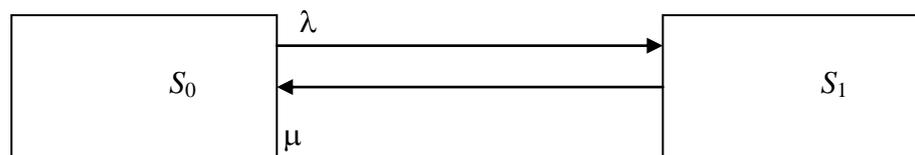


Рис. 2. Структурная схема системы S

Пусть вероятности состояний S_0 и S_1 соответственно равны $p_0(t)$ и $p_1(t)$. Очевидно, для любого момента t справедливо равенство

$$p_0(t) + p_1(t) = 1. \quad (11)$$

Составим дифференциальные уравнения Колмогорова для вероятностей состояний согласно правилу, указанному ранее:

$$\begin{cases} \frac{dp_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu p_1, \\ \frac{dp_1}{dt} = -\mu p_1 + \lambda p_0. \end{cases} \quad (12)$$

Из двух уравнений (12) одно является лишним, так как p_0 и p_1 связаны соотношением (11). Потому отбросим второе уравнение, а в первое подставим вместо p_1 выражение $(1-p_0)$ и придем к равенству:

$$\frac{dp_0}{dt} = -\lambda p_0 + \mu(1-p_0)$$

или

$$\frac{dp_0}{dt} = -(\mu + \lambda)p_0 + \mu. \quad (13)$$

Поскольку в начальный момент канал свободен, уравнение следует решать при начальных условиях:

$$p_0(0) = 1, p_1(0) = 0. \quad (14)$$

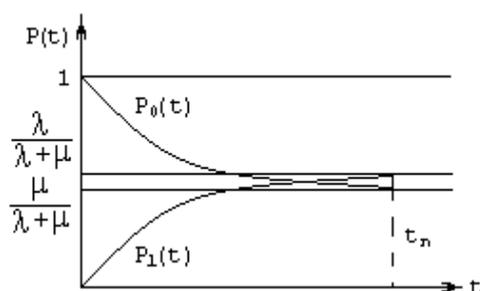


Рис. 3. Графики функций $p_0(t)$ и $p_1(t)$

Решение задачи Коши (11), (12) имеет вид:

$$p_0(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t};$$

$$p_1(t) = \frac{\lambda}{\lambda + \mu} (1 - e^{-(\lambda + \mu)t}).$$

Количественная оценка характеристик сервера, основанная на установившихся (предельных) вероятностях состояний, справедлива только лишь для моментов времени $t > t_n$, где t_n – время переходного процесса, начиная с которого вероятности состояний будут отличаться от своих предельных значений на достаточно малую величину.

Это время t_n можно легко оценить с помощью показателя экспоненты, равного $(\lambda + \mu)t$.

Библиографический список

1. Кулагина, Л.В. Разработка инструментария для создания много серверной системы ввода и обработки данных / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Труды СВМО. 2006. № 2. С. 233–235.
2. Кулагина, Л.В. Разработка много серверной системы передачи и обработки данных / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Труды СВМО. 2005. Т.7. № 1. С 421–422.
3. Кулагина, Л.В. Некоторые вопросы построения и программной реализации корпоративных информационных систем / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Вестник Саратовского государственного технического университета. 2009. №1(37). С. 95–98.
4. Кулагин, Н.В. Математическая модель системы обработки информации и управления систем / Н.В. Кулагин, Т.Ф. Мамедова // Средневожское математическое общество. Препринт № 37. – Саранск.-2001.
5. Кулагина, Л.В. Механизм управления информационной системой на много серверной платформе систем / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2009. № 1(72). С. 134–137.

6. **Кулагина, Л.В.** Механизм управления много серверной информационной системой / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Будущее технической науки: тез. докл. VIII Международной молодежной научно-технич. конф. / НГТУ. Н. Новгород. 2009. С. 68–70.
7. **Кулагина, Л.В.** Управление взаимодействием функциональных элементов в системах, построенных на распределенных базах данных систем / Л.В. Кулагина, Н.В. Кулагин // Труды СВМО. 2009. Т. 11. №1. С. 252–256.
8. **Ивченко, Г.И.** Теория массового обслуживания / Г.И. Ивченко, В.А. Каштанов, И.Н. Коваленко. – М.: Высш. шк. 1982. – 237 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

L.V. Kulagina

**MATHEMATICAL MODEL OF A DISTRIBUTED DATABASE
FOR ENTERPRISE SYSTEMS**

In this paper the methods of information systems in a distributed database are considered. The mathematical notation of the data creation and transmission to distributed servers processes is suggested.

Key words: databases, information system, client an server technology, mathematical model, queneing theory.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.382(6)

Ю.Г. Кабалдин, В.И. Дементьев, Т.Ю. Рыжова

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ СТРУКТУРА ТРИПЛЕТНОГО ГЕНЕТИЧЕСКОГО КОДА И НЕКОТОРЫЕ ЕЕ СВОЙСТВА В ПЛОСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЯХ

Нижегородский филиал института машиноведения РАН,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изложен новый подход к пространственной структуре триплетного генетического кода (СТГК), в рамках решения проблемы построения молекулярной векторной машины и биокомпьютера. Выявлены свойства пространственной СТГК в плоских изображениях, отражающих связь ее с телами Платона, группами Кюри, триплетами (кодонами), переходами и аминокислотами, а также с геометрической моделью человека, как аналога структуры антропоробота, или оператора в эргономической системе "человек – машина".

Ключевые слова: генетический код, триплеты, аминокислоты, "золотая пропорция", тела Платона, геометрическая модель человека (ГМЧ), система "человек – машина".

Проблема раскрытия структуры триплетного генетического кода [1, 2] (табл. 1) во многом связана с интерпретацией его в пространственно-временном, в частности, объемном представлении и отображении его на плоскости.

Таблица 1

Структура триплетного генетического кода

2 \ 1	У - урацил	С - цитозин	А - аденин	Г - гуанин	У - урацил	Ц - цитозин	А - аденин	Г - гуанин	3
U (У)	Phe Phe Leu Leu	Ser Ser Ser Ser	Tyr Tyr STP STP	Cys Cys STP Trp	фенилалан. фенилалан. лейцин лейцин	серин серин серин серин	тирозин тирозин стоп - к. стоп - к.	цистеин цистеин стоп - к. триптоз.	U (У) С (Ц) А (А) Г (Г)
C (Ц)	Leu Leu Leu Leu	Pro Pro Pro Pro	His His Gln Gln	Arg Arg Arg Arg	лейцин лейцин лейцин лейцин	прол. прол. прол. прол.	гистид. гистид. глутам. глутам..	аргинин аргинин аргинин аргинин	U (У) С C(Ц) А (А) G(Г)
A (А)	Ile Ile Ile Met	Thr Thr Thr Thr	Asn Asn Lys Lys	Ser Ser Arg Arg	изолейцин изолейцин изолейцин старт - к.	треон. треон. треон. треон.	аспараг. аспараг. лизин лизин	серин серин аргинин аргинин	U (У) С (Ц) А (А) Г (Г)
G (Г)	Val Val Val Val	Ala Ala Ala Ala	Asp Asp Glu Glu	Gly Gly Gly Gly	валин валин валин валин	алан. алан. алан. алан.	аспар.к. аспар.к. глут. к. глут. к.	глицер. глицер. глицер. глицер.	U (У) С (Ц) А (А) Г (Г)

Подобный подход позволил бы через геометрические образы и их отображения на плоскости приблизить решение проблемы построения молекулярной векторной машины и биокомпьютера, вскрыть новые свойства и получить знания о потенциальных возможностях генетического кода всех живых существ, включая человека, как субъекта-аналога в системах "Человек – Машина", так и объекта создания антропоробота.

Приведенный в работах [1, 2, 3] обзор объекта анализа – структуры триплетного генетического кода – позволил выделить следующие формы его описания и представления: *вербальную; табличную; плоскими фигурами* (например, в виде круга, кольца); *схемную; интерпретацию дуплетного* генетического кода с различными типами возможных переходов азотистых оснований ($\alpha \leftrightarrow \beta$, $\beta \leftrightarrow \gamma$ и $\alpha \leftrightarrow \gamma$), а также *пространственную структуру триплетного* генетического кода (правда, вне связи с геометрическими образами, соответствующими, например, телам Платона, или геометрическими формами групп Кюри [4]).

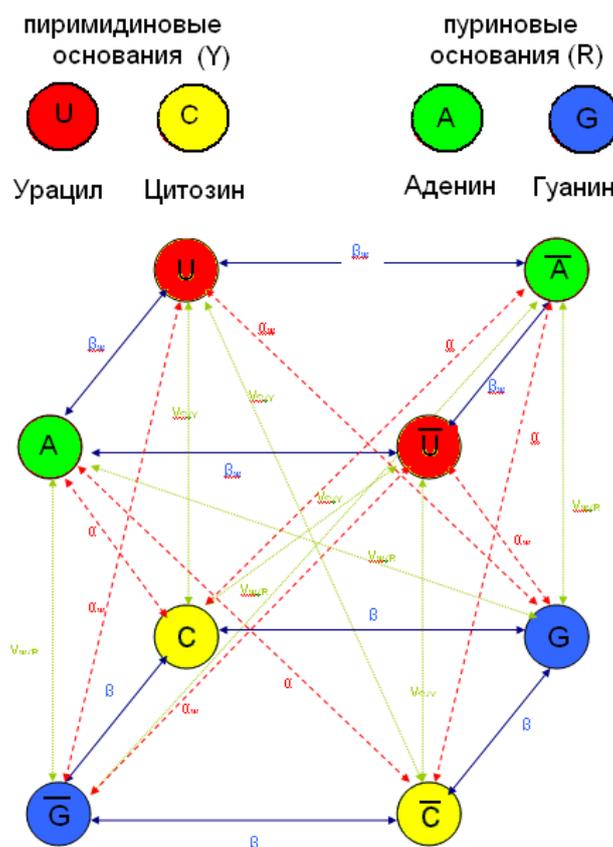


Рис. 1. Объемное представление связей (переходов) между азотистыми основаниями U, C, A, G:

α - $C \leftrightarrow A$, (α_s) - редкий пунктир; $G \leftrightarrow U$, (α_w) - сплошная линия;
 β - $C \leftrightarrow G$, (β_s) - редкий пунктир; $U \leftrightarrow A$, (β_w) - частый пунктир; γ - $C \leftrightarrow U$, ($\gamma_s, (Y)$);
 $G \leftrightarrow A$, ($\gamma_w, (R)$) – сплошные линии

К числу **требований**, которым (по мнению авторов статьи) должны удовлетворять представления о *пространственной структуре триплетного генетического кода* и его *изображений на плоскости*, относятся следующие:

- **наглядность** - пространственное его представление в виде визуально распознаваемых геометрических фигур и их признаков (форма, месторасположение, цвет, ориентация, размеры), включая проекции их объемного изображения на ортогональные плоскости в различных ракурсах. **Изображение априори принадлежит окружающему миру, поэтому объективные законы и известные свойства этого мира – есть законы и свойства изображения** [4];

- **системность**, как отражение в сознании человека ассоциации цельно - структурированного образования (образа, или материализованного объекта), включающего в себя все необходимые и достаточные компоненты, имеющие между собою отношения взаимосвязи (система – «объект») и взаимодействия (система – «процесс»);
- **полнота**, как визуально воспринимаемый в различных ракурсах охват конечного числа компонентов триплетного генетического кода (триплетов или кодонов, всего их - 64), включая своеобразные «дорожные знаки» (Met и STP). Кроме того, это требование включает возможность отображения на ортогональных плоскостях единичных связей (переходов) типа α , β и γ , как сильных S (strong), так и слабых W (weak) между азотистыми основаниями (нуклеотидами) U, C, A, G, а также связей их с аминокислотами (всего их - 20);
- **гармоничность**, которая включает в себя симметричность, уравновешенность, пропорциональность (включая «золотую пропорцию»), сбалансированность триплетов и соответствующих им аминокислот;
- **сохранение принципа «золотой фрактальности»** во Вселенной и биологии [5];
- **непротиворечивость** указанных требований схемам, свойствам и результатам построения геометрической модели человека (ГМЧ) [4], как аналога антропоробота.

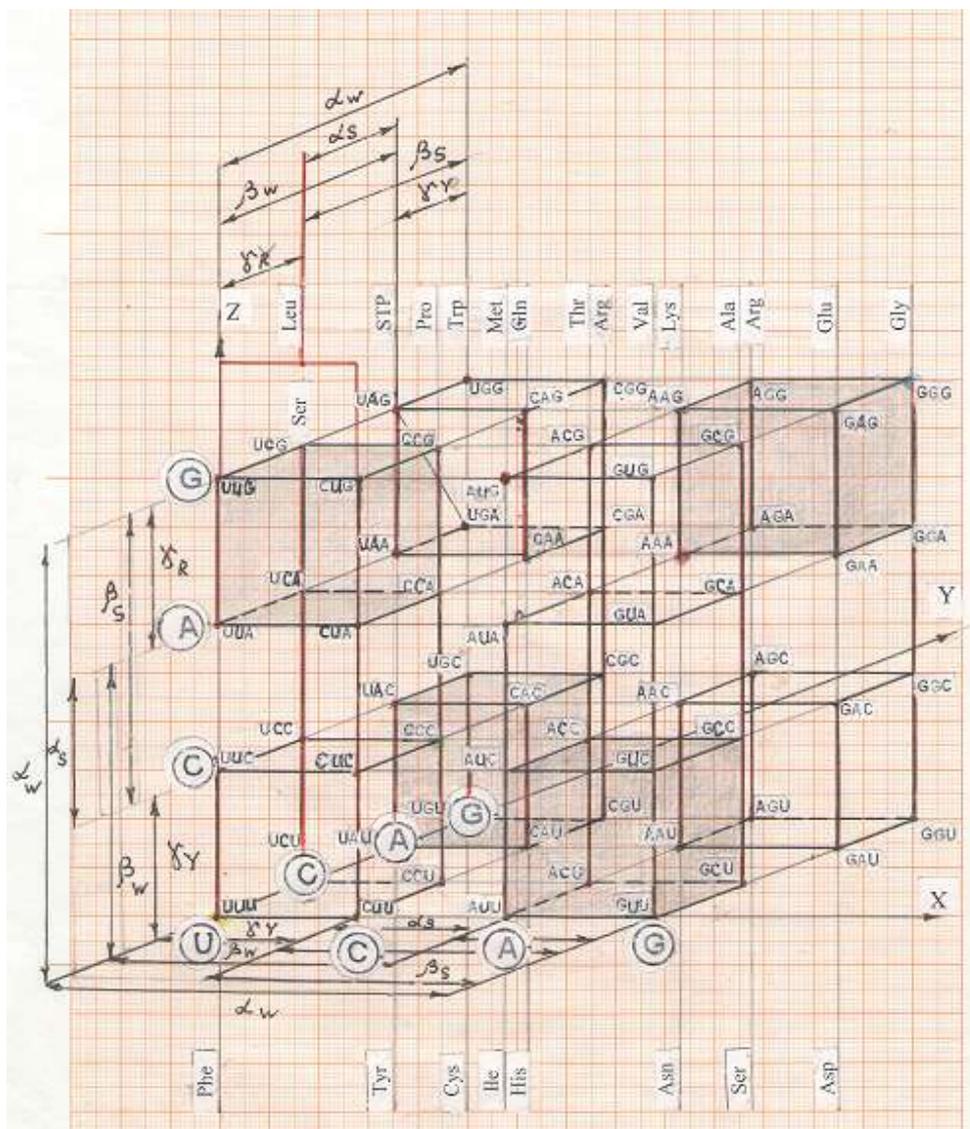


Рис. 2. Пространственная (оси X,Y,Z) структура триплетного генетического кода с обозначениями триплетов, аминокислот и α , β , γ -переходов (связей)

Авторами настоящей статьи **предлагаются следующие принципы построения пространственной структуры триплетного генетического кода и его отображения (изображения) на плоскости:**

1. Принцип отображения в геометрических образах единства (во всем своем многообразии) и целостности в существовании и развитии объектов и процессов по законам гармонии: «все в одном и одно во всем».

2. Принцип так называемой «матрешки», или иерархии, который предполагает унификацию представлений наблюдателя об объектах наблюдения по их изображениям.

Объекты наблюдения представляются в виде унифицированных пространственных геометрических тел в форме кубической решетки (и его оболочки). Они включают локальные структуры биосистем: азотистых оснований U, C, A, G (с переходами α , β и γ) (рис. 1); пиримидиновых (Y) и пуриновых (R) групп азотистых оснований (рис. 1, 2); пространственной структуры триплетного генетического кода в виде решетчатого куба (рис. 2).

3. Вводится понятие **координатного и переходного** способов задания положения триплетов в решетчатом кубе. Точке отсчета системы координат (как **правой**, так и **левой**) может соответствовать любая из вершин решетчатого куба, принадлежащей звездному тетраэдру, состоящему из двух встречных тетраэдров, каждый из которых содержит (включает) по четыре вершины решетчатого куба (рис. 3).

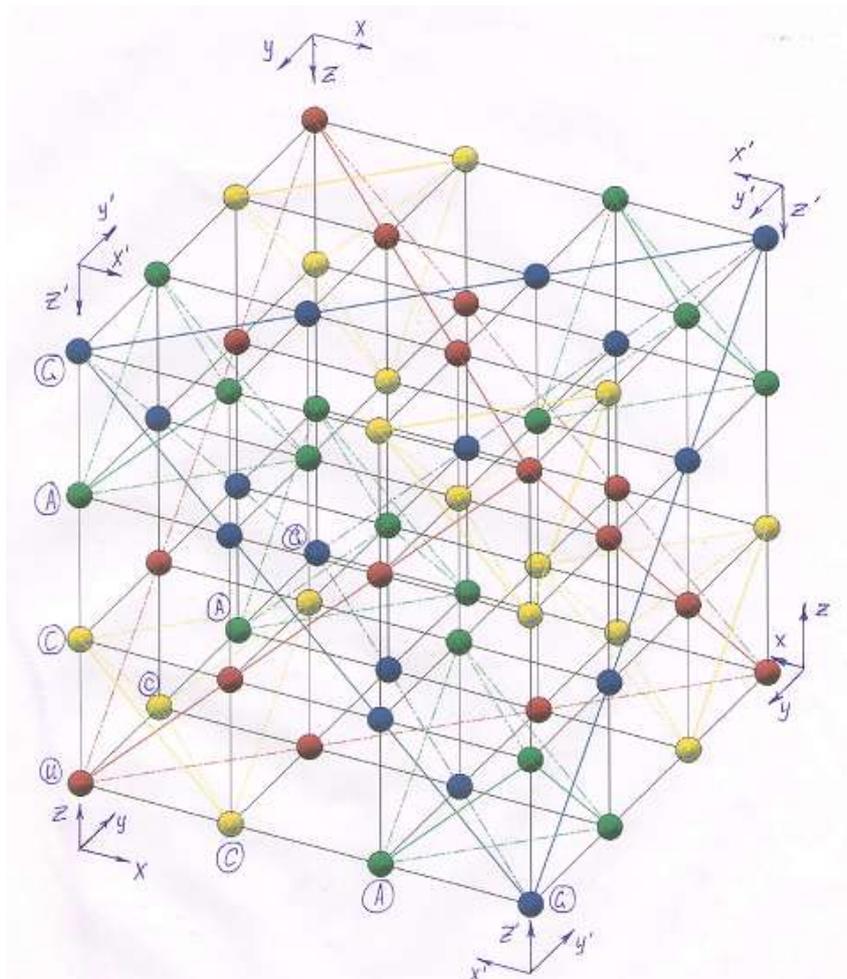


Рис. 3. Пространственное представление в форме решетчатого куба четырехцветных триплетов (узлов) в правой (X, Y, Z) и левой (X', Y', Z') системах координат

3.1. В принятой системе координат (например, правой), по каждой из трех координат X, Y, Z в четырех вершинах первого тетраэдра предлагается откладывать четыре типа азоти-

стных оснований (нуклеотидов) в *прямой* последовательности: U, C, A, G . Для второго тетраэдра (левая система координат X^1, Y^1, Z^1) - в *обратной* последовательности. Адрес триплета в решетчатом кубе определяется считыванием азотистых оснований по осям декартовой системы координат (например, правой) в последовательности кортежа признаков $\langle X, Y, Z \rangle$.

3.2. Четырем нуклеотидам (азотистым основаниям), расположенным на координатных осях X, Y, Z , ставятся в соответствие, например, следующие цвета: U – красный (К); C – желтый (Ж); A – зеленый (З); G – голубой (Г). Порядок считывания нуклеотидов и соответствующих им цветов отражает порядок считывания нуклеотидов для принятой системы координат в последовательности кортежа координат $\langle X, Y, Z \rangle$.

3.3. Существует определенная логика нахождения принадлежности каждого из четырех цветов соответствующим узлам решетчатого куба (рис. 3), который иллюстрирует как *координатный*, так и *переходный* способы задания положения узла решетчатого куба по *итоговому цвету* – *Ц и*.

3.4. Как для *координатного*, так и для *переходного* способов задания пространственного положения узла, итоговые цвета совпадают, но в последнем случае число шагов (фаз) уменьшается на единицу.

4. Свойства *объекта* наблюдения (образа), можно изучать по его изображениям на плоскости, которые визуальны воспринимаются *субъектом* наблюдения в двух вариантах.

4.1. *Субъект* наблюдения – наблюдатель (одна «точка зрения») стационарен. *Объект* наблюдения может быть либо неподвижен (стационарен) относительно наблюдателя («статика») в соответствующих ракурсах, как проекциях на ортогональные плоскости изображений, либо подвижен относительно наблюдателя («динамика»), когда объект наблюдения изменяет в пространстве и во времени свое положение.

4.2. *Объект* наблюдения стационарен. Множество *субъектов* наблюдения («наблюдатели») имеют множество «точек зрения» и как бы вписываются в сферу восприятия объекта наблюдения со стационарных мест, либо отдельно взятый наблюдатель изменяет направление визуального восприятия объекта наблюдения.

В любом случае, визуальное восприятие объекта и его изображение зависят от «точки зрения» (поля зрения) субъекта (субъектов), адекватности восприятия объекта и наличия (отсутствия) искажения воспринимающим субъектом объекта восприятия.

5. Узлы решетчатого куба могут принадлежать различным геометрическим телам, включая тела Платона, например, таким, как куб и производные полиэдры, а также геометрическим фигурам групп Кюри - цилиндр, конус, сфера. Для выявления свойств изображений пространственной структуры триплетного генетического кода особый интерес представляют такие геометрические фигуры, как *цилиндры* и *сферы*, которые полностью охватывают все узлы решетчатого куба.

5.1. В случае *цилиндра* (рис. 4), для охвата всех 64 узлов решетчатого куба, достаточно *трех* концентрично расположенных цилиндра с общей осью, перпендикулярной плоскости XU и проходящей через центр симметрии внутреннего квадрата, лежащего в указанной плоскости. Решетчатый куб можно вписать в оболочку, которая представляет собой куб (6 граней, 8 вершин и 12 ребер).

Высота a цилиндров по оси Z равна длине ребра оболочки решетчатого куба и ограничена плоскостью, параллельной плоскости XU . Цилиндры, которым соответствуют радиусы окружностей в поперечных сечениях: R_1 – малый (внутренний), R_2 – средний (промежуточный) и R_3 большой (наружный), пересекают узлы (триплеты) решетчатого куба и соответствующие им аминокислоты (включая, не относящимися к аминокислотам триплеты - «старт»- кодон (Met) и «стоп» – кодон (STP)). Особенно наглядно это проявляется в ортогональной проекции узлов решетчатого куба на плоскость XU (рис. 4).

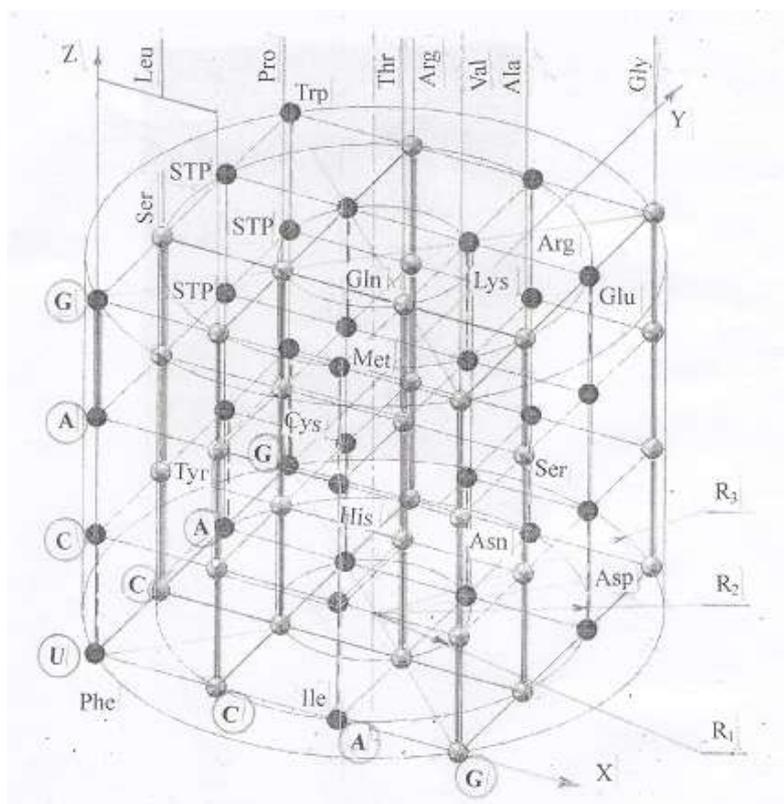


Рис. 4. Концентрические цилиндры (на изображении – эллипсы) с радиусами R_1 , R_2 и R_3 , охватывающие все узлы решетчатого куба и аминокислоты: множество аминокислот M_1 выделено "жирными" прямыми, проходящими через светлые узлы (триплеты); множество M_2 – все остальное

Здесь можно выявить некоторые свойства, а именно:

1) **свойство «золотой пропорции».** Деление отрезка, как разницы радиусов $(R_3 - R_1)$, на неравные части $(R_3 - R_2)$ и $(R_2 - R_1)$ в отношении:

$$(R_3 - R_2) / (R_2 - R_1) = (R_2 - R_1) / (R_3 - R_1) = \Phi^{-1}, \quad (1)$$

где $\Phi = 1,6180\dots$ - число Фидия, отражающее отношение «золотой пропорции»; $R_1 = (a \sqrt{2}) / 6$; $R_2 = (a \sqrt{10}) / 6$ и $R_3 = (a \sqrt{2}) / 2$ - формулы определения соответственно малого R_1 , среднего R_2 и большого R_3 радиусов поперечных сечений концентрических цилиндров, охватывающих узлы решетчатого куба; a – ребро оболочки решетчатого куба. Длине ребра соответствует размер квадрата, как проекция его на плоскость XY ;

2) **площадь $S_{3,2}$ кольца, заключенного между окружностями с радиусами R_3 и R_2** , равна площади $S_{2,1}$ кольца, заключенного между окружностями с радиусами R_2 и R_1 , т.е. имеет место соотношение:

$$S_{3,2} / S_{2,1} = (R_3^2 - R_2^2) / (R_2^2 - R_1^2) = 1. \quad (2)$$

3) **площадь $S_{3,1}$ кольца, заключенного между окружностями с радиусами R_3 и R_1** , равна сумме площадей $S_{3,2}$ и $S_{2,1}$, т.е. имеет место равенство:

$$S_{3,1} = S_{3,2} + S_{2,1} = (R_3^2 - R_1^2) = (R_3^2 - R_2^2) + (R_2^2 - R_1^2). \quad (3)$$

Учитывая, что $R_3 = 3 R_1$, можно показать, что имеет место отношение:

$$(R_3 - R_2) / (R_2 - R_1) = (R_1 + R_2) / (R_2 + R_3) = \Phi^{-1}. \quad (4)$$

Отношение (4) справедливо как для окружностей, так и для эллипсов.

4) левая часть равенства в формуле (4) отражает тенденцию развития любых объектов Природы от периферии – к центру («сжатие»), а правая часть равенства (4) – от центра – к периферии («расширение»). В любом случае, сохраняется принцип «золотой фрактальности» [5], т.е. само-подобие Природы («все в одном и одно во всем»), существующей и развивающейся по законам гармонии.

5.2. В случае **сферы** (рис. 5), для охвата всех узлов решетчатого куба, минимальное количество концентрических сфер с общим центром равно **четырем**.

Нетрудно убедиться в том, что для решетчатого куба с периодом решетки h , радиусы сфер равны: $R_B = 3h$ – радиус сферы, охватывающей только внешние вершины решетчатого куба; $R_P = h\sqrt{7}$ – радиус сферы, охватывающей узлы, принадлежащие ребрам оболочки решетчатого куба; $R_T = h\sqrt{3}$ – радиус сферы, охватывающей узлы, принадлежащие граням оболочки решетчатого куба; $R_B = h$ – радиус внутренней сферы, охватывающей узлы кубической решетки.

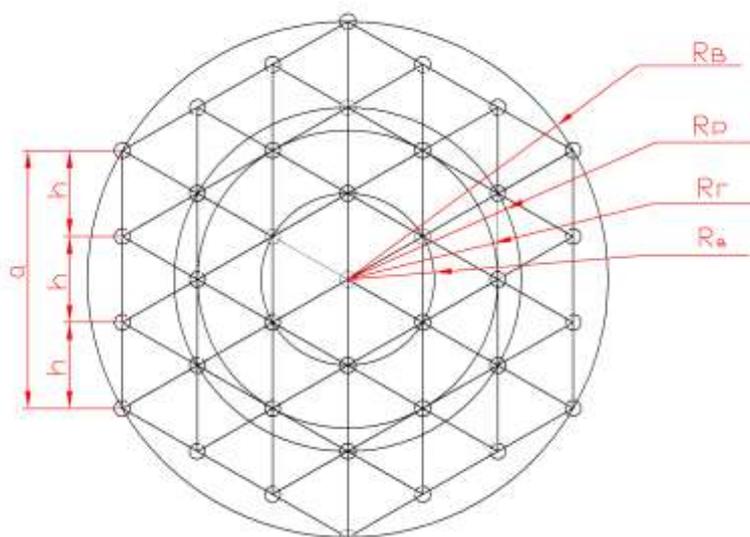


Рис. 5. Концентрические сферы (шестигранники), охватывающие узлы решетчатого куба и имеющие радиусы: R_B, R_P, R_T, R_B

В этом случае имеет место соотношение:

$$(R_B^2 + R_P^2 + R_T^2 + R_B^2) / h^2 = 9 + 7 + 3 + 1 = 20. \quad (5)$$

Обратим внимание на цифры: 1, 3, 7 и 9. В работе [5] подтверждается существование образований (на микро- и макроуровнях) «золотой системы», расстановка которых в целом подчиняется правилу 1: 3: (7-8-9): 27. Заметим, что числу 20 соответствует количество аминокислот, а также количество граней икосаэдра (в виде 20 равносторонних треугольников с 12 вершинами), или вершин додекаэдра (в виде 12 пятигранников с 20 вершинами), как представителями тел Платона. Возможно, что это не случайное совпадение, поскольку Природа едина в своем многообразии, цельно структурирована и подчиняется законам гармонии, которые находят отражение и в Человеке, в частности, в его геометрической модели (ГМЧ) [6].

6. В развитие положения о бинарных цветах (рис. 4), будем разделять следующие две группы цветов (возможны и другие отличительные признаки):

6.1. Цвета (признаки, например, **потенциалы**), которые определяют местоположение (координаты) кодонов в кубической решетке триплетного генетического кода;

6.2. Цвета (признаки), которые выделяют принадлежность этих кодонов к **двум группам аминокислот** (включая «дорожные знаки»), которые принадлежат множествам M_1 (выделено "жирными" вертикальными прямыми) и M_2 (рис. 4).

Множество M_1 однозначно определяется **дуплетами** («равнодушно» к флексиям (кружки - светлые)), а множество M_2 однозначно определяется **триплетами**, («неравнодушно» к флексиям (кружки - темные)).

В случае 6.1 имеет место баланс (и симметрия) потенциалов как по всем ортогональным плоскостям, проходящим через узлы решетчатого куба, так и для всего решетчатого куба в целом (рис. 4). Иными словами, имеет место свойство: **сумма потенциалов узлов решетчатого куба по всем координатным и параллельным им направлениям, а также для всего решетчатого куба, равна нулю.**

В случае 6.2 (рис. 4) также наблюдается баланс (по количеству) и симметрия (взаимное дополнение) двух групп аминокислот, т.е. $M_1 = M_2$.

7. Приведенные ранее соотношения сохраняют указанные свойства даже тогда, когда учитывается **параметр** δ , который меняется в пределах $0 \leq \delta \leq 1$. Изменение параметра δ преобразует (трансформирует) исходный квадрат, вписанный в окружность (при $\delta = 0$), в ромб, которому соответствует эллипс (при $\delta = 1$). Параметр δ является функцией времени ($\delta = \delta(t)$) и входит в параметр $\varepsilon = \varepsilon(t)$, который равен отношению большей полуоси эллипса ($\sqrt{2 + \delta}$) к меньшей ($\sqrt{2 - \delta}$), причем квадрат этого отношения изменяется в пределах от 1 (при $\delta = 0$) до 3 (при $\delta = 1$), т.е. имеет место неравенство:

$$1 \leq \varepsilon^2 \leq 3. \quad (6)$$

Учет параметра $\delta = \delta(t)$ позволяет проследить «динамику» изменения изображений объекта, как отражение развития биологических структур, включая человека и его геометрическую модель - ГМЧ (рис. 6). Характерно, что вспомогательные линии построения ГМЧ проходят через узлы решетчатого куба.

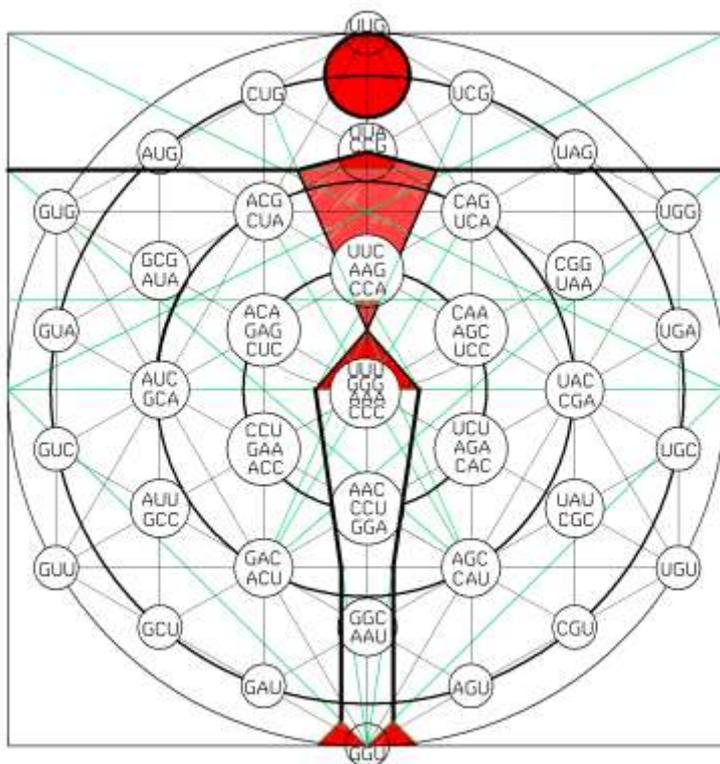


Рис. 6. ГМЧ на фоне узлов (триплетов), охватываемых концентрическими сферами (шестигранниками)

8. Вводится понятие коэффициента визуального восприятия K_v триплетов в решетчатом кубе, как объекта наблюдения субъектом наблюдения с определенного вида восприятия при стационарном положении субъекта при параллельных лучах зрения, соответствующих ортогональным проекциям объекта наблюдения:

$$K_v = (q_1 + q_2 + q_3 + q_4) / 64, \quad (7)$$

где q – количество групп визуально воспринимаемых наблюдателем кодонов (триплетов); цифры 1, 2, 3, 4 соответствуют количеству кодонов, входящих в соответствующую группу q ; 64 – общее число кодонов (триплетов).

Коэффициент K_v отражает вероятность получения полной информации по всем 64 кодонам (триплетам), а следовательно и по всем аминокислотам. Для различных поворотов (ракурсов) решетчатого куба относительно оси (параллельной оси Z) концентрических цилиндров при стационарном положении наблюдателя во фронтальной проекции (перпендикулярно оси Z), K_v принимает значения от 0.25 (при $q_1 = q_2 = q_3 = 0$, $q_4 = 16$) до 1,00 (при $q_1 = 64$ и $q_2 = q_3 = q_4 = 0$). В частности, при $q_1 = 4$, $q_2 = 6$, $q_3 = 0$ и $q_4 = 0$ и при $q_1 = 8$, $q_2 = 2$, $q_3 = 0$ и $q_4 = 0$) он принимает значение 0.625, что близко к соотношению «золотого сечения». Если луч зрения наблюдателя проходит через диагонально противоположные внешние узлы решетчатого куба, то значение коэффициента также составляет $K_v = 0,625$ (при $q_1 = 18$ и $q_2 = 12$, $q_3 = 6$ и $q_4 = 4$). Проекции указанных сфер, воспринимаемых наблюдателем на плоскости изображений, представляются в форме вписанных в них четырех шестигранников (рис. 6).

9. Существует проблема определения пространственной структуры организации белковых молекул и их функций в рамках направления «структурной геномики» [7]. Авторами выдвигается *гипотеза* о том, что трехмерной структуре белковых молекул соответствует маршрут, образованный последовательностью триплетов и аминокислот в решетчатом кубе.

Библиографический список

1. **Ичас, М.** Биологический код / М. Ичас. – М.: Мир, 1971. – 351 с.
2. **Волохонский, А.Г.** О формальной структуре генетического кода // Цитология и генетика. 1972. № 6. С. 487–492.
3. **Карасев, В.А.** Введение в конструирование бионических наносистем / В.А. Карасев, В.В. Лучинин. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009. – 464 с.
4. **Компьютерная обработка изображений. Анализ и синтез:** в 2 ч.: учеб. пособие / В.А. Утробин; Нижегород. гос. техн. ун-т. Нижний Новгород, 2003. – 228 с.
5. **Якимова, Н.Н.** Фрактальная Вселенная и золотое отношение: Структурное и ритмическое единство мира / Н.Н. Якимова. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2008. – 368 с.
6. **Информация. Наноструктурные процессы и фракталы во Вселенной и биологии** / Ю.Г. Кабалдин [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре: КнАНТУ. 2009. – 336 с.
7. **Чугунов, А.** Полет бабочки, или немного о пользе структурной геномики // Наука и жизнь. 2010. №1. С. 22–24.

Дата поступления

В редакцию 07.02.2011

U.G. Kabaldin, V.I. Dementev, T.U. Ryzhova

SPATIAL STRUCTURE OF TRIPLET GENETIC CODE AND SOME OF ITS PROPERTIES IN PLANE IMAGES

A new approach to the spatial structure of triplet genetic code (STGK), in addressing the problem of constructing molecular vector machines and biocomputer. Identified properties spatial (STGK) in flat images that reflect its connection with Platonic solids, groups Curie, triplets (codons), and transitions amino acids, as well as the geometric model of a person (GMP), as analog structure anthropo-robot, or operator in an ergonomic system "man - machine".

Key words: genetic code triplets, amino acids, "Golden proportion", the body of Plato, the geometric model of a human (GMP), the system "man - machine".

УДК 621.793

В.Е. Кучма¹, Т.В. Рябикина¹, С.Ю. Мякишева²**ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ ДЛЯ НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ ХОЛОДНЫМ
ЧЕРНЕНИЕМ СТАЛЕЙ СОСТАВОМ**Арзамасский приборостроительный завод¹,
Арзамасский политехнический институт (филиал) НГТУ им. Р.Е. Алексеева²

Рассматривается новый процесс холодного чернения сталей, его характеристики, структура процесса. Дан анализ способов получения покрытия такого типа.

Проведены эксперименты для выявления оптимальных режимов данного процесса, составлена математическая модель холодного чернения, которая позволяет определить режимы процесса в зависимости от различных параметров (шероховатости поверхности, времени обезжиривания и наполнения) и необходимой коррозионной стойкости покрытия.

Ключевые слова: гальванические покрытия, холодное чернение, оптимальные режимы, коррозионная стойкость, шероховатость поверхности.

Современная технология нанесения покрытий имеет одной из своих основных задач повышение качества изготавливаемых поверхностей деталей и, как следствие, улучшение эксплуатационных свойств машин, для которых они применяются. Повышение качества деталей, изготавливаемых из конструкционных сталей и эксплуатирующихся в условиях коррозионного воздействия окружающей среды при знакопеременных нагрузках, безусловно, относится к числу актуальных проблем.

Обеспечить безотказность их работы можно только в случае качественной обработки поверхности деталей. Получить высокие эксплуатационные показатели таких деталей невозможно без применения технологии нанесения защитного покрытия, в частности, холодного чернения.

Актуальность исследований по повышению качества и эксплуатационных свойств подтверждается спросом машиностроительных предприятий на новые технологии гальванических покрытий, которые являются одними из наиболее распространенных методов повышения коррозионной стойкости изделий из стали. Наиболее распространены оксидные и фосфатные покрытия. Эти традиционные способы достаточно энергоемки и продолжительны по времени. На предприятии ОАО «АПЗ» с целью повышения производительности и снижения затрат апробировался способ нанесения антикоррозионного покрытия – холодное чернение (оксидирование) «Insta Blak 333».

Данный способ нанесения гальванического покрытия мало исследован. Проблеме оптимизации режимов гальванических покрытий посвящены научные труды многих ученых. Вопросами определения оптимальных режимов покрытий, по своим свойствам сходных с процессом холодного чернения (горячего оксидирования, фосфатирования, хромирования), в отечественной науке занимались: В.И. Игнатьев, Н.С. Ионычева, А.В. Марейчев, Ю.Д. Гамбург и др. Теоретический подход к этой проблеме вытекает из подробного аналитического литературного обзора по применению методов. Анализ, проведенный по данному направлению, показал, что вопросы оптимизации режимов холодного чернения сталей исследованы недостаточно. Поэтому была поставлена задача, опытным путем исследовать и определить оптимальные режимы технологического процесса холодного чернения сталей составом «Insta Blak 333». Построить математическую модель на основе статистических данных, которая позволит назначать режимы холодного чернения в зависимости от требуемой коррозионной стойкости.

В технических условиях на состав «Insta Blak 333», предоставленный фирмой-производителем, определены лишь максимальные и минимальные значения его концентрации.

Для успешного внедрения нового процесса на предприятии, необходимо было установить зависимость входных параметров, таких как режим холодного чернения, исходная шероховатость поверхности заготовки, а от выходных свойств – толщина слоя покрытия, коррозионная стойкость, цвет и т.д.

Решение поставленных задач следует проводить по схеме:

1. Исследовать качество поверхностного слоя деталей испытываемых образцов и рекомендовать режимы обработки.
2. Исследовать влияние холодного чернения на эксплуатационные свойства.
3. Построить математическую зависимость на основе полного факторного эксперимента типа 2^3 .
4. Экономически обосновать целесообразность предлагаемого метода.
5. Рассмотреть влияние на экологию при работе на гальваническом участке чернения.

Технология нанесения покрытия строилась по схеме, представленной на рис. 1.

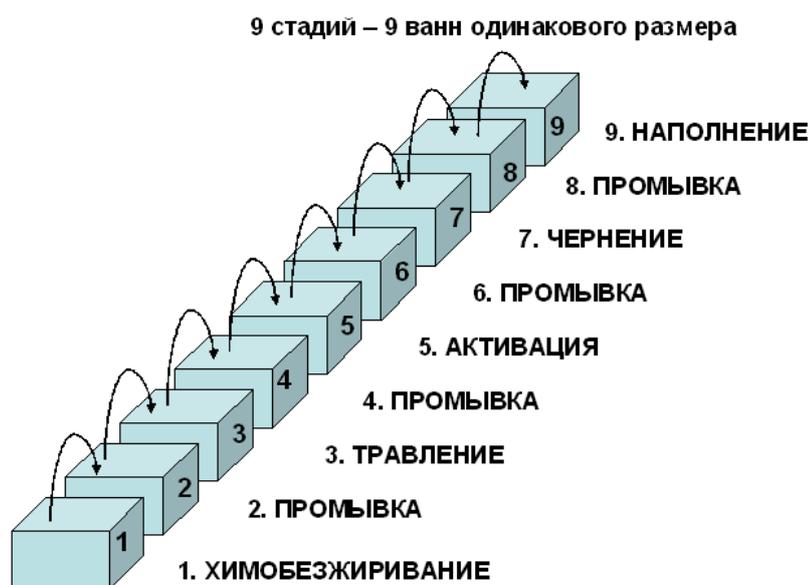


Рис. 1. Схема линии холодного чернения

Обработка проводилась на растворах компании «Сонис». Процесс холодного чернения «Insta-Blak 333» осуществлялся с применением концентратов следующих препаратов:

- 1) химическое обезжиривание «E-Kleen 110»;
- 2) активация «E-Prep 258»;
- 3) чернение «Insta-Blak 333 5X»;
- 4) наполнение (уплотнение) «E-Tek 510».

Химическое обезжиривание применяли с целью удаления смазочно-охлаждающих жидкостей, эмульсий, смазок и ингибиторов коррозии с поверхностей заготовок. *Активация* представляет собой жидкую композицию, обработка в водном растворе которой переводит поверхность стали в активное состояние перед холодным чернением. *Чернение* – это корродирующий водный раствор, который и придает поверхности изделия насыщенный черный цвет. *Наполнение* представляет собой предупреждающий коррозию нефтяной масляный пленкообразующий состав, содержащий эмульгирующие вещества.

В ходе исследования были проведены эксперименты по выявлению оптимальных режимов процесса холодного чернения. Эксперименты ставились на предприятии ОАО «АПЗ» в гальваническом цехе. В качестве образцов были выбраны детали типа тел вращения, кор-

пусные тонкостенные и типа плитки из низкоуглеродистых сталей. Внешний вид деталей с покрытием представлен на рис. 2.

В ходе экспериментов изменялось время: обезжиривания, чернения, активации и наполнения, при различной шероховатости поверхности детали. При этом выходными параметрами являлись внешний вид изделия после покрытия и его антикоррозионная защита. Опыты позволили определить, с помощью метода капли, значения коррозионной стойкости при различных параметрах и режимах технологического процесса.



Рис. 2. Внешний вид деталей, полученных методом холодного чернения

На основании полученных результатов выявлены зависимости свойств получаемого покрытия от режимов процесса холодного чернения и приведены в табл. 1.

Получение оптимальных технологических характеристик (выходных параметров) невозможно без автоматизации технологического процесса; при этом может быть предусмотрено автоматическое регулирование параметров обработки по заранее заданному закону. Так как процесс чернения деталей является защитным покрытием, то в данной задаче основной технологической характеристикой (выходным переменным параметром) является коррозионная стойкость.

Была получена математическая модель, в которой показано влияние шероховатости поверхности основного металла, времени обезжиривания поверхности и времени выдержки в ванне наполнения на получаемую в процессе холодного чернения препаратом «Insta Blak 333» коррозионную стойкость изделия.

На практике при анализе результатов исследований часто имеет место ситуация, когда количественное изменение изучаемого явления зависит не от одной, а от нескольких причин. Построена модель зависимости $K(t_o, t_n, Ra)$ по результатам активных экспериментов. Шероховатость поверхности основного металла под покрытие варьировалась в небольших пределах: от 2,5 до 5.

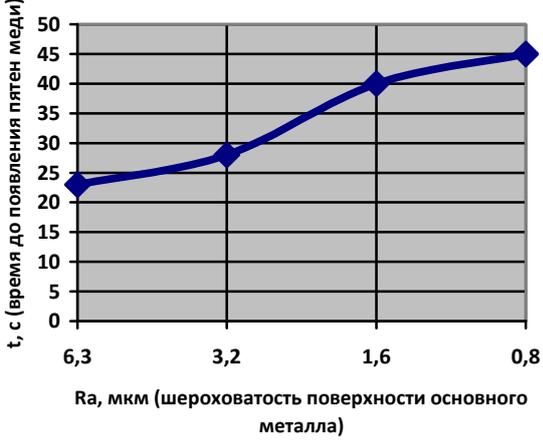
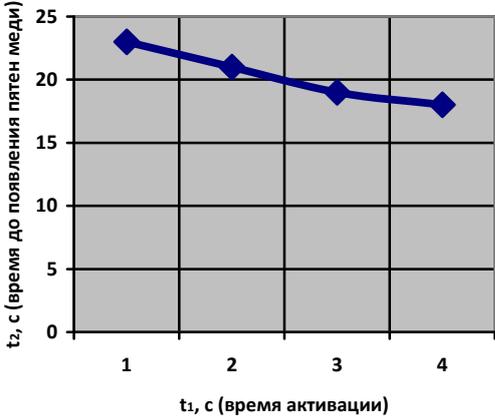
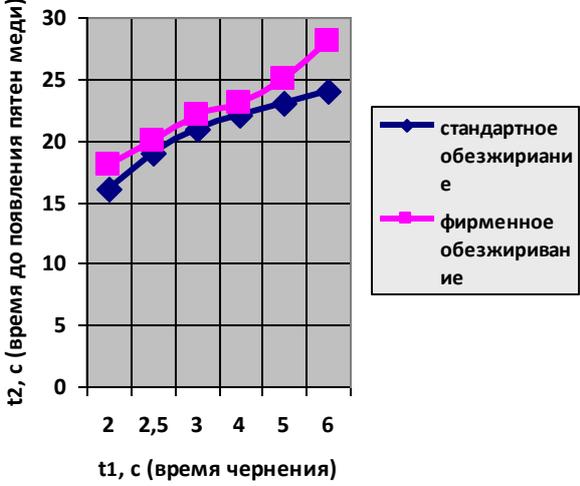
Данная математическая модель построена на основе множественного регрессионного анализа.

$$K = 147,5 + 1,75t_o - 1,75t_n - 4,5Ra - 2,75t_n Ra + 4t_o Ra, \quad (1)$$

где K – коррозионная стойкость поверхности детали после нанесения гальванического покрытия; t_o – время выдержки в ванне обезжиривания; t_n – время выдержки в ванне наполнения; Ra – шероховатость поверхности детали.

Таблица 1

Влияние различных параметров на свойства получаемого покрытия

Зависимость	График																					
<p>Влияние шероховатости поверхности основного металла на свойства покрытия</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика: Влияние шероховатости поверхности основного металла на свойства покрытия</caption> <thead> <tr> <th>Ra, мкм</th> <th>t₁, с</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>6,3</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>3,2</td> <td>28</td> </tr> <tr> <td>1,6</td> <td>40</td> </tr> <tr> <td>0,8</td> <td>45</td> </tr> </tbody> </table>	Ra, мкм	t ₁ , с	6,3	23	3,2	28	1,6	40	0,8	45											
Ra, мкм	t ₁ , с																					
6,3	23																					
3,2	28																					
1,6	40																					
0,8	45																					
<p>Влияние времени активации на коррозионную стойкость получаемого покрытия</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика: Влияние времени активации на коррозионную стойкость получаемого покрытия</caption> <thead> <tr> <th>t₁, с</th> <th>t₂, с</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>23</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>21</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>19</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>18</td> </tr> </tbody> </table>	t ₁ , с	t ₂ , с	1	23	2	21	3	19	4	18											
t ₁ , с	t ₂ , с																					
1	23																					
2	21																					
3	19																					
4	18																					
<p>Влияние времени чернения на свойства покрытия с применением растворов стандартного и фирменного обезжириваний</p>	 <table border="1"> <caption>Данные для графика: Влияние времени чернения на свойства покрытия с применением растворов стандартного и фирменного обезжириваний</caption> <thead> <tr> <th>t₁, с</th> <th>t₂, с (стандартное обезжиривание)</th> <th>t₂, с (фирменное обезжиривание)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>2</td> <td>16</td> <td>18</td> </tr> <tr> <td>2,5</td> <td>19</td> <td>20</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>21</td> <td>22</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>22</td> <td>24</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>23</td> <td>26</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>24</td> <td>28</td> </tr> </tbody> </table>	t ₁ , с	t ₂ , с (стандартное обезжиривание)	t ₂ , с (фирменное обезжиривание)	2	16	18	2,5	19	20	3	21	22	4	22	24	5	23	26	6	24	28
t ₁ , с	t ₂ , с (стандартное обезжиривание)	t ₂ , с (фирменное обезжиривание)																				
2	16	18																				
2,5	19	20																				
3	21	22																				
4	22	24																				
5	23	26																				
6	24	28																				

Выполненные исследования показали, что на коррозионную стойкость, получаемую после покрытия холодным чернением, наиболее существенное влияние оказывает шероховатость поверхности, а также влияние имеет и время обезжиривания и время нахождения в ванне наполнения, что необходимо учитывать при определении коррозионной стойкости. Данная математическая модель имеет погрешность 5%.

В ходе исследования была получена математическая зависимость в виде полиномиальной модели, отражающей влияние режимов холодного чернения на величину получаемой коррозионной стойкости, а следовательно, и на срок эксплуатации изделий. Оптимизация полученных зависимостей позволяет определять рациональные режимы, обеспечивающие получение заданной коррозионной стойкости.

Полученные оптимальные режимы приведены в табл. 2.

Таблица 2

Оптимальные режимы процесса холодного чернения

Операции технологического процесса	Обезжиривание	Активация	Холодное чернение	Наполнение
Продолжительность, мин	5	1	4	1

Годовой экономический эффект от внедрения процесса холодного чернения «Insta Black 333» на предприятии ОАО «АПЗ» составит 150 тыс. руб.

С точки зрения влияния на экологию данный процесс более безопасен, чем стандартный. Для приготовления раствора оксидирования используются неагрессивные водоразбавляемые химикаты без запаха, отсутствует необходимость в мощной приточно-вытяжной вентиляции, как в случае горячего, вредного для здоровья, оксидирования. Опасные едкие вещества с вредными испарениями не применяются; при доливании в раствор отсутствует опасность разбрызгивания горячих химикатов.

Практическая значимость исследования заключается в применении полученных результатов на предприятии ОАО «АПЗ». Процесс холодного чернения с определенными в ходе исследования оптимальными режимами в настоящий момент внедрен на предприятие ОАО «АПЗ».

Библиографический список

1. **Гамбург, Ю.Д.** Гальванические покрытия: справочник по применению / Ю.Д. Гамбург. – М.: Техносфера, 2006. – 216 с.
2. Гальванические покрытия в машиностроении: справочник: в 2 т. / В.И. Игнатъев [и др.]; под общ. ред. М.А. Шлугера. – М.: Машиностроение, Т.1. 1985. – 240 с., Т. 2. 1985. – 248 с.
3. Официальный сайт компании «Гальваническое производство» г. Москва – 2001 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.galvanica-m.ru/#51> (дата обращения: 25.12.2009).
4. Официальный сайт компании «Сонис» – 2001 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sonis-co.ru/016.htm> (дата обращения: 05.12.2009).

Дата поступления
в редакцию 08.02.2011

V.E.Kuchma, T.V.Ryabikina, S.U. Myakisheva

DETERMINING MODES FOR COATING COLD BLACKENING STEEL COMPOSITION

In article new process cold blackened steels, its characteristic, process structure is considered. The analysis of ways of reception of a covering of this kind is given.

Experiments for revealing of optimum modes of the given process are made, is made matematically model cold blackened which allows to define modes of process depending on times-personal of parametres (a roughness of a surface, degreasing time, filling time) and necessary corrosion firmness of a covering.

Key words: galvanic coverings, cold blackened, optimum modes, corrosion firmness, surface roughness.

УДК 311.14

Т.В. Рябикина, О.Н. Старостина

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ И НАСТРОЕННОСТИ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛИ «КОРОМЫСЛО»

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

В работе произведена оценка показателей стабильности и настроенности технологического процесса изготовления детали «Коромысло» на основании статистических методов. Представлено сравнение данных показателей с нормативными показателями процесса. Теоретические исследования выполнялись на основе статистических методов, с использованием графического представления степени важности причин или факторов, влияющих на исследуемую проблему (диаграммы Парето), а также анализа структуры причин и результатов (диаграммы Исикавы).

Ключевые слова: качество, стабильность, снижение брака.

Большинство машиностроительных предприятий сталкиваются с проблемой поиска причин возникновения брака на различных этапах изготовления деталей. Установление причин экспериментальными методами экономически невыгодно. Эти методы не позволяют рассматривать данную задачу всесторонне.

Было предложено исследовать технологический процесс изготовления детали «Коромысло» статистическим методом. Деталь получена из алюминиевого сплава АЛ2 ГОСТ 2685-75. Заготовкой является отливка, полученная литьем под давлением. Технологический процесс механической обработки включает сверленные, фрезерные и слесарные операции.

Для анализа процесса необходимо не только установить, находится ли процесс в статистически управляемом состоянии, но и оценить его реальные возможности удовлетворять предъявляемым к нему требованиям.

В исследуемом технологическом процессе были выявлены типичные виды дефектов, связанные с теми или иными нарушениями хода процесса или неблагоприятными сочетаниями факторов.

Статистические данные по браку, собранные на ОАО «Рикор Электроникс» в период с 2007 г. по апрель 2009 г., представлены на рис. 1.

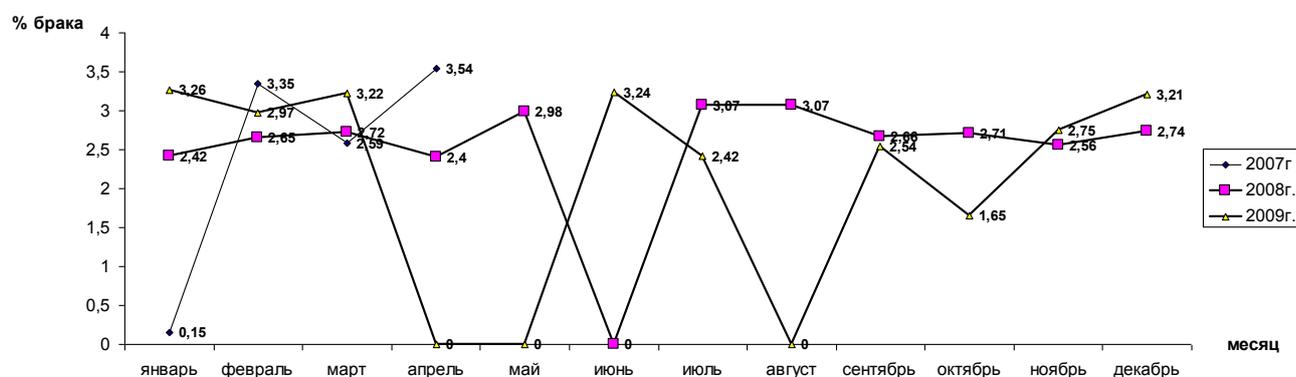


Рис. 1. Данные по браку за отчетный период

Согласно этим данным, выявлено, что наибольший процент брака появляется на заготовительной и сверлильной операциях.

Данные по браку на заготовительной операции сводились в контрольные листы, используемые при приемочном контроле заготовки, выполненные по форме, представленной на рис. 2. Эти контрольные листки удобны для последующего построения диаграммы Парето. Построение диаграммы осуществлялось в несколько этапов.

На первом этапе: определена проблема – большое количество брака. В результате была поставлена задача о выявлении факторов, влияющих на качество заготовок. Собраны статистические данные и определены методы и период сбора данных.

Контроль партии деталей в количестве 1045 штук осуществлялся визуальным контролем в течение месяца. Производилась разбраковка деталей и классификация по выявленным видам дефектов.

Таблица 1

Контрольный листок вида дефектов

Контрольный листок		
Наименование детали: «Коромысло»		Дата: 24.04.09г.
Производственная операция: приемочный контроль		Цех 52 Участок
Тип дефекта: усадочные раковины, газовая пористость, недоливы, «мороз» или узорчатость, задиры или царапины, точечная или загрязненная поверхность		Фамилия контролера
Общее число проконтролированных изделий: 1045		Номер партии: № 122
Примечания:		Номер заказа
Тип дефекта	Результат контроля	Итоги по типам дефектов
Усадочные раковины	///	5
Газовая пористость	/// /	6
Недоливы	/// ///	10
«Мороз» или узорчатость	/// ///	8
Задиры или царапины	///	3
Точечная или загрязненная поверхность	//	2
Другие	///	3
	Итого:	37

На втором этапе разрабатывался контрольный листок для регистрации данных с перечнем видов собираемой информации.

На третьем этапе контролерами осуществлялось заполнение контрольных листков, и подводились итоги.

На четвертом этапе заполнялась табл. 2, в которой отражались все проверяемые признаки (факторы): итоги по каждому признаку отдельно; накопленная сумма; проценты к общему итогу для каждого признака и накопленные проценты. При этом исследуемые признаки располагались в порядке получившейся значимости (то есть по убыванию общего числа зарегистрированных данных). При этом группу «Прочие несоответствия» всегда записывают в последнюю строку.

На пятом этапе производилось построение столбиков диаграмм по видам и количеству несоответствий.

На шестом этапе для показа накопленного влияния причин последовательно сумми-

ровалась высота всех столбиков и определялась ломаная кумулятивная кривая (кривая Парето). Диаграмма Парето по типам дефектов для процесса литья, представленная на рис. 2, позволяла выявить те причины, от которых в первую очередь зависит решение проблемы и на устранение которых следует направлять усилия прежде всего.

Таблица 2

Исследуемые признаки

Виды несоответствий деталей	Кол-во несоответствий, шт.	Суммарное кол-во несоответствий, шт.	Процентное соотношение несоответствий по их видам	Кумулятивный процент несоответствий
1. Недоливы	10	10	27,1	27,1
2. «Мороз» или узорчатость	8	18	21,6	48,7
3. Газовая пористость	6	24	16,2	64,9
4. Усадочные раковины	5	29	13,5	78,4
5. Задиры или царапины	3	32	8,1	86,5
6. Точечная или загрязненная поверхность	2	34	5,4	91,9
7. Прочие несоответствия	3	37	8,1	100,0
	37	-	100,0	-

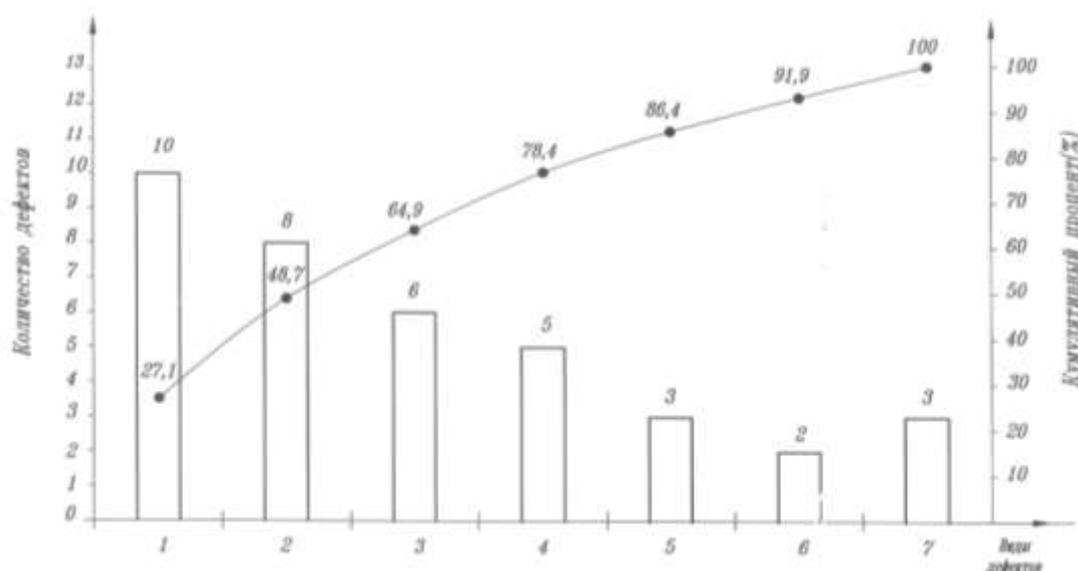


Рис. 2. Диаграмма Парето

Диаграмма Парето не дает возможности расслоения данных, то есть разбивки их на группы. Для более полного анализа возможных причин, приводящих к каким-то следствиям, целесообразно данную диаграмму применять совместно с причинно-следственной диаграммой Исикавы (рис. 2). Это диаграмма показывает отношение между показателями качества и воздействующими на него факторами. Многочисленные факторы влияют друг на друга, т.е. связаны отношением «причина-результат». Знание структуры этих отношений, т.е. выявление цепочки причин и результатов, позволяет успешно решать проблемы управления качеством.

Для составления диаграммы Исикавы были проранжированы факторы по их значимости и установлена структура взаимовлияний. При построении диаграммы выявлены категории и подобраны причины для каждой из них. В этом случае сначала определяют главные категории. Их обычно берут от четырех до шести. Диаграмма типа 5М рассматривает такие категории, как:

- персонал;

- оборудование;
- материал;
- технологический метод;
- средства измерения.

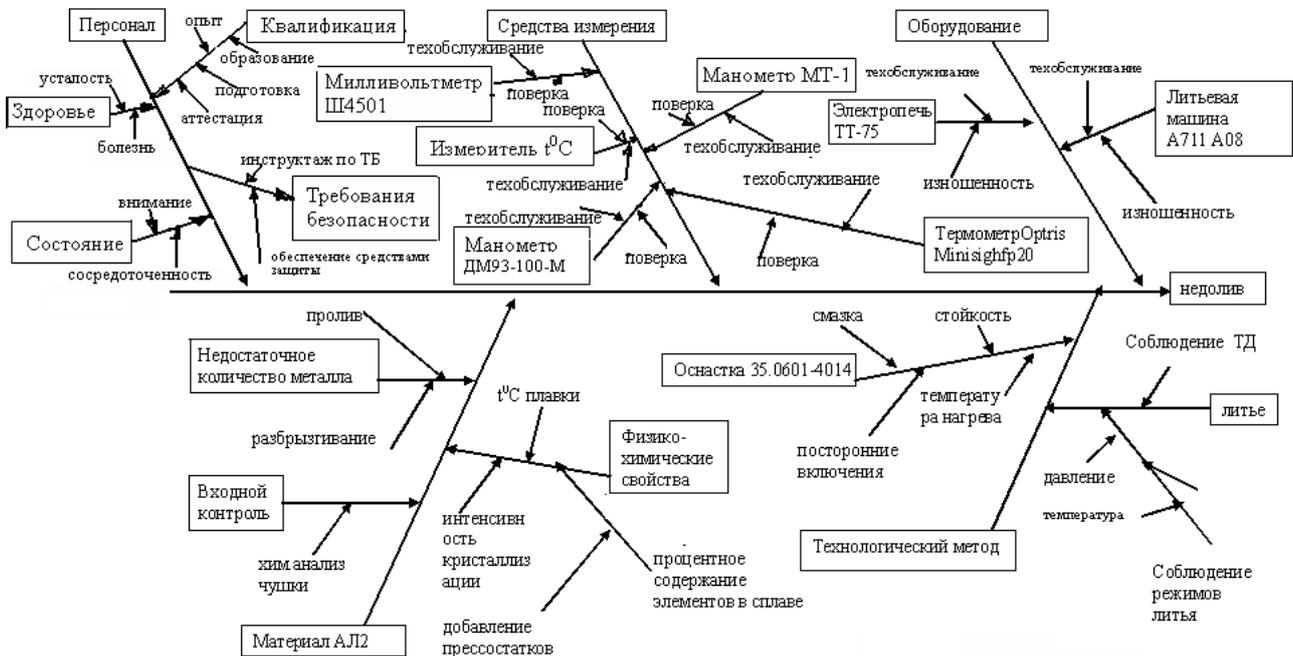


Рис. 3. Диаграмма Искиавы

Диаграммы позволили определить наиболее значимый вид брака на заготовительной операции – недолив, а на сверлильной операции - смещение отверстия диаметром 2,8 мм и необеспечение размера $9,75 \pm 0,15$ мм.

Оценка показателей стабильности и настроенности технологического процесса осуществлялась определением следующих индексов и коэффициентов [2.6.7]:

- индексы, отражающие изменчивость процесса по отношению к техническим требованиям, C_p и P_p ;
- индексы, отражающие изменчивость и настроенность процесса на центр поля допуска по отношению к техническим требованиям, C_{pk} и P_{pk} ;
- коэффициенты воспроизводимости и пригодности (коэффициенты точности процесса) CR и PR .

Для определения показателей процесса производились замеры деталей в количестве 80 штук (рис. 4).

После расчета показателей процесса, проводилось их сравнение с нормативными показателями процесса в соответствии с табл. 3.

Уровень дефектной продукции (доля брака) зависит от возможностей процесса. Доля брака в зависимости от C_{pk} составит 0,046482. Количество несоответствующей продукции на миллион - *ppm* 46482.

Следует отметить, что вычисление индексов воспроизводимости, а также оценка процента или доли брака значительно зависели от контролируемости и прогнозируемости процесса и нормального распределения результатов измерений. Поэтому очень важно располагать данными контрольных карт и гистограмм. Эти два инструмента явились базовыми для демонстрации воспроизводимости процесса.

Параметр	Геометрический размер 9,75±0,15 мм	Цех	52	Оборудование (модель, инв. №)	ГС 2116М
Верхняя граница допуска(USL)	9,9	Изделие (наименование, №КД) Деталь	Модуль педальный	Оснастка (наименование, КД, дублир)	КДБА 7346-4105
Нижняя граница допуска(LSL)	9,6	(наименование, №КД)	Корольство	Средство измерения (наименование, КД)	Микроскоп ММИ-2
Количество групп	16	№КД	7614989.10141.00093	Наименование процесса(операция)	сверлильная

Измерения образцов

Дата изготов-	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	16.05.09	
№ подгрупп.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
n	1	9,81	9,85	9,74	9,8	9,77	9,81	9,92	9,78	9,81	9,83	9,83	9,82	9,86	9,87	9,81	9,78
	2	9,85	9,87	9,82	9,72	9,83	9,86	9,78	9,78	9,75	9,77	9,73	9,77	9,82	9,85	9,85	9,82
	3	9,88	9,9	9,78	9,86	9,89	9,85	9,82	9,82	9,8	9,78	9,81	9,87	9,88	9,82	9,83	9,8
	4	9,89	9,82	9,81	9,88	9,83	9,8	9,8	9,91	9,76	9,84	9,82	9,93	9,76	9,74	9,84	9,75
	5	9,84	9,76	9,84	9,81	9,79	9,75	9,79	9,79	9,84	9,79	9,8	9,83	9,86	9,77	9,9	9,79

Хср	9,854	9,84	9,798	9,814	9,822	9,814	9,822	9,816	9,792	9,802	9,798	9,844	9,836	9,81	9,846	9,788
R	0,08	0,14	0,1	0,16	0,12	0,11	0,14	0,13	0,09	0,07	0,1	0,16	0,12	0,13	0,09	0,07

Общее число деталей	Общее выборки	Хср	Rср	Индексы воспроизводимости				Индексы прогодности				Смещение	
				Ср		Срк		Рр		Ррк		абсолютное	относительное
80	5	9,819	0,113	1,028	удовл.	0,559	неудовл.	1,08	удовл.	0,59	неудовл.	0,0685	22,83%

Индексы возможностей	0...1	1...1,33	1,33...∞	Фактические возможности процесса	46482 ppm
Критерии	неудовл	удовл.	хор.	Потенциальные возможности процесса	2080 ppm

Рис. 4. Карты оценки возможностей процесса

Таблица 3

Нормативные показатели процесса

C_p, P_p, C_{pk}, P_{pk}	< 0,67	0,67 ... 1,00	1,00 ... 1,33	1,33...1,67	≥ 1,67
Возможности процесса	неудовлетворительные		удовлетворительные	хорошие	
Состояние процесса	Процент брака превышает 4,56%	Вероятность появления брака 4,56%	Вероятность появления брака 0,27%	Идеальное состояние процесса	Появление брака не угрожает

Наиболее эффективным методом контроля состояния процесса во времени является построение и анализ контрольных карт. Контрольные карты позволяют воздействовать на процесс до того, как он выйдет из-под контроля, и тем самым предупреждать отклонения процесса от предъявляемых к нему требований. Они являются основным инструментом статистического управления качеством и применяются для сравнения получаемой по выборкам информации о текущем состоянии процесса, с контрольными границами, представляющими пределы собственной изменчивости (разброса) процесса.

Количественные данные представляют собой наблюдения, полученные с помощью измерения и записи значений характеристик для каждого фактора, рассматриваемого в подгруппе.

В зависимости от того, по каким статистическим характеристикам осуществляют статистическое управление процессом, различают следующие виды контрольных карт:

- карты среднего (\bar{X}) и размахов (R) или выборочных стандартных отклонений (s);

- карта индивидуальных значений (X) и скользящих размахов (MR);
- карта медиан (Me) и размахов (R).

Построение контрольных карт осуществлялось для средних арифметических отклонений и размахов (\bar{X} - и R -карты) и начиналось с подготовки бланка контрольных карт. \bar{X} - и R -карты строятся одна над другой: \bar{X} -карта над R -картой и выше указывается блок данных. Значения \bar{X} и R откладывались на вертикальных осях, номера подгрупп - на горизонтальных осях [7].

Наносимые на карту характеристики – средние выборок \bar{X} и размахи выборок R для каждой подгруппы показали поведение среднего значения и его разброс соответственно. Для каждой подгруппы вычислялись \bar{X} и R . Для начального периода обследования и вычисления контрольных границ находили средние значения размахов и процесса $\bar{\bar{X}}$.

Для построения на контрольных картах, среднего размаха и среднего процесса, проводились сплошные горизонтальные линии со значениями \bar{R} и $\bar{\bar{X}}$ соответственно. Контрольные границы наносились штриховыми линиями. На период начального обследования их рассматривали как пробные контрольные границы.

Оценка возможности и стабильности процесса представлена на рис. 5.

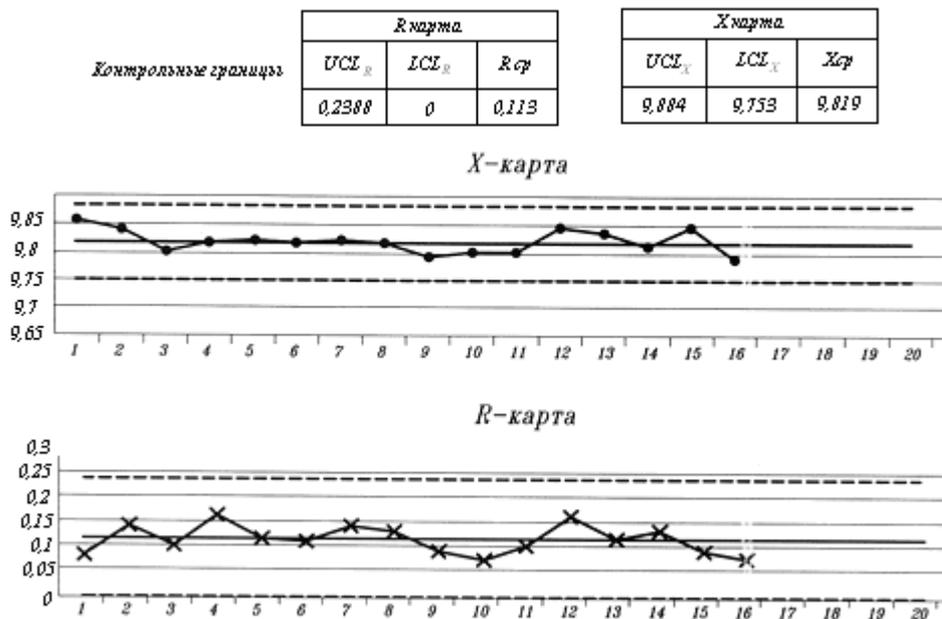


Рис. 5. Оценка стабильности процесса

Согласно полученным данным по гистограмме частот, контрольным картам и расчетам индексов воспроизводимости и пригодности можно сделать вывод, что возможности процесса хорошие, так как $C_p > 1$, но настройка на центр поля допуска смещена, так как $C_{pk} < 1$. Необходимо добиться смещения среднего значения поля допуска ближе к центру. По гистограмме частот видно, что есть выход за верхнюю границу - имеет брак. Брак составляет $ppm = 46482$, а потенциальные возможности процесса $ppm = 2080$. Средние значения и размахи не выходят за контрольные границы и на карте отсутствуют тренды, это свидетельствует о том, что процесс стабилен.

В технологическом процессе размер $9,75 \pm 0,15$ мм обеспечивается оснасткой, по результатам исследований получилось, что ppm завышено. Для повышения эффективности процесса при механической обработке и снижения уровня ppm предлагается спроектировать кондуктор с гидроприводом. Это обеспечит точное базирование, постоянство сил, закрепленные детали, обеспечит настроенность процесса на центр поля допуска и снизит уровень де-

фектной продукции. Данная методика апробирована на ОАО «Рикор Электроникс» и может быть применена на любом машиностроительном предприятии с целью выявления и исключения брака в технологических процессах механической обработки.

Библиографический список

1. **Тартаковский, Д.Ф.** Метрология, стандартизация и технические средства измерений: учебник для вузов / Д.Ф. Тартаковский, А.С. Ястребова. – М.: Высш. шк., 2002. – 205 с.
2. **Круглов, М.Г.** Управление качеством: учеб. пособие / М.Г. Круглов, Г.М. Шишков. – М.: МГТУ Станкин, 1999. – 234 с.
3. **Биктимиров, Р.Л.** Управление качеством и персоналом на промышленных предприятиях / Р.Л. Биктимиров [и др.]. – М.: Изд-во Глобус, 2004. – 522 с.
4. **Кирдеев, Ю.П.** Обеспечение надежности машин: учеб. пособие для вузов / Ю.П. Кирдеев, А.В. Корнилова. – М.: ИЦМГТУ Станкин, 2002. – 148 с.
5. **Суслов, А.Г.** Научные основы технологии машиностроения / А.Г. Суслов, А.М. Дальский. – М.: Машиностроение, 2002. – 376 с.
6. **Старостина, О.Н.** Исследование причин появления брака в отливках при изготовлении детали «Коромысло» / О.Н. Старостина, Т.В. Казарина // Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении: межвуз. сб. ст. по материалам Всероссийской научно-технической конференции / НГТУ-АПИ НГТУ. – Нижний Новгород. – Арзамас. 2007. С. 216–220.
7. **Казарина, Т.В.** Оценка показателей стабильности и настроенности технологического процесса изготовления детали «Коромысло» / Т.В. Казарина, О.Н. Старостина // Будущее технической науки: тез. докл. VII Международной молодежной научно-технической конференции. 2008. №7. С. 230-231.

*Дата поступления
в редакцию 08.02.2011*

T.V. Ryabikina, O.N. Starostina

RESEARCH OF STABILITY AND ATTITUDE OF PROCESS OF MARRING OF DETAIL «YOKE»

The estimation of indexes of stability and attitude of technological process of making of detail is in-process produced "Yoke" on the basis of statistical methods. Comparing of these indexes is presented to the normative indexes of process. Theoretical researches were executed on the basis of statistical methods, with the use of graphic presentation of degree to importance of reasons or factors, influencing on the prospected problem (Pareto charts) and analysis of structure of reasons and results (diagrams of Ishikava).

Key words: quality, stability, decline of marriage.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.533:621.64

В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, К.Б. Вешняков, П.А. Горбунов

РЕГУЛИРУЮЩИЕ УСТРОЙСТВА СИСТЕМЫ ПАССИВНОГО ОТВОДА ТЕПЛА ДЛЯ АЭС «КУДАНКУЛАМ» (ИНДИЯ)

ОАО «ОКБМ И.И. Африкантов»

В проектах АЭС «Куданкулам», НВАЭС-2, АЭС «Белене» предусматривается система пассивного отвода тепла (СПОТ) с контуром воздушного охлаждения. Устойчивая работа СПОТ, необходимая скорость расхолаживания реактора в режиме "горячего" резерва достигаются с помощью регулирующего устройства, работающего пассивно от давления пара второго контура по определенному алгоритму либо от пружины при дистанционном открытии. В статье приведены результаты конструкторских и экспериментальных исследований регулирующих устройств, которые к настоящему времени изготовлены и поставлены на строительную площадку 1 и 2 блоков АЭС "Куданкулам" (Индия).

Ключевые слова: система пассивного отвода тепла, регулирующее устройство, Куданкулам.

Введение

Разработка пассивных систем отвода остаточных тепловыделений реакторных установок (РУ) в аварийных ситуациях является одной из важнейших задач при проектировании систем безопасности. Эта задача может решаться путем использования некоторого запаса воды в парогенераторах (ПГ) или отдельных емкостях, размещенных под защитной оболочкой или за ее пределами. В подобных проектах вода аккумулирует энергию остаточных тепловыделений при нагреве и испарении. При этом в процессе развития аварийной ситуации постулируется возможность через определенный промежуток времени после ее возникновения восстановить электроснабжение, подачу охлаждающей технической воды, управление и т.п. Существует ограничение по времени, в течение которого технически оправданные запасы воды позволяют осуществлять пассивное аварийное охлаждение РУ.

При проектировании новых перспективных РУ с реакторами типа ВВЭР в соответствии с современными требованиями закладываются технические решения, направленные на дальнейшее повышение безопасности. В проекте АЭС «Куданкулам», Нововоронежской АЭС-2, АЭС «Белене» используется одно из таких решений – СПОТ с контуром воздушного охлаждения, предназначенная для отвода остаточных тепловыделений от реактора без ограничений по времени в аварийных режимах с потерей других каналов теплоотвода. Кроме того, СПОТ обеспечивает работу другой системы безопасности – пассивной системы фильтрации межоболочечного пространства (ПСФ).

СПОТ включает в себя воздушные теплообменники-конденсаторы, которые по пароводяному тракту соединены с ПГ. Охлаждение теплообменников-конденсаторов осуществляется атмосферным воздухом, естественная циркуляция которого организуется с помощью тяговых труб.

Особенностью СПОТ является воздушный контур охлаждения с регулируемым расходом охлаждающего воздуха, что позволяет поддерживать РУ в разогретом состоянии. Это

достигается с помощью регулирующего устройства, работающего «по прямому действию» давления рабочей среды второго контура, величина которого определяется уровнем остаточных тепловыделений в реакторе.

На протяжении ряда лет ОАО «Атомэнергопроект» совместно с ВНИИАМ, ОАО «Гидропресс», Институтом проблем энергетике национальной академии наук Беларуси, ОАО «ОКБМ Африкантов» и др. выполняли комплекс исследований в обоснование основных характеристик СПОТ. Последние испытания на стенде ОАО «Гидропресс», проведенные в зимних и летних условиях, подтвердили основные проектные параметры СПОТ, в том числе мощность системы при различных температурах атмосферного воздуха, тепло-гидравлические характеристики регулирующего устройства, параметрическую устойчивость работы системы [1].

1. Устройство и характеристики системы

СПОТ предназначена для длительного пассивного отвода остаточных тепловыделений в запроектных авариях с потерей всех источников переменного тока в следующих случаях:

- при герметичном первом контуре, когда в течение не менее суток СПОТ обеспечивает поддержание РУ в разогретом состоянии, из которого возможен быстрый ввод в действие;
- при течах первого контура, когда расхолаживание реакторной установки производится с максимально возможной скоростью совместно с гидроемкостями системы аварийного охлаждения зоны (САОЗ). В этом случае СПОТ обеспечивает частичный отвод тепла от активной зоны, снижая тем самым необходимые производительность САОЗ и продолжительность процесса проливки.

Для регулирования мощности СПОТ в воздушном тракте над теплообменником установлен шибер регулирующего устройства с поворотными лопатками. Управление лопатками осуществляется через передаточный механизм приводом пассивного действия, исполнительный механизм которого работает от давления среды второго контура. При течах первого контура производится полное открытие лопаток шибера дистанционно оператором при использовании энергии сжатых пружин.

Проведены обширные конструкторские, расчетные и экспериментальные исследования, в том числе поиск и обоснование оптимального алгоритма изменения угла поворота лопаток от давления пара, при котором обеспечивается оптимальная скорость расхолаживания и параметрическая устойчивость работы СПОТ. Например, в условиях линейной зависимости угла поворота лопаток шибера от давления в ПГ, показали, что при малых углах открытия лопаток шибера система предрасположена к «низкочастотной» параметрической неустойчивости, что в дальнейшем подтвердилось экспериментально на стенде ТДУ-1 в ОИЭЯИ-Сосны (г. Минск). Причиной возникновения колебаний явилось резкое возрастание модуля производной коэффициента гидравлического сопротивления шибера от угла поворота его лопастей при малых углах их открытия [1].

Для исключения колебаний были разработаны алгоритм и регулирующее устройство для его реализации, которое обеспечивает линейное изменение мощности воздушного канала СПОТ от давления в парогенераторе. Для этого в регулирующее устройство включен передаточный механизм, обеспечивающий соответствующее изменение угла поворота лопаток шибера от давления пара. В основу такого механизма положена кулиса, позволяющая обеспечить практически любую зависимость угла поворота лопаток шибера от давления пара [2]. При этом использована встречная схема поворота лопаток шибера, обладающая более благоприятной для конструктивного исполнения передаточного механизма зависимостью проходного сечения шибера от угла поворота лопаток (рис. 1).

Устойчивость работы системы на основе принятых решений в режиме отвода остаточных тепловыделений была подтверждена расчетным путем, а затем экспериментально.

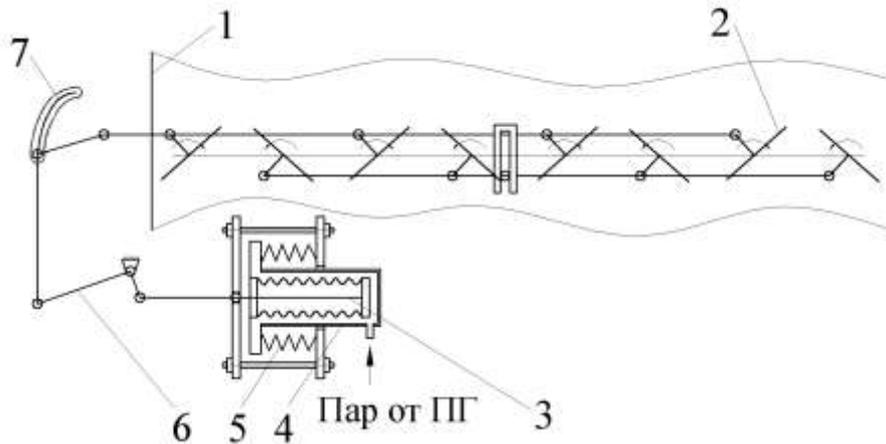


Рис. 1. Кинематическая схема регулирующего устройства системы пассивного отвода тепла:

1 – тяговая труба; 2 – лопатки шибера; 3 – шток привода; 4 – корпус привода; 5 – пружина;
6 – передаточный механизм; 7 – кулиса

2. Экспериментальные исследования регулирующего устройства

Исследования работоспособности СПОТ в эксплуатационных режимах и проверка технических решений на начальном этапе проводились на специально спроектированной для этого экспериментальной установке ТДУ-1. Результаты изменения параметров во времени показаны на рис. 2 [3, 4].

С целью экспериментального подтверждения устойчивости отвода остаточных тепловыделений реактора к атмосферному воздуху и проверки работоспособности регулирующего устройства СПОТ, разработанного и изготовленного ОАО «ОКБМ Африкантов», были проведены испытания на полномасштабной модели в ОАО «Гидропресс» (рис. 3) [5].

Испытания полномасштабной модели на стенде ОАО «Гидропресс» были разделены на два этапа (летний и зимний) для определения влияния температуры окружающей среды на мощность теплоотвода СПОТ и работу регулирующего устройства.

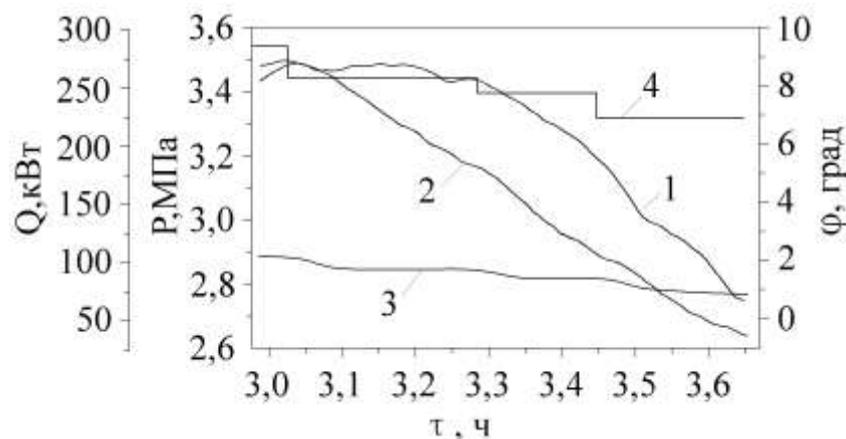


Рис. 2. Изменение угла поворота лопаток (1), давления во втором контуре (2), тепловой мощности, снимаемой системой (3) при изменении мощности первого контура (4) на стенде ТДУ-1

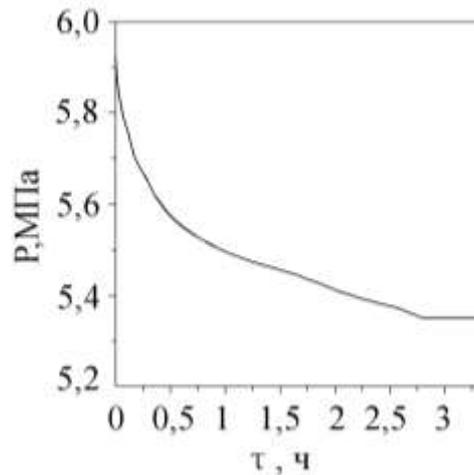


Рис. 3. Изменение давления в парогенераторе на стенде ОАО «Гидропресс» в режиме «горячего» резерва

На первом этапе испытаний зимой 2003 г. проверялась способность регулятора работать по назначению в заданном диапазоне регулирования давления в парогенераторе, от которого зависит отводимая мощность, в том числе определены: сопротивление воздушного тракта регулирующего устройства при различных углах поворота лопаток шиберов; устойчивость совместной работы модели теплообменника и регулирующего устройства.

Результаты экспериментов в целом подтвердили основные проектные характеристики регулирующего устройства (характер изменения угла поворота лопаток от давления пара), обеспечивающие параметрическую устойчивость работы модели СПОТ. По результатам первого этапа испытаний была выполнена доработка регулирующего устройства с целью гарантированного получения требуемых характеристик.

После доработки регулирующего устройства летом 2004 г. проведен *второй этап испытаний*, подтвердивший, что при выбранном алгоритме управления обеспечивается близкое к линейному изменение мощности СПОТ от давления пара в заданном диапазоне регулирования. Гидравлическое сопротивление регулятора в полностью открытом положении пренебрежимо мало и не влияет на отводимую мощность, которая остается той же самой, что и при отсутствии регулятора.

Проведены испытания по определению характеристик регулирующего устройства и изменения основных параметров пароконденсатного тракта при имитации изменения мощности остаточных тепловыделений. Результаты испытаний приведены на рис. 4.

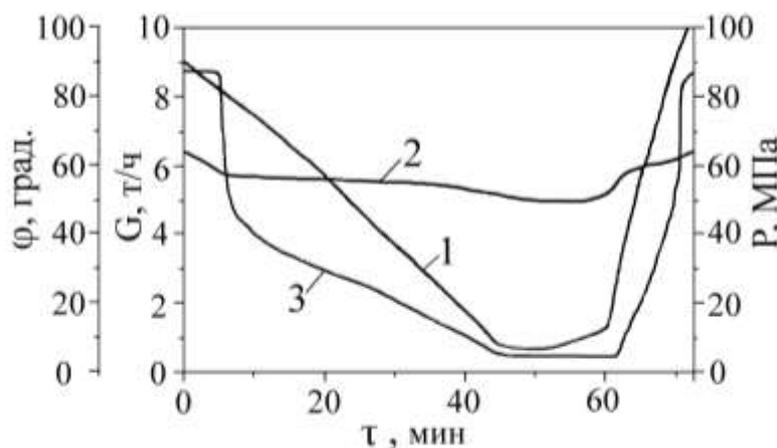


Рис. 4. Зависимость давления пара в модели парогенератора (2) и угла открытия лопаток регулирующего устройства (3) от тепловой мощности (расхода подаваемого пара) (1)

При принятой в проекте зависимости площади проходного сечения (угла поворота лопаток) от давления пара в парогенераторе обеспечивалась устойчивая работа системы пассивного отвода тепла во всем диапазоне углов открытия лопаток регулирующего устройства [1].

В СПОТ с предложенным регулирующим устройством при работе установки в режиме «горячего» резерва обеспечивалось длительное поддержание давления во втором контуре в заданном пределе до существенно меньших значений мощности, чем в СПОТ без регулирующего устройства, т.е. время нахождения установки при повышенных параметрах значительно увеличивается.

3. Результаты изготовления регулирующих устройств

В 2008 году завершены изготовление, испытания и поставка 24 регулирующих устройств СПОТ для двух блоков АЭС «Куданкулам» (Индия) с РУ ВВЭР-1000.

На рис. 5 показан общий вид регулирующего устройства СПОТ АЭС «Куданкулам», в основу которого были положены технические решения, проверенные на стенде ОАО «Гидропресс».

После изготовления регулирующих устройств проводились комплексные испытания головного и серийных образцов. Целью испытаний являлась проверка, подтверждение и контроль соответствия технических характеристик регулирующих устройств требованиям технических условий.

Результаты настройки головного образца и усредненные данные для всех 24 серийных регулирующих устройств приведены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показал, что для всех регулирующих устройств удалось установить требуемый техническими условиями диапазон регулирования, при этом отмечается хорошая сходимости результатов, что свидетельствует о высоком уровне производства и правильности заложенных в проект решений по способам и объемам регулировок.

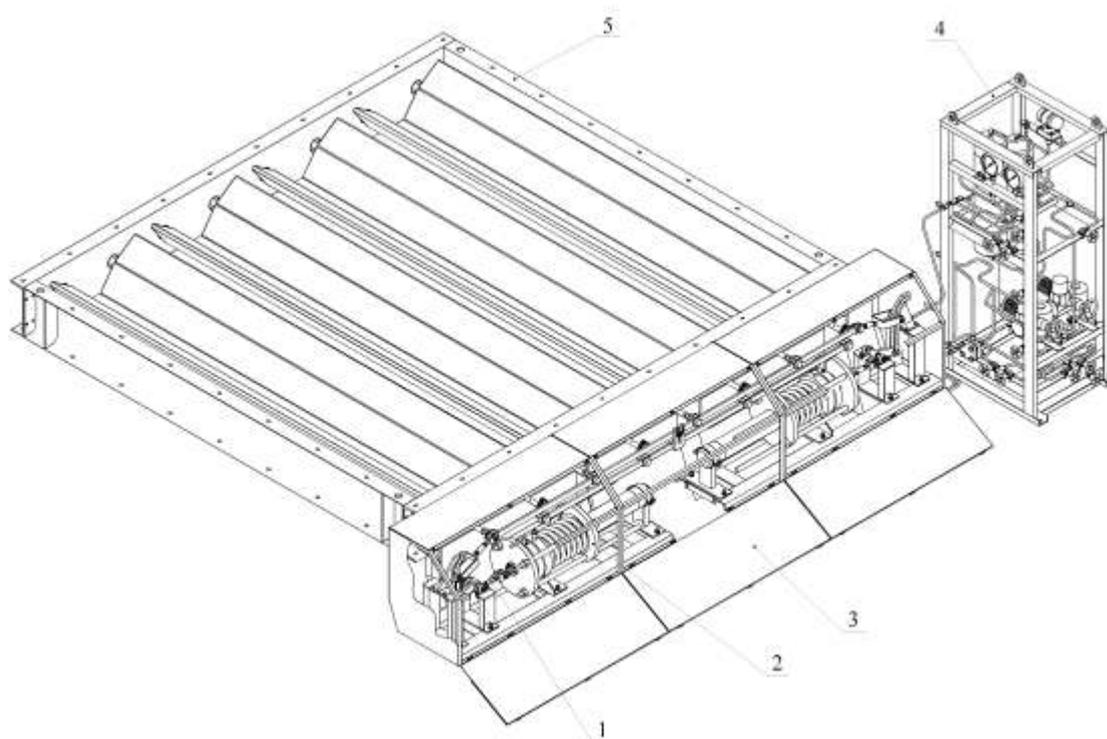


Рис. 5. Общий вид регулирующего устройства для АЭС «Куданкулам»:

1 – передаточный механизм; 2 – привод пассивного действия; 3 – кожух;
4 – блок управления; 5 – шибер

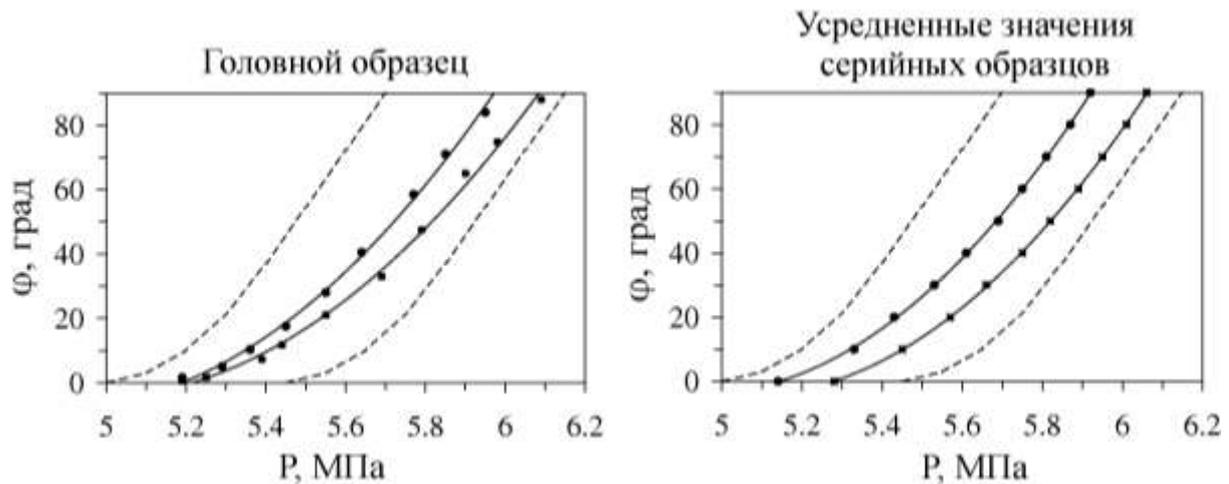


Рис. 6. Зависимость угла поворота лопаток от давления в приводах:
 —■— - открытие; —●— - закрытие; - - - - заданный диапазон регулирования

4. Модернизация регулирующего устройства для новых проектов СПОТ

Полученный опыт проектирования и изготовления регулирующих устройств СПОТ АЭС «Куданкулам» дает возможность их модернизации для новых проектов СПОТ в части: упрощения конструктивного исполнения; снижения стоимости; доработок для удобства монтажа, обслуживания и регулировок; расширения режимов использования.

Одним из путей модернизации регулирующего устройства является реализация режима, при котором дистанционное управление лопатками шиберов обеспечивается при исключении из состава блока управления пневмобаллона и связанной с ним арматуры. Регулирующее устройство дает возможность обеспечить пассивный отвод тепла при давлении пара ниже диапазона регулирования, что исключено в проекте регулирующего устройства СПОТ АЭС «Куданкулам». Режим работы регулирующего устройства для перспективных систем показан на рис. 7.

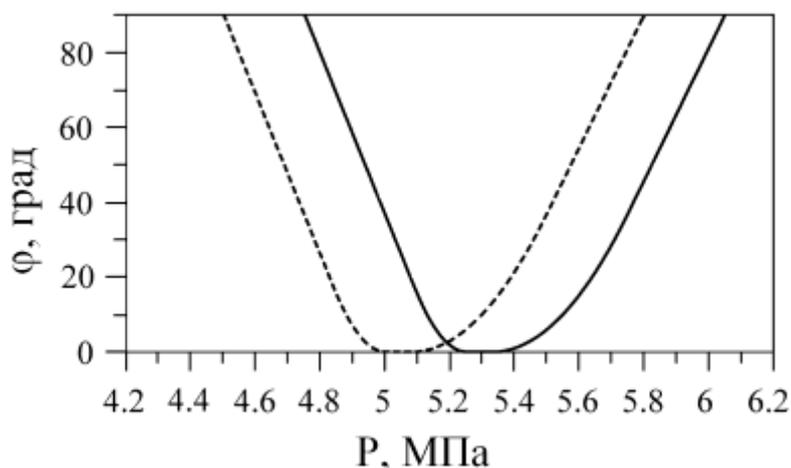


Рис. 7. Режим работы регулирующего устройства для новых проектов СПОТ:
 — - повышение давления; - - - - понижение давления

Модернизированные регулирующие устройства предполагается использовать при проектировании оборудования СПОТ для последующих блоков АЭС «Куданкулам», Нововоронежской АЭС-2 и АЭС «Белене» (Болгария).

Библиографический список

1. **Полуничев, В.И.** Создание и исследование регулирующего устройства системы пассивного отвода тепла для АЭС «Куданкулам» (Индия) / В.И. Полуничев [и др.]. – М.: Атомная энергия, 2007. Т. 102. Вып. 1. С. 49–52.
2. **Пат. 2188354 Российская Федерация, МПК 7 F 16 K 1/22.** Клапан / Полуничев В.И., Плеханов А.А., Шумайлов Г.П.; заявитель и патентообладатель Нижний Новгород ОАО «ОКБМ Африкантов». – № 2188354 ; заявл. 11.09.00 ; опубл. 27.08.02, Бюл. № 24.
3. **Беркович, В.М.** Испытания модели шибера СПОТ с пассивным приводом прямого действия на стенде ТДУ / В.М. Беркович [и др.] // Обеспечение безопасности АЭС с ВВЭР: сб. ст. 3-я научно-техн. конф. / Подольск, 26–30 мая 2003. С. 38.
4. **Полуничев, В.И.** Система пассивного отвода тепла АЭС нового поколения / В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, И.В. Рябиков // Научное обеспечение безопасности использования ядерных энергетических технологий: сб. ст. 14-я ежегодная конф. Ядерного общества России / Удомля, 30 июня – 4 июля 2003. С. 45–47.
5. **Полуничев, В.И.** Обеспечение устойчивой работы системы пассивного отвода тепла АЭС нового поколения / В.И. Полуничев, Г.П. Шумайлов, Д.А. Горностаев. – М.: Теплоэнергетика, 2005. №12. С. 50–54.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2011*

V.I. Polunichev, G.P. Shumailov, K.B. Veshnyakov, P.A. Gorbunov

**PASSIVE HEAT REMOVAL SYSTEM REGULATING DEVICES
FOR KUDANKULAM NPP (INDIA)**

The designs of Kudankulam NPP, NVNPP-2, Belene NPP provide for a passive heat removal system (PHRS) with an air-cooled circuit. Stable operation of the PHRS, required reactor cooldown rate in the "hot" standby mode are achieved by means of a regulating device that is passively operated by the secondary circuit steam pressure according to a definite algorithm or by a spring if opened by remote control. The paper provides results of design and experimental studies for the regulating devices that have been presently manufactured and shipped to the construction site of Kudankulam NPP Unit 1 and 2, India.

Key words: passive heat removal system, regulating device, Kudankulam.

УДК 620.193.27

М.В. Козлов, В.В. Андреев

СОЗДАНИЕ КОРРОЗИОННОСТОЙКИХ ПЛАСТИН ДЛЯ РАЗБОРНЫХ ПЛАСТИНЧАТЫХ ТЕПЛООБМЕННИКОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Показан способ повышения коррозионной стойкости теплообменных пластин пластинчатых теплообменников путем нанесения стойких металлических покрытий методом вакуумного напыления. Слои покрытий наносятся на промышленно изготавливаемые теплообменные пластины, выполненные из широко применяемых нержавеющей сталей марок AISI 304 и AISI 316. Проведены эксперименты по исследованию коррозионной стойкости пластин с защитными покрытиями в лабораторных и полевых условиях.

Ключевые слова: пластинчатый теплообменник, пластина, локальная коррозия, коррозионная стойкость, вакуумное напыление, защитный слой.

Введение

Разборные пластинчатые теплообменники имеют теплообменные пластины, изготавливаемые из широкого спектра металлических материалов. В табл. 1 приведен химический состав ряда материалов, применяемых для производства теплообменных пластин зарубежными производителями [1].

Таблица 1

**Химический состав некоторых материалов, используемых
для изготовления теплообменных пластин**

Материал пластин	Содержание химического элемента в материале, %										
	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	N	Ni	O	Ti
AISI 304	0,08		18-20		Осн				8-10		
AISI 316	0,08		16-18		Осн		2-3		10-14		
2205	0,02		22		Осн		3	0,2	6		
904L	<0,02		20	1,5	Осн		4,2		25		
254 SMO	<0,02		20		Осн		6,2		18		
C-276	<0,02	<2,5	14-16		4-7	<1	15-17		Осн		
Титан ASTM B265 Gr.1	<0,05				<0,1			<0,03		<0,1	Осн

Осн – основной элемент в материале

По экономическим соображениям наиболее часто используемыми материалами для изготовления теплообменных пластин являются нержавеющие стали AISI 304 и AISI 316. Нержавеющая сталь обладает хорошей пластичностью при ее формовке и достаточной стойкостью к коррозии для многих вариантов применений пластинчатых теплообменников. Но в ряде случаев, воздействие водных сред с повышенным содержанием хлорид-ионов приводит к коррозии нержавеющей сталей.

Основным типом коррозии нержавеющей сталей в водных средах при наличии хлорид-ионов для пластинчатых теплообменников является локальная коррозия. Она представ-

ляет собой образование язв на протяженных поверхностях и образование трещин в узких щелевых каналах.

Для водных сред с повышенным содержанием хлорид-ионов рекомендуется использовать для изготовления теплообменных пластин материалы с более высокой коррозионной стойкостью. Такими материалами являются нержавеющие стали с повышенным содержанием молибдена (904L, 254SMO), дуплексные нержавеющие стали (2205) и титан. В табл. 2 приведены предельные концентрации хлорид-ионов в воде, при которых локальная коррозия не возникает в зависимости от температуры водной среды для различных материалов теплообменных пластин.

Таблица. 2

Величины предельной концентрации хлорид-ионов для различных материалов пластин пластинчатых теплообменников

Температура °С	Материал пластин					
	AISI304	AISI316	2205	904L	254SMO	Титан
	Предельная концентрация Cl ⁻ в воде, мг/л					
30	350	900	12000	20000	35000	-
50	200	450	7500	11000	19000	55000
70	150	280	4800	5200	12000	18000
90	80	200	3100	4300	7700	10000

Указанные величины концентрации приведены для изделий, изготовленных из материалов толщиной от 3 мм и выше. При производстве теплообменных пластин пластинчатых теплообменников данные величины концентраций следует снизить в 3-5 раз для нержавеющих сталей по рекомендациям [1, 2] для предотвращения возникновения локальной коррозии. Это обусловлено тем, что типовые толщины теплообменных пластин большинства производителей лежат в диапазоне 0,5-0,7 мм. Также особенностью пластинчатого теплообменника является наличие большого количества узлов уплотнений резина/металл по периметру пластины. При усыхании уплотнительных прокладок происходит просачивание водной среды в подпрокладочное пространство. При испарении части жидкости в атмосферу в подпрокладочном пространстве образуется рассол с более высокой степенью концентрации хлорид-ионов. Что ведет к коррозионному растрескиванию под нагрузкой этого узла выполненного из нержавеющей стали.

Из всех приведенных материалов титан слабее всего подвержен таким типам коррозии и снижению концентрации хлорид-ионов для него производить не требуется.

Сравнивая стоимостные характеристики указанных ранее материалов, следует отметить, что в таблице они расположены по степени возрастания их цены. На сегодня соотношение стоимости титана к стоимости нержавеющей стали AISI 304 достигает десяти раз. Кроме того, для изготовления теплообменных пластин применяется титан особого качества Grade 1. Использование титана низкого качества типа Grade 2 или ниже ведет к увеличению количества брака при производстве теплообменных пластин до 15-30%. Такие высокие требования к качеству титана также увеличивают его дефицитность.

Недостатком же титана по отношению к нержавеющей стали является его худшие механические свойства. Применительно к теплообменной пластине это означает, что для ее изготовления потребуется исходный титановый лист большей толщины, чем лист из нержавеющей стали. В табл. 3 приведены величины максимального рабочего давления для некоторых теплообменных пластин, выпускаемых датской компанией «APV». Давления приведены в зависимости от типа материала пластины и ее толщины.

Таблица. 3

Величины максимального рабочего давления для некоторых теплообменных пластин

Тип пластины	Размеры пластины, мм	Толщина пластины, мм			
		0,5		0,6	
		AISI 304	Титан	AISI 304	Титан
Максимальное рабочее давление, МПа					
H17	268x918	1,15	0,86	1,71	1,13
N35	368x1200	1,15	0,81	1,51	1,13
A085	594x1747	1,90	0,98	2,38	1,46

Видно, что увеличение толщины титановой пластины должно происходить на 0,1-0,2 мм для достижения таких же прочностных свойств, как и для нержавеющей пластины. Таким образом, стоимости теплообменных пластин, выполненных из нержавеющей стали AISI 304 и титана и рассчитанных на одно и то же рабочее давление, могут отличаться друг от друга до 15 раз.

Однако для ряда случаев применений пластинчатых теплообменников, особенно в энергетике, желательно получить недорогую теплообменную пластину с высокой коррозионной стойкостью титана и механическими свойствами нержавеющей стали.

Основная часть

В настоящее время активно применяются различные способы нанесения защитных покрытий на металлические подложки методом вакуумного напыления [3-7]. Основным и наиболее изученным является метод дугового ионного напыления. При таком методе в вакуумной установке зажигается электрическая дуга и за счет этого с материала источника защитного покрытия выбиваются ионы металла. Под воздействием электрического поля поток ионов направляется к покрываемому изделию и внедряется в его поверхность. Первичная стадия процесса заключается во взрывлении поверхностного слоя, затем происходит насыщение поверхностного слоя металлом источника. При введении в процесс нанесения покрытия из защитного металла таких газов, как азот или углекислый газ будет образован слой содержащий нитриды или карбиды металла источника. Такие слои покрытия помимо коррозионной стойкости обладают еще и повышенной прочностью. Толщины наносимых слоев составляют 1-20 мкм, причем возможно нанесение многослойных покрытий с различными физико-химическими свойствами.



Рис. 1. Установка вакуумная напылительная УВН-4ЭД электродуговая

Таким образом, один из вариантов по решению задачи создания недорогой теплообменной пластины, стойкой к коррозии на уровне титана и обладающей хорошими механическими свойствами нержавеющей стали, заключается в нанесении защитного титанового или иного стойкого покрытия на пластину, изготовленную из нержавеющей стали AISI 304 или AISI 316.

Для проведения эксперимента по созданию теплообменной пластины с нанесенным защитным слоем были использованы пластины компании «Sondex» типа S14, изготовленные из нержавеющей стали AISI 316. Габаритные размеры пластины составляют 228x798 мм, толщина пластины 0,5 мм.

Нанесение защитного слоя производилось в выпускаемой серийно вакуумной установке УВН-4ЭД (см. рис. 1).

Выбор такой установки был основан на ее доступности для проведения эксперимента, возможности загрузки в нее плоских изделий большой протяженности и возможности использования в качестве источника нанесения защитного слоя разнообразных металлов. Технические характеристики установки приведены в табл. 4.

Таблица. 4

Технические характеристики установки УВН-4ЭД

Производительность установки	м ² /цикл	1,7
Длительность цикла	ч	1,5
Наибольшие размеры напыляемого изделия	мм	1200x700
Рабочее давление в камере перед напылением	Па	$6,7 \times 10^{-3}$
Потребляемая мощность	кВт	26
Расход охлаждающей воды	л/ч	1300
Габаритные размеры	мм	3350x4400x2080
Масса установки	кг	3500

Такая установка предназначена для нанесения покрытий на металлические и стеклянные листы только с одной стороны. Для обеспечения возможности нанесения покрытия на обе стороны теплообменной пластины в установке было размещено устройство, вращающее пластину вокруг своей оси. Вращение пластины также обеспечило равномерность наносимого слоя защитного металла.

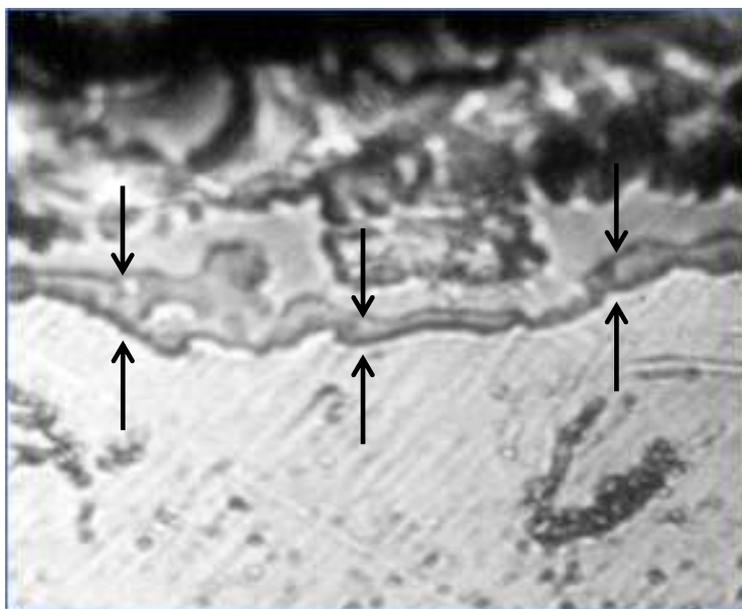


Рис. 2. Фотография микрошлифа образца с покрытием титан

В качестве металлов источника защитного слоя были выбраны титан и хром.

Защитные покрытия были нанесены на десять пластин – по пять штук каждого покрытия. Каждое покрытие было нанесено в течение одного штатного цикла работы установки. На первой группе пластин из пяти штук был сформирован один защитный слой титана толщиной 3-6 мкм. На второй группе пластин из пяти штук был сформирован один защитный слой хрома толщиной 4-8 мкм.

Измерение толщины покрытия производилось следующим образом. Из покрытых теплообменных пластин были вырезаны образцы для исследований. Они заливались в эпоксидную смолу, и делался косой шлиф под углом 45°. После чего проводилось электрохимическое травление для выявления границы покрытия и основного металла. Затем используя микроскоп с увеличением 500 крат, проводилось фотографирование границы и само измерение толщины покрытия. На рис. 2 приведена фотография микрошлифа одного из образцов с защитным покрытием – титан, более темная часть – эпоксидная смола, черными стрелками показана граница покрытия.

Созданное качество слоев защитных покрытий – титан и хром оценивается как высокое. Отсутствуют такие дефекты, как отслоения и поры. Сцепление покрытия с металлом образца оценивается как хорошее. Покрытие равномерное.

Для проведения лабораторных коррозионных испытаний были приготовлены три раствора кислых сред на основе дистиллированной воды:

среда 1 – водный раствор H₂SO₄ 150 г/л (13,9% масс) с добавлением NaCl 1,64 г/л;

среда 2 – водный раствор H₂SO₄ 150 г/л (13,9% масс);

среда 3 – водный раствор NaCl 30 г/л.

В каждую из сред было помещено по три образца с покрытиями титан, хром и без покрытий. Испытания проведены при температуре испытательных сред 80°C.

Образцы пластин были выдержаны в испытательных средах в течение 602 часов, один раз в течение этого периода (через 265 часов) образцы были вынуты и осмотрены, также выемка и осмотр были произведены по окончании испытаний. Каждый раз при выемке образцы промывались дистиллированной водой, затем были высушены при температуре 100°C.

Результаты осмотра образцов теплообменных пластин через 265 часов выдержки в испытательных средах сведены в табл. 5.

Таблица. 5

**Результаты осмотров образцов теплообменных пластин
через 265 часов коррозионных испытаний**

Среда	Результат осмотра
Среда 1 H ₂ SO ₄ +NaCl+H ₂ O	Образцы без покрытия имеют потускневшую поверхность, на ней обнаружены многочисленные коррозионные поражения в виде темных пятен. Образцы с покрытиями титан и хром сохранили металлический блеск поверхности. На поверхности образцов с покрытием хром обнаружено несколько коррозионных повреждений в виде темных пятен.
Среда 2 H ₂ SO ₄ +H ₂ O	Все образцы имеют поверхности с металлическим блеском, зачатков коррозионных повреждений не обнаружено.
Среда 3 NaCl+H ₂ O	Образцы без покрытия потускнели и имеют многочисленные места несквозных повреждений, заполненные отложениями продуктов коррозии. Образцы с покрытием хром сохранили металлический блеск, на поверхности обнаружены несколько пятен потемнения поверхности. Образцы с покрытием титан сохранили металлический блеск, на поверхности обнаружены локальные области, не имеющие металлического блеска (матовые области).

Результаты осмотра образцов теплообменных пластин через 602 часа выдержки в испытательных средах сведены в табл. 6.

Таблица 6

**Результаты осмотров образцов теплообменных пластин
через 602 часа коррозионных испытаний**

Среда	Результат осмотра
Среда 1 H ₂ SO ₄ +NaCl+H ₂ O	Образцы без покрытия имеют многочисленные сквозные и несквозные локальные коррозионные повреждения. Образцы с покрытием хром имеют многочисленные потемнения поверхности. Образцы с покрытием титан имеют несколько потемнений поверхности.
Среда 2 H ₂ SO ₄ +H ₂ O	Образцы без покрытий приобрели поверхность матового оттенка. Образцы с покрытиями хром и титан сохранили металлический блеск поверхности.
Среда 3 NaCl+H ₂ O	Образцы без покрытия имеют многочисленные сквозные и несквозные локальные коррозионные повреждения. Несквозные повреждения заполнены продуктами коррозии. Образцы с покрытием хром сохранили металлический блеск, на поверхности имеются многочисленные темные пятна. Образцы с покрытием титан сохранили металлический блеск, на поверхности обнаружены многочисленные локальные области, не имеющие металлического блеска (матовые области).

Выявление степени коррозионного воздействия осуществлялось путем осмотра образцов через микроскоп с 24 кратным увеличением. Что позволило также определить наличие или отсутствие локального коррозионного повреждения начальных стадий развития.

Для проведения опытно-промышленных испытаний теплообменных пластин было изготовлено пятьдесят пластин типа S14 с защитным покрытием титан. Из указанных пластин был собран пластинчатый теплообменник. В качестве уплотнительной резины использовался материал EPDM – этиле пропилен диеновый мономер. Теплообменник был штатно испытан в процессе сборки на плотность и герметичность испытательным давлением 16 кгс/см² по каждому контуру. Теплообменник был установлен на объекте в качестве подогревателя артезианской минеральной воды для заполнения лечебного бассейна. Подогрев минеральной воды осуществлялся с 2 до 38°С, водой из системы теплоснабжения с температурным графиком 95/70°С. Содержание хлорид-ионов в минеральной воде составило 1400 мг/л.

Опытная эксплуатация продолжалась в течение двух лет со вскрытием и осмотром поверхностей теплообменных пластин каждые шесть месяцев. Результаты вскрытий теплообменника показали отсутствие локальной коррозии на общей поверхности пакета пластин. Однако в точках контакта пластин металл по металлу замечены следы истирания покрытия, из-за трения пластин друг об друга в собранном теплообменнике.

Выводы

По результатам лабораторных коррозионных испытаний можно сделать вывод, что теплообменные пластины с нанесенными однослойными защитными покрытиями имеют более высокую коррозионную стойкость, чем теплообменные пластины без покрытия. Наибольшие защитные свойства к локальной коррозии в водных средах с высоким содержанием хлорид-ионов показало покрытие металлом титан. Покрытие металлом хром менее эффективно, так как на поверхности этого защитного покрытия в процессе коррозионных испытаний образовывались потемнения, по всей видимости, зачатки локальной коррозии. При увеличении сроков выдержки в испытательных средах, скорее всего, произойдет разрушение покрытия хром и возникновение локальной язвенной коррозии на основном металле.

Таким образом, наилучшим покрытием для использования в качестве защиты теплообменных пластин, изготовленных из нержавеющей стали, от локальных видов коррозии в водных средах с содержанием высокого количества хлорид-ионов, следует применять металл титан.

Опытно-промышленная эксплуатация пластинчатого теплообменника показала хорошую коррозионную стойкость теплообменных пластин с однослойным защитным покрытием титан. В процессе эксплуатации выявлен негативный фактор, которым является трение пластин металл по металлу, разрушающий защитное покрытие механическим образом.

Для увеличения коррозионной стойкости защитного покрытия теплообменных пластин следует разработать и применить метод нанесения многослойных покрытий. Покрытие должно состоять как из слоев чистого металла титан, так и слоев нитридов или карбидов титана для повышения прочностных характеристик покрытия. Новое, многослойное защитное покрытие должно обладать коррозионной стойкостью и стойкостью к истиранию как у цельного металла титан.

Библиографический список

1. **Плеш, П.** Высоковакуумная аппаратура в химических исследованиях: [пер. с англ.] / П. Плеш. – М.: МИР. 1994. – 205 с.
2. **Боровушкин, И.В.** Ионно-плазменное напыление режущего инструмента / И.В. Боровушкин. Л.М. Киселев // Труды Сыктывкарского лесного института / СЛИ. – Сыктывкар. 2002. Т. 3. С. 110–114.
3. **Минайчев, В.Е.** Нанесение пленок в вакууме / В.Е. Минайчев. – М.: Высш. шк., 1989. – 110 с.
4. **Крайнов, В.К.** Повышение ресурса работы теплотехнического оборудования ТЭС на основе применения износостойких защитных покрытий // Новое в российской электроэнергетике. 2002. № 2. С. 14–21.
5. **Береснев, В.М.** Покрытия на основе тугоплавких соединений, осаждаемых из потоков металлической плазмы вакуумной дуги / В.М. Береснев, В.Т. Толлок, В.И. Гриценко // Физическая инженерия поверхности / Харьковский национальный университет им. В.Н. Каразина. – Харьков. 2004. Т. 2. № 1–2. С. 109–111.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2011*

M.V. Kozlov, V.V. Andreev

PRODUCTION OF INOXIDIZABLE PLATES TO THE GASKETED PLATE HEAT EXCHANGERS

There is method to increase corrosion stability for heat plates of gasketed heat exchangers by vacuum sputtering of metal with high corrosion stability. The shield layers are coated on typical heat plates. The heat plates are made by stainless steel AISI 304 and AISI 316. There are some corrosion tests of coated heat plates.

Key words: plate heat exchanger, plate, local corrosion, corrosion stability, vacuum sputtering, shield layer.

УДК 621.039

В. И. Мельников, Г. А. Егоров

УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ВОЛНОВОДНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ВИЗУАЛИЗАЦИИ ПОТОКА ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается новая акустическая диагностическая система для высокоскоростной визуализации двухфазных теплоносителей в трубопроводах. Описывается принцип действия, конструктивные особенности и методика визуализации двухфазных потоков. Приводятся результаты экспериментального тестирования этой системы на теплофизическом стенде.

Ключевые слова: двухфазный теплоноситель, диагностика потока, визуализация процесса, ультразвуковые волноводы.

Визуализация потоков в гидродинамическом эксперименте в настоящее время находит все большее применение в связи со своей наглядностью и большой информационной насыщенностью, что позволяет оперативно получать достоверную информацию о сложных процессах, происходящих в элементах энергетического оборудования. При визуализации потока возможности 3D графики на порядок превосходят обычные двухмерные изображения. Современные программы и системы 3D моделирования при необходимости могут создавать объекты и описания процессов со степенью реалистичности, близкой к фотографической. При этом целью визуализации является облегчение понимания процесса и смысла происходящих явлений и позволяет избежать чрезмерных финансовых затрат, сэкономить массу ресурсов при реализации технологического процесса на практике.

Однако наблюдение процессов, происходящих в высокотемпературном потоке теплоносителя, при помощи оптических систем практически исключается ввиду экстремальности условий процесса. Особые трудности возникают при изучении двухфазных пароводяных потоков из-за экранирования ядра потока внешним дисперсным слоем.

Вместе с тем, весьма заманчиво получать информацию о распределении фаз в элементах оборудования на рабочих режимах, что позволяет проверять и корректировать расчетные модели процессов теплообмена. Особенно важна для разработчиков информация о распределении фаз по сечению сборок на выходе теплоносителя из кипящих ТВС, в тяговых участках трубопроводов в контурах с естественной циркуляцией теплоносителя, в различных частях трубопроводов при исследовании аварийных процессов, связанных с разрывом контура. Поэтому разработка диагностических систем, позволяющих наблюдать за характером движения фаз в реальном масштабе времени при высоких температурах и давлениях, представляется актуальной.

Для решения этой задачи предложено использовать так называемые сеточные датчики, а также системы, содержащие множество идентичных датчиков, распределенных по пространству в заранее определенных точках и работающих согласованно в рамках общей информационной системы. По нашему мнению, наиболее подходящими для визуализации потока двухфазного теплоносителя являются ультразвуковые сеточные датчики на основе волноводов продольных волн [1–3].

В данной работе приведены результаты исследований развития технологии визуализации двухфазного потока при помощи ультразвукового волноводного сеточного датчика.

Основными элементами системы высокоскоростной визуализации двухфазного потока являются сеточный датчик, снабженный усилителями и оконечными каскадами генераторов, интерфейс ввода данных и персональный компьютер. Управление процессом визуализации

ции потока, настройка и корректировка параметров, считывание, хранение и анализ полученных данных осуществляется при помощи компьютера (рис. 1).

Сеточный датчик состоит из двух волноводных решеток, размещенных во взаимно параллельных плоскостях перпендикулярно оси течения потока с зазором 1–2 мм (рис. 2). Решетки составлены из восьми волноводов диаметром 0,8 мм, расположенных параллельно. Взаимный угол между волноводами из разных решеток составляет 60° . Все волноводы снабжены пьезоэлектрическими акустическими преобразователями, выведенными за пределы трубопровода. При работе датчика преобразователи одной из решеток используются в качестве излучателей, которые могут активироваться как одновременно, так и поочередно, а преобразователи второй решетки используются как приемники.

Принцип работы сеточного датчика основан на индикации акустической проводимости контролируемой среды, находящейся в «точках» пересечения излучающих и приемных волноводов (узлах решеток), осуществляемой с частотой несколько сотен герц. Процесс измерений происходит следующим образом. Ультразвуковой импульс, генерируемый первым преобразователем – излучателем, распространяется по волноводу и излучается в теплоноситель вокруг него. При прохождении ультразвука теплоносителя в «точках» пересечения волноводов сигналы последовательно принимаются приемными волноводами, а затем фиксируются электронной аппаратурой.

Амплитуда принятых сигналов зависит от фазового состава теплоносителя в «точках» (зазорах между излучающим и приемными волноводами). Она максимальна, когда в «точке» находится жидкая фаза теплоносителя и минимальна, когда – газовая фаза. Процесс измерений повторяется с использованием второго волновода и т. д. до последнего излучающего волновода в решетке.

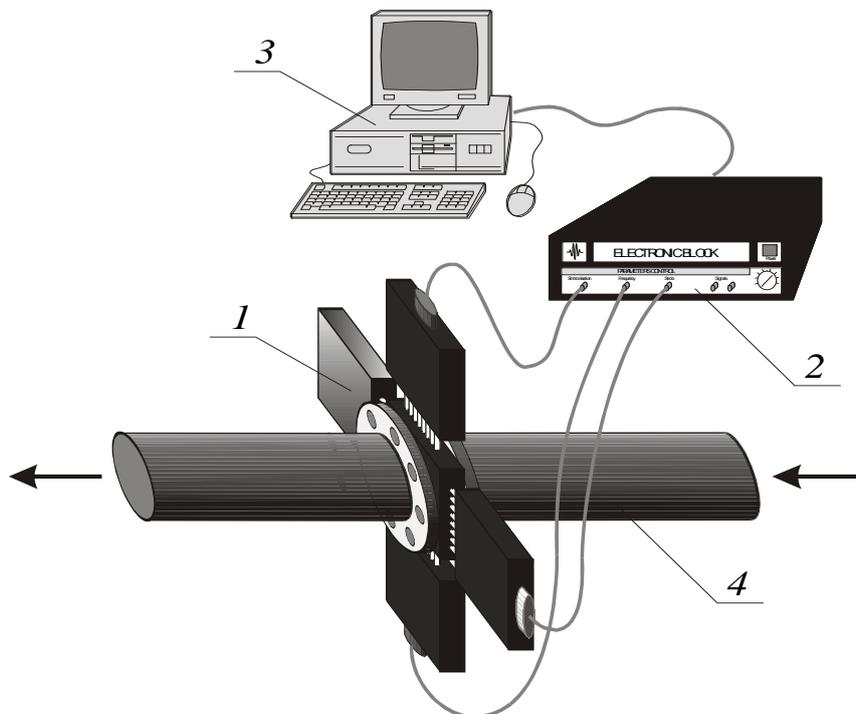


Рис. 1. Основные элементы системы визуализации двухфазного потока:

- 1 – сеточный датчик; 2 – электронный блок; 3 – персональный компьютер;
4 – трубопровод с контролируемым потоком теплоносителя

В результате в памяти электронной аппаратуры оказывается информация о распределении фаз по сечению трубопровода с шагом, определяемым координатами узлов решеток. Цикл измерений осуществляется за время порядка 500 мкс. В результате получается картина, показывающая практически мгновенный срез фазового состава теплоносителя в сечении

контроля (кадр). Весь процесс повторяется с частотой 500–2000 Гц. Поскольку поток теплоносителя находится в движении, отдельные его фазовые компоненты последовательно пересекают узлы решеток, в результате фиксируется изменение распределения фаз по сечению трубопровода практически в реальном масштабе времени. На конечном этапе данные измерений обрабатываются при помощи компьютера, где реализована программа визуализации размеров, формы и процесса перемещения фаз и производится расчет основных характеристик потока – паросодержания, дисперсности и их изменений во времени.

При разработке ультразвукового волноводного сеточного датчика были исследованы и решены некоторые технические проблемы. *Во-первых*, изучены возможные конструктивные решения для обеспечения наиболее эффективной передачи ультразвуковых сигналов от излучающих волноводов к приемным при минимизации поля помех. *Во-вторых*, размещено сравнительно большое число волноводов с пьезопреобразователями на небольшой площади поверхности трубопровода, при необходимой его герметизации и защите от взаимных помех. *В-третьих*, разработана конструкция, минимизирующая гидравлическое сопротивление и вносящая наименьшие искажения структуры двухфазного потока.



Рис. 2. Конструкция волноводной решеточной датчика:

1 – излучающая волноводная решетка; 2 – приемная волноводная решетка; 3 – узлы решеток;
4 – акустические преобразователи

Алгоритм реконструкции газовых фракций основан на геометрических методах, для которых опорные данные представляются в качестве массива значений, считанных с датчика, и фиксирующих фазовое состояние среды. Следует учитывать, что метод акустического зондирования позволяет получить в точках сечения информацию, свидетельствующую либо о наличии газа в данной точке, либо об его отсутствии, что требует проведения дискриминации полученных данных. Для алгоритма дискриминации используются сведения об акустической проводимости среды в контролируемых точках, полученные при калибровке осушенного датчика и погруженного в жидкость.

Сечения потока считываются через равные промежутки времени и формируется трехмерный массив, характеризующий фазовую структуру газожидкостного потока.

Вполне естественно, что при использовании одного датчика томографа получается развертка потока по шкале времени, а не по продольной оси экспериментального участка, но так как при большинстве режимов движения потока он не успевает существенно эволюционировать на небольших расстояниях, наблюдается визуальное соответствие между считанной и реальной картиной потока. Это позволяет сопоставлять результаты работы томографа с фотографиями потока на визуальном участке, который находится непосредственно перед датчиком или после него.

Для всего массива полученных данных производится изолирование отдельных групп элементов. При этом в каждой такой группе любой элемент должен быть соседним в трёхмерном массиве хотя бы для одного другого элемента той же группы.

Метод создания поверхностей, характеризующих границы разделов фаз

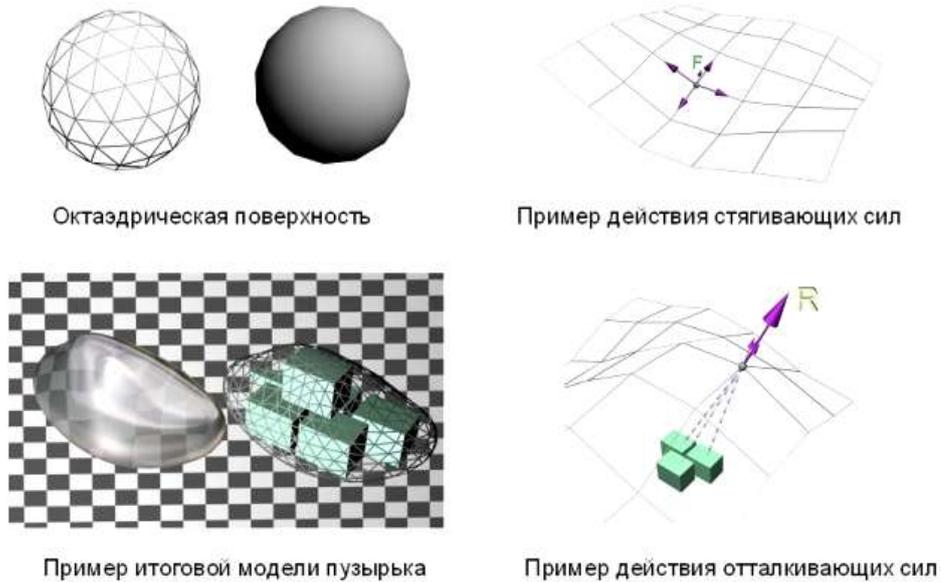
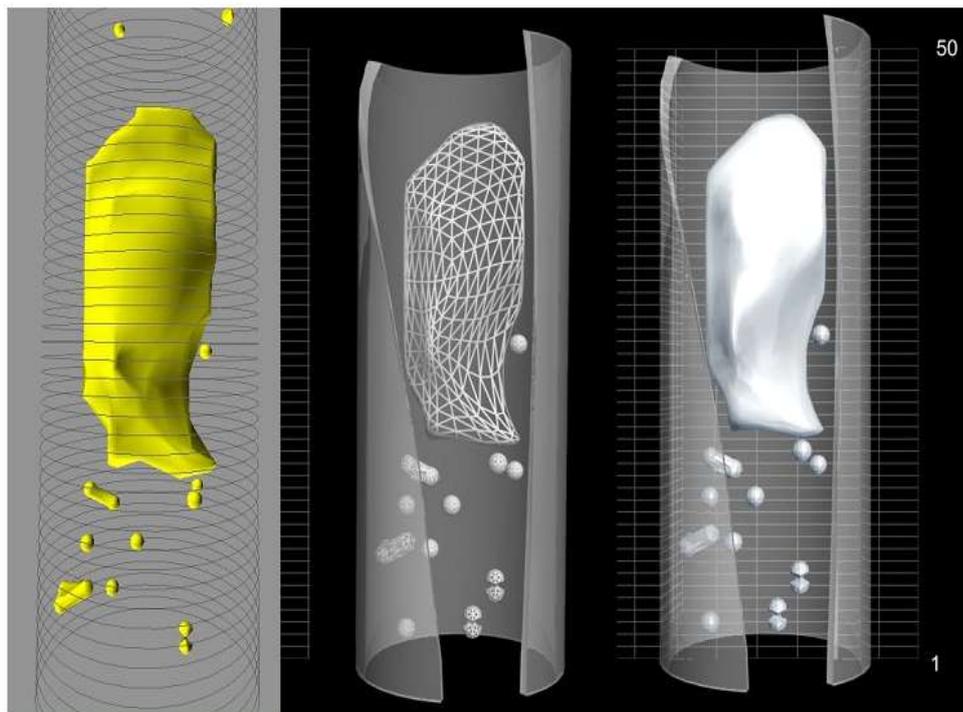


Рис. 3. Реконструкция формы газовых фракций



а) б) в)
Рис. 4. Этапы доработки геометрической модели, наложение материалов и эффектов освещения

Таким образом, для «газовых» элементов массива определяются газовые фракции. Далее для каждой группы элементов, представляющей газовую фракцию, описывается поли-

гональная поверхность, включающая по объему в себя всю группу элементов в трехмерном пространстве. При этом изначальное распределение полигонов по поверхности изотропно (рис. 3). Такой вариант поверхности наиболее предпочтителен, так как позволяет моделировать действие поля сил на границе раздела фаз наиболее адекватно.

Моделируя в каждой точке поверхности действие основных сил, которые являются прототипами таких физических сил, как давление и поверхностное натяжение, и опираясь на информацию о структуре потока, можно итерационно привести форму поверхности к форме, которая с определенными допусками соответствует реальной физической форме газовой фракции. Этапы доработки геометрической модели показаны на рис. 4.

На первом этапе (рис. 4, а) представлено изображение работы зондирующей программы, два изображения (рис. 4, б, в) показывают второй этап обработки, как результат импорта обработанных геометрических данных в программу 3D моделирования. Для передачи данных доступны два стандартных формата описания 3D моделей – OBJ и VRML.

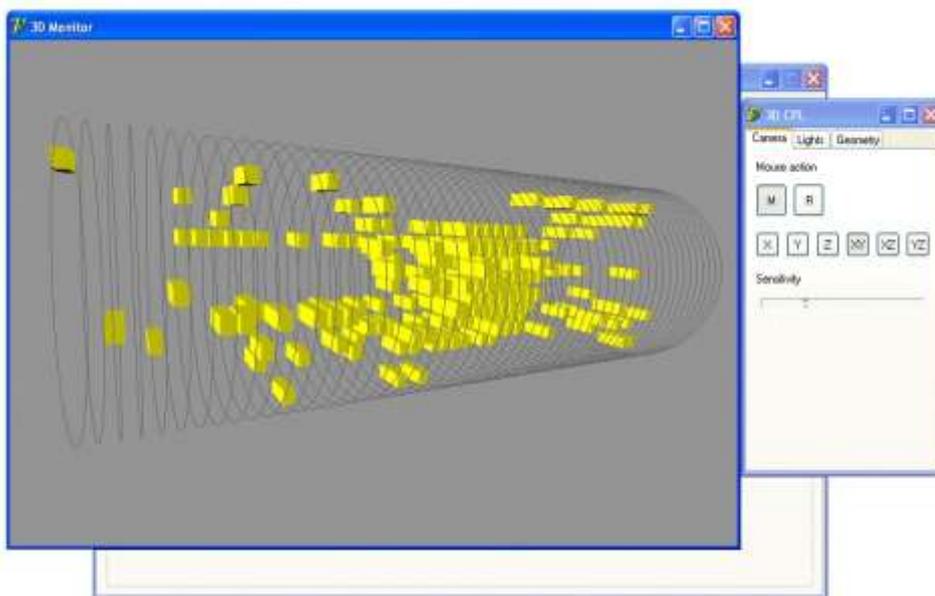


Рис. 5. Пример синтеза трехмерной модели потока

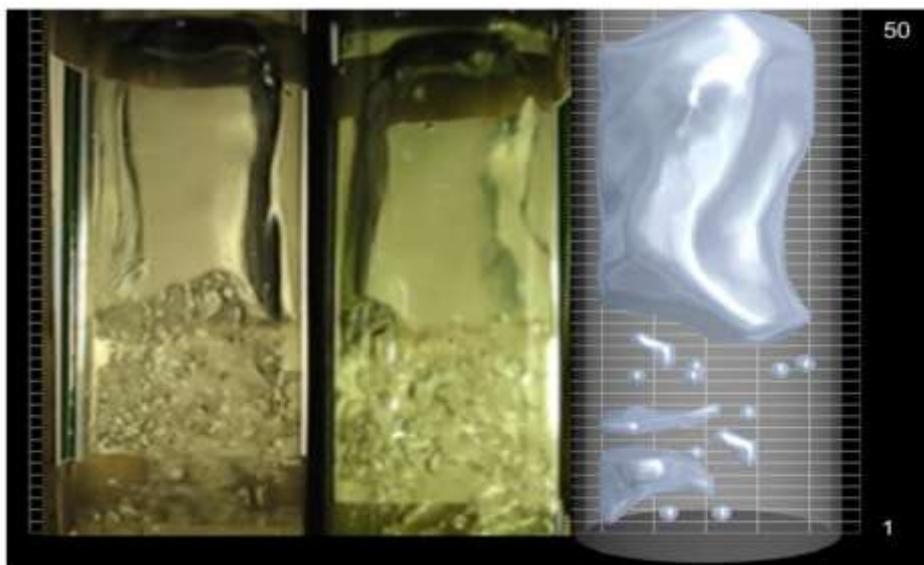


Рис. 6. Фотографии снарядного режима течения потока (фас и профиль) и реконструкции потока сеточным датчиком (объемный расход воды $1,2 \text{ м}^3/\text{ч}$, объем пузыря 70 см^3)

Изготовленный датчик был установлен в вертикальной трубе диаметром 50 мм водовоздушного стенда, моделирующего восходящий двухфазный поток. Сравнивались результаты визуализации снарядного режима течения потока при помощи фотоаппаратуры и реконструкции потока сеточным датчиком (рис. 6).

Библиографический список

1. **Мельников, В.И.** Акустические методы диагностики газожидкостных потоков / В.И. Мельников, В.П. Дробков, В.В. Контелев. – М.: Энергоатомиздат, 2006. –351 с.
2. **Мельников, В.И.** Ультразвуковая волноводная многоточечная система визуализации двухфазного теплоносителя / В.И. Мельников, В.В. Контелев, В.В. Иванов // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2000. №1. С. 81–88.
3. **Melnikov, V.I.** First experiments on visualisation of two-phase high pressure and temperature flows using an ultrasonic mesh sensor / V.I. Melnikov, V.N. Khokhlov, V.V. Ivanov and at. // Kerntechnik, May 2003. V. 68. No. 3. P. 102–105.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2011*

V.I. Melnikov, G.A. Egorov

ULTRASOUND WAVE-GUIDE SYSTEM FOR TWO-PHASE HEAT CARRYING FLOWS VISUALIZATION

This article presents new acoustic measurement and diagnostic system for high performance visualization of two-phase heat carrying flows inside of pipes. It describes principles and methods of two-phase flows visualization. Some results of experiments with developed system are applied to the article.

Key words: two-phase flows, flow analysis, flow visualization, ultrasound wave-guide sensors.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.01

Ю.И. Палутин

ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ БЕЗРАЗМЕРНЫХ КРИТЕРИЕВ ПОДОБИЯ ПРИ ОЦЕНКЕ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ АВТОМОБИЛЯ

Нижегородская государственная сельскохозяйственная академия

Выявлена область применения гидродинамических критериев подобия «число Рейнольдса», «число Эйлера» и их комбинации при анализе работоспособности вентиляционных систем автомобилей. Показано, что при оценке движения воздуха через вентиляционные проемы, когда происходит поворот струй воздуха под действием перепада давления, основными критериями подобия становятся «число Эйлера» и комбинация данного критерия с критерием «число Рейнольдса». «Число Рейнольдса» в этом случае является оценочным параметром.

Ключевые слова: вентиляция салонов, критерии подобия «число Рейнольдса», «число Эйлера», комбинация критериев подобия.

Введение

Создать эффективную систему вентиляции невозможно, если проектировщики не умеют производить расчет воздухообмена через различные приточно-вытяжные вентиляционные проемы. При этом важнейшим фактором таких расчетов является правильный подбор и использование соответствующих гидродинамических критериев подобия. В работе [1] показано, что основными критериями для таких расчетов являются «число Рейнольдса», «число Эйлера» и их комбинация. Проанализируем область применения данных критериев.

1. «Число Рейнольдса», определяемое по внешним размерам автомобиля

Безразмерные комбинации величин

$$\frac{V \rho L}{\mu} = R_e, \quad (1)$$

где V - скорость невозмущенного потока;

ρ - плотность воздуха;

L - линейные размеры;

μ - динамическая вязкость воздуха.

известная как «число Рейнольдса», является одним из основных критериев подобия при моделировании. В зависимости от стоящей задачи в уравнение (1) в качестве линейного размера могут подставляться или продольные размеры автомобиля, или размеры вентиляционного проема. Если «числа Рейнольдса» определены относительно размеров кузова автомобиля и параметров внешнего воздушного потока, то данная комбинация позволяет оценивать характер внешнего обтекания потоками автомобиля, так как от того, как движутся потоки снаружи автомобиля, в решающей степени зависит движение воздушных потоков через вентиляционные проемы, расположенные в кузове автомобиля.

С помощью данного критерия легко определяется закритическая зона обтекания автомобиля, в которой остаются неизменными при изменении чисел Рейнольдса не только ве-

личина коэффициента гидравлического сопротивления движению, но и все другие параметры внешнего обтекания потоками кузова, при изменении скорости движения автомобиля. Так, проведенные автором испытания с помощью дымового метода [2] показали, что в закритической зоне изменений чисел Рейнольдса характер движения внешних воздушных потоков, направление векторов их скоростей остается неизменным, хотя сами величины скоростей меняются. Благодаря этому, результаты измерения параметров процессов, происходящих при движении воздуха через вентиляционные проемы или неплотности, расположенные на наружной поверхности кузова, проведенные при одних числах Рейнольдса, можно использовать и для других значений чисел Рейнольдса, находящихся в закритической зоне, конечно, с учетом происходящих при этом изменений скорости движения автомобиля.

В работе [3] показано, что автомобильная область для автомобилей находится в диапазоне изменения чисел Рейнольдса, равном $2 \cdot 10^5 \div 2 \cdot 10^7$. Например, для автомобиля, имеющего кузов длиной 5 метров, это будет соответствовать изменению скорости движения от 0,6 до 60 м/с. Эти данные свидетельствуют о том, что почти для всех автомобилей зона закритических чисел Рейнольдса соответствует практически всему диапазону реальных эксплуатационных скоростей их движения. Тем не менее, проверка подобия по числу Рейнольдса, определенного по внешним параметрам, при проведении всех работ, связанных с вентиляцией салона автомобиля, остается обязательной. Особенно это важно, если работы связаны с испытаниями масштабных моделей автомобилей.

2. «Число Рейнольдса», определяемое по параметрам вентиляционных проемов

Движение воздуха через вентиляционные проемы или неплотности определяется их линейными размерами, перепадом давления или скоростью движения через них воздушных струй и физическими свойствами воздуха. Поэтому числа Рейнольдса, определенные по размерам вентиляционного проема и по скорости движения через них воздуха, являются наилучшим критерием подобия при анализе этих процессов, так как включают в себя все значимые для них величины. Этот критерий используется чаще всего и в качестве аргумента, в функции которого рассматриваются обычно изменения величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и коэффициентов расхода воздуха.

Как показывает опыт исследовательских работ, связанных с оценкой герметичности кузовов и изучением систем вентиляции, поперечные размеры неплотностей в кузовах современных автомобилей колеблются от сотых долей миллиметра до нескольких миллиметров. Характерные размеры вентиляционных проемов изменяются у различных автомобилей от нескольких десятков миллиметров до нескольких сотен миллиметров. Если оценить скорости движения воздуха через вентиляционные проемы и неплотности, то они могут изменяться в диапазоне от десятых долей до нескольких десятков метров в секунду.

При таких значениях размеров неплотностей и вентиляционных отверстий кузова автомобиля и значений скоростей движения через них воздуха им могут соответствовать значения чисел Рейнольдса в диапазоне изменения от $1 \cdot 10^{-3}$ до $1 \cdot 10^4$. На данном диапазоне изменений чисел Рейнольдса и следует рассматривать изменения величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов движения воздуха через вентиляционные проемы и неплотности.

Если руководствоваться экспериментальными данными, приведенными в работе [4], то можно видеть, что докритическая зона изменений коэффициентов гидравлических сопротивлений расположена в диапазоне изменения чисел Рейнольдса от нуля до $2 \div 20$ единиц, но в некоторых случаях может продолжаться до $100 \div 200$ единиц. Критическая зона изменений коэффициентов гидравлических сопротивлений расположена в диапазоне изменений чисел от $2 \div 20$ или $100 \div 200$ единиц до значений, находящихся в диапазоне изменений от 10^3 до $5 \cdot 10^4$ единиц. Квадратичная область, в которой значение величины коэффициентов сопротивлений и расходов перестают зависеть от значений чисел Рейнольдса, наступает при превышении их значений величины $10^3 \div 5 \cdot 10^4$ единиц.

Если приведенные значения диапазонов наиболее характерных участков изменений

гидравлических сопротивлений при движении воздуха через вентиляционные проемы сопоставить со значениями ранее приведенных значений чисел Рейнольдса, соответствующих реальному движению воздуха через неплотности и вентиляционные проемы, то обнаружится, что неплотностям и небольшим отверстиям соответствуют линейный и начальный участок переходного режима изменений величин сопротивлений, а вентиляционным проемам – квадратичный участок изменения данных величин. Поэтому при оценке величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов воздуха неплотностей и небольших отверстий следует ожидать их очень сильного изменения при изменении чисел Рейнольдса. При оценке же данных величин крупных вентиляционных проемов следует ожидать, что их значения будут оставаться постоянными при изменении чисел Рейнольдса.

Следовательно, для больших вентиляционных проемов числа Рейнольдса являются только критериями для оценки того, соответствует ли характер протекания через них воздуха автомобильной области изменения величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов, или нет. В качестве аргумента в функциональной зависимости для них использование чисел Рейнольдса не имеет смысла. В случае же оценки характера протекания воздуха через неплотности и небольшие отверстия число Рейнольдса явно целесообразно использовать в качестве аргумента для описания изменений коэффициентов сопротивлений и расходов.

3. Гидродинамический критерий «число Эйлера»

Гидродинамический критерий E_u «Число Эйлера», которое характеризует отношение гидродинамического давления к силам инерции, является одним из широко известных критериев подобия.

$$\frac{\Delta P}{V^2 \rho} = E_u, \quad (2)$$

где ΔP – перепад между наружным и внутренним давлением.

В общей аэродинамике при малых скоростях движения воздуха, когда его сжимаемостью можно пренебречь, «число Эйлера» в качестве критерия подобия используется очень редко. Это объясняется тем, что в большинстве задач гидродинамики, в которых обычно или решаются проблемы обтекания различных тел, или исследуется движение вязкой среды через различные сопротивления, величина перепада давления, входящая в данный критерий подобия, является величиной не задаваемой, а определяемой. В результате число Эйлера при этих условиях является лишь следствием других критериев подобия, которые полностью определяют движение.

Совершенно другая картина наблюдается в случае вентиляции салонов автомобилей, так как при движении воздушных потоков вдоль наружной поверхности кузова в зоне открытых вентиляционных проемов и неплотностей на них воздействуют вполне определенные по величине перепады давления, которые изменяют направление их движения. То есть, здесь происходит взаимодействие перепадов давлений, воздействующих на внешние воздушные потоки, и инерционных сил этих потоков. При этом и величина перепада давления, и параметры внешних воздушных потоков являются основными величинами, определяющими данный процесс. Ясно, что число Эйлера в этих условиях должно быть основным критерием подобия.

Однако до настоящего времени «число Эйлера» в своём явном общеизвестном виде при решении задач, связанных с вопросами вентиляции салонов автомобилей, пока не применялось. Но оказалось, что на практике данный критерий, только в другом преобразованном виде, неоднократно использовался [5, 6, 7, 8]. При этом авторы работ обычно не предполагали, что в действительности они имеют дело с критерием Эйлера. Вызвано это тем, что «число Эйлера», как и любой другой критерий подобия, может иметь несколько равнозначных математических выражений. Так, если уравнение (2) преобразовать следующим образом:

$$E_u = \frac{\Delta P}{V^2 \cdot \rho} = \frac{\rho \cdot V_{\text{вх.}(T)}^2}{2 \cdot \rho \cdot v^2} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{V_{\text{вх.}(T)}}{V} \right)^2, \quad (3)$$

где $V_{вх(T)}$ – теоретически возможная скорость движения воздуха через вентиляционный проем под действием перепада давления, равного ΔP .

то обнаружится, что его можно выражать через отношение теоретически возможной скорости движения воздуха через вентиляционный проем, движущийся под действием перепада давления ΔP к скорости невозмущенного потока, обтекающего автомобиль.

Р.И. Ханжонков в своей работе [8] пришел к следующему выводу. В случае протекания воздуха под действием перепада давления при наличии внешнего воздушного потока с одной стороны плоскости, в которой находится отверстие, величину коэффициента гидравлического сопротивления воздуха лучше всего выражать в функции изменения отношения скорости невозмущенного потока к скорости потока воздуха, проходящего через отверстие. Данное же отношение скоростей, как видно из выражения (3) настоящей работы, является величиной, обратной к корню квадратному из числа Эйлера.

Один из полученных Р.И.Ханжонковым графиков - график изменения коэффициента гидравлических сопротивлений движению воздуха через круглое отверстие в тонкой стенке в присутствии с одной стороны стенки внешнего воздушного потока, двигающегося параллельно ее плоскости - приведен на рис. 1. Изучение графиков изменений величин коэффициентов гидравлических сопротивлений, а также результаты дополнительных исследований по визуализации потоков позволило Р.И. Ханжонкову в какой-то степени приоткрыть природу процессов, происходящих в вентиляционном отверстии при наличии внешнего воздушного потока, которую он представляет следующим образом.

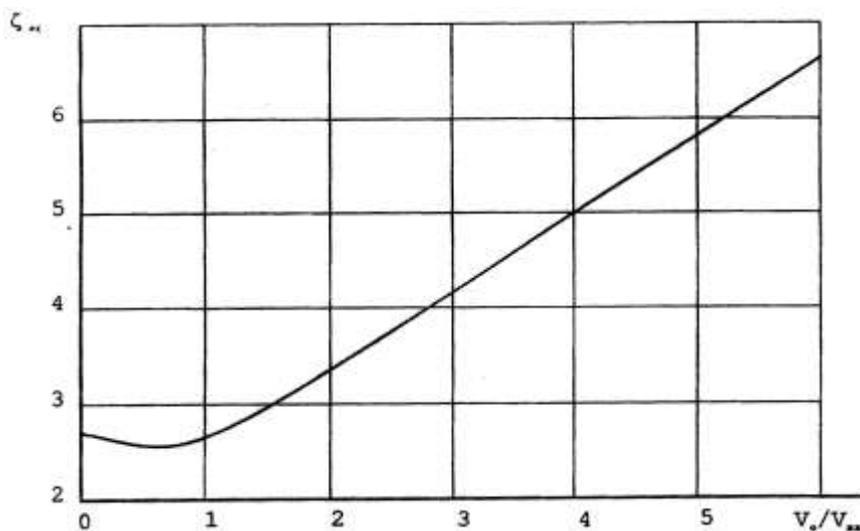


Рис. 1. График изменения коэффициента гидравлического сопротивления движению воздуха через круглое отверстие в присутствии внешнего потока

При отсутствии внешнего воздушного потока, когда $v_{\infty} = 0$, воздух поступает к отверстию равномерно со всех сторон. Коэффициент гидравлического сопротивления в этом случае равен 2,7 единиц. При появлении внешнего воздушного потока все большая часть воздуха к отверстию начинает поступать с одной его стороны. Вначале кинетическая энергия внешнего воздушного потока помогает преодолевать сопротивление движению воздуха через отверстие, поэтому коэффициент гидравлического сопротивления начинает уменьшаться по своему значению. Такое уменьшение его величины продолжается при увеличении скорости движения внешнего воздушного потока вплоть до приближения соотношения скоростей $v_{\infty}/v_{вх}$ к величине, близкой к 0,5. При дальнейшем увеличении данного соотношения начинает все больше сказываться влияние поджатия входящей в отверстие струи, происходящего из-за все возрастающей инерции внешнего потока. В результате сопротивление входу воздуха в отверстие начинает увеличиваться. Чем больше по своей величине становится соотно-

шение скоростей, тем сильнее возрастает величина коэффициента гидравлического сопротивления движения воздуха через данное отверстие, что очень хорошо видно из графика на рис. 1 [8]. Подобное же объяснение картины протекания воздушных потоков через отверстия в стенке, с одной стороны которой движется внешний воздушный поток параллельно ее плоскости, можно найти в описаниях и других авторов [5].

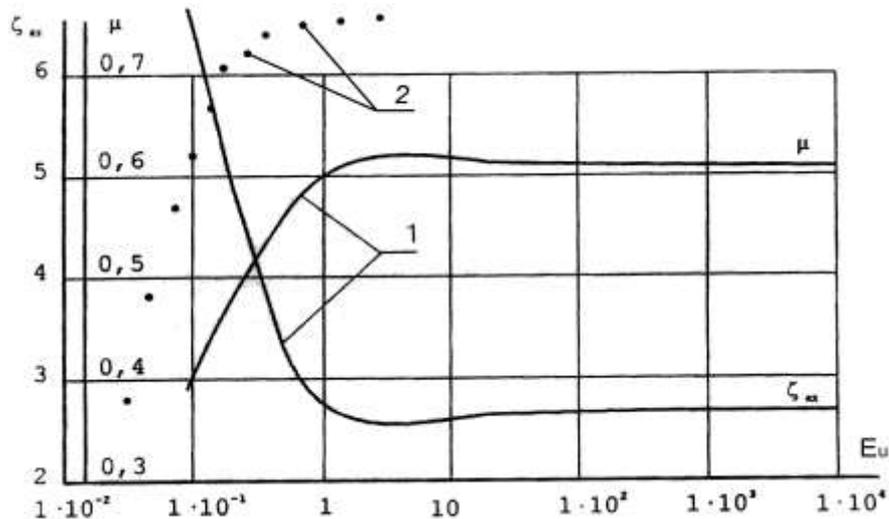


Рис. 2. Графики изменения коэффициентов гидравлического сопротивления и расхода воздуха в функции изменения числа Эйлера:

1 - движение воздуха через круглое отверстие (испытания в аэродинамической трубе);
2 - прямоугольное отверстие (дорожные испытания автора)

Использование критерия Эйлера в виде отношения скоростей принесло несомненную пользу в некотором прояснении природы процесса движения воздушных потоков через вентиляционные проемы салонов автомобилей. Не меньшую пользу приносит использование данного критерия и в другом виде. Преобразуем для этого выражение (2) следующим образом:

$$\frac{\Delta P}{V^2 \rho} = \frac{(P_i - P_{\text{вн}})}{V^2 \rho} = \frac{2[(P_i - P_\infty) - (P_{\text{вн}} - P_\infty)]}{2 \cdot V^2 \rho} = \frac{1}{2} \cdot \Delta \bar{P}, \quad (4)$$

где P_i – внешнее давление на вентиляционный проем;

$P_{\text{вн}}$ – давление воздуха в салоне автомобиля;

P_∞ – давление в невозмущенном воздушном потоке, обтекающем автомобиль.

Из полученного выражения видно, что критерий подобия «число Эйлера» можно представить в виде разности аэродинамических коэффициентов давлений по обе стороны вентиляционного проема. В работах [5, 6, 7] показано, что разность аэродинамических коэффициентов давления очень удобна в пользовании при описании изменений коэффициентов гидравлических сопротивлений движению воздуха через вентиляционные проемы, расположенные на поверхности кузова автомобиля.

Использование критерия «число Эйлера» дает возможность получить дополнительное представление о некоторых особенностях физики изменений величин гидравлических сопротивлений. Доказательством этого могут служить графики изменения значений коэффициентов гидравлического сопротивления и расхода движению воздуха через круглое отверстие в тонкой стенке в функции изменения чисел Эйлера, представленные на рис. 2, которые перестроены из графика, приведённого на рис. 1. На этом же графике нанесены экспериментально полученные автором кривые изменения коэффициента расхода воздуха через прямоугольное отверстие, расположенное на боковой поверхности автобуса при его движении.

Анализ характера изменения коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов воздуха в функции изменений чисел Эйлера, приведенных на рис. 2, позволяет выделить

три характерных участка. *Во-первых*, это начальный участок зависимости величин гидравлических сопротивлений от изменения значений чисел Эйлера, при котором изменение величины коэффициента гидравлического сопротивления движению воздуха имеет линейную зависимость от изменения числа Эйлера. Кроме того, здесь также явно имеется переходный участок и соответственно можно выделить автомодельный участок изменения этих величин, на котором коэффициенты гидравлических сопротивлений и расходов воздуха остаются величинами постоянными, не зависящими от изменения значений чисел Эйлера.

Однако малое количество известных экспериментальных материалов, посвященных данной теме, не позволяет пока найти количественную оценку величин чисел Эйлера, при которых начинаются и заканчиваются наиболее характерные участки изменения величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов воздуха. На основе имеющихся у автора материалов по данной теме можно только отметить, что движению воздуха через вентиляционные проемы автомобиля при вентиляции салонов всегда соответствует или начальный, или переходный участок изменения величин коэффициентов гидравлических сопротивлений и расходов воздуха, то есть тот участок, на котором любому изменению чисел Эйлера соответствуют большие изменения величин этих коэффициентов.

Таким образом, критерий подобия «число Эйлера» является основным критерием подобия при описании изменений величин гидравлических сопротивлений движению вязкой среды через отверстие, когда с одной его стороны имеется внешний воздушный поток, то есть когда происходит поворот воздушной среды под действием перепада давления. Это подтверждает важность данного критерия в решении проблем, связанных с движением воздуха через вентиляционные проемы, расположенные на наружной поверхности кузова автомобиля. При этом для удобства работы в зависимости от стоящей задачи число Эйлера может выражаться и через отношения скоростей, и через разность аэродинамических коэффициентов давлений, и в своем обычном общеизвестном виде. Однако, как показывает практика исследований автора, в большинстве случаев «число Эйлера» лучше всего использовать в виде разности аэродинамических коэффициентов давлений.

4. Комбинация критериев подобия Рейнольдса-Эйлера

Критерий подобия

$$\frac{\Delta P l}{V \mu} = \left(\frac{\rho \Delta P^2 l^2}{\rho V^2 (\mu)^2} \right)^{0.5} = \left[E_u \frac{1}{2} R^2 \right]^{0.5} = \left(\frac{1}{2} E_u \right)^{0.5} R_e, \quad (5)$$

который является комбинацией критериев подобия Рейнольдса-Эйлера, до настоящего времени не нашел такого широкого применения, как «число Рейнольдса» и «число Эйлера». Но, в литературе имеются предложения по его использованию. Так, Л.Г. Лойцянский в своей работе [9] рассмотрел возможность применения выражения, представляющего собой данную комбинацию, возведенную во вторую степень, при решении задач движения вязкой жидкости по трубам в случае, когда задан перепад давления и неизвестен расход жидкости. В этой же работе предлагается использовать данный критерий и при решении некоторых нестандартных задач движения жидкости.

Ранее уже был рассмотрен случай движения воздуха через вентиляционные отверстия и неплотности, расположенные на наружной поверхности кузова автомобиля, то есть движение воздуха через отверстие в стенке, с одной стороны которой имеется внешний воздушный поток, и показано, что при этом варианте наилучшим критерием подобия является число Эйлера. Но, число Эйлера, как известно, характеризует собой только отношение перепада давления к инерционным силам. При движении же воздуха через вентиляционные проемы и неплотности в присутствии внешнего воздушного потока, без сомнения, должен проявиться и эффект взаимодействия инерционных и вязкостных сил, потому критерий подобия, соответствующий такому варианту движения воздуха, должен содержать член, отвечающий за от-

ношение этих сил, то есть число Рейнольдса. Данному условию наилучшим образом соответствует комбинация критериев Рейнольдса-Эйлера (5), так как в нее входят оба эти основные для такого движения вязкой жидкости критерия подобия.

Опыт экспериментальных исследований автора показывает, что движению воздуха через вентиляционные проемы и неплотности, расположенные на наружной поверхности кузова автомобиля соответствуют только два реальных сочетания различных режимов протекания воздуха через отверстия в случае оценки их по отдельности в функции изменений чисел Рейнольдса и чисел Эйлера.

Одно из этих сочетаний соответствует автомобильной области изменения величин гидравлических сопротивлений движению воздуха при оценке их в функции изменений чисел Рейнольдса и начальной или переходной зоне изменения данной величины, если их оценивать в функции изменений чисел Эйлера. Такая картина наблюдается при движении воздуха через большинство люков, окон, входных и выходных вентиляционных проемов, расположенных на кузовах автомобилей, так как из-за достаточно больших размеров этих отверстий обычно уже при самых малых реальных значениях скоростей движения через них воздуха режим его протекания соответствует закритической зоне изменений по числу Рейнольдса. Совершенно очевидно, что в таком случае изменение величины коэффициента гидравлического сопротивления будет зависеть от изменения величины чисел Эйлера и не будет зависеть от изменения чисел Рейнольдса. Использование при этих условиях в качестве аргумента комбинации критериев подобия Рейнольдса-Эйлера нецелесообразно. Здесь вполне достаточно использовать только критерий Эйлера. Результаты экспериментальных исследований автора подтверждают данный вывод.

Второму сочетанию соответствует начальный или переходный режим изменений величин гидравлических сопротивлений, если их оценивать в функции изменения чисел Рейнольдса и такие же режимы протекания, если их оценивать в функции изменения чисел Эйлера. Данные режимы протекания наблюдается при движении воздуха через неплотности и небольшие отверстия в кузове. Ввиду значительного влияния изменений как величин чисел Рейнольдса, так и величин чисел Эйлера на величину гидравлических сопротивлений при данных режимах движения воздуха через отверстия, использование комбинации критериев подобия Рейнольдса-Эйлера получает здесь явное преимущество перед остальными критериями.

Вывод

При решении задач, связанных с вентиляцией салонов автомобилей, необходимо использовать несколько критериев подобия. Такими критериями являются: «число Рейнольдса», определенное по параметрам внешнего воздушного потока и внешним размерам автомобиля; «число Рейнольдса», определенное по параметрам потока, проходящего через рассматриваемые отверстия и по их размерам; «число Эйлера»; комбинация критериев подобия Рейнольдса-Эйлера.

«Число Рейнольдса», определенное по параметрам внешнего воздушного потока и размерам автомобиля, используется для оценки внешнего обтекания автомобиля. Целью данной оценки является определение соответствия характера внешнего обтекания автомобиля закритической зоне изменения его гидравлического сопротивления. Если соответствует, значит можно проводить моделирование процессов протекания воздуха через вентиляционные проемы и другие отверстия, необходимое для решения задач, связанных с вентиляцией салонов автомобилей. Если же данная величина выходит за пределы этой зоны, то результаты, полученные при одних скоростях, нельзя будет использовать при других скоростях движения автомобиля. Моделирование процессов вентиляции в таком случае будет невозможно.

«Число Рейнольдса», определенное по параметрам воздушного потока, проходящего через отверстие, и по размерам данного отверстия, является одним из основных критериев подобия. Если рассматривается вариант движения воздуха через отверстие при отсутствии внешнего воздушного потока, то с помощью данного критерия, в первую очередь, определяется зона нахождения величины гидравлического сопротивления движению воздуха через данное отверстие. Если его значение соответствует начальной или переходной области, то

«число Рейнольдса», определяемое по параметрам отверстия, используется и в качестве аргумента для описания изменений величины гидравлического сопротивления. Если величина гидравлического сопротивления движению воздуха находится в закритической зоне, то потребность в использовании его в качестве аргумента отпадает.

В случае, если рассматривается движение воздуха через какое-либо отверстие в присутствии с одной его стороны внешнего воздушного потока, то «число Рейнольдса», полученное по параметрам данного отверстия, служит для определения того, критерия подобия, который следует в данном случае использовать для описания протекания воздуха – «число Эйлера» или комбинацию критериев подобия Рейнольдса-Эйлера. Если по числу Рейнольдса окажется, что величина гидравлического сопротивления движению воздуха через отверстие в присутствии внешнего воздушного потока находится в автомодельной области их изменений, то следует применять «число Эйлера». Если же по данному критерию величина гидравлического сопротивления движению воздуха находится в начальной или переходной зоне ее изменений, то в этом случае следует использовать комбинацию критериев подобия Рейнольдса-Эйлера.

Библиографический список

1. **Палутин, Ю.И.** Критерии подобия при решении задач связанных с вентиляцией салонов автомобилей // Совершенствование процессов механизации и использования энергии в сельскохозяйственном производстве: материалы региональной научно-практической конференции инженерного факультета Нижегородской государственной сельскохозяйственной академии / Нижний Новгород, 1999. С. 212–215.
2. **Михайловский, Е.В.** Экспериментальное исследование спектров обтекания автомобилей / Е.В. Михайловский [и др.] // Труды Горьковского с/х института. Горький. 1970. Т. 36. С. 42–52.
3. **Михайловский, Е. В.** Аэродинамика автомобиля / Е. В. Михайловский. – М.: Машиностроение, 1973. – 224 с.
4. **Идельчик, И. Е.** Справочник по гидравлическим сопротивлениям / И. Е. Идельчик. – М.: Машиностроение, 1975. – 559 с.
5. **Иванусь, Е.М.** Исследование естественной вентиляции салонов автобусов: дисс. ... канд. техн. наук / Иванусь Е.М. – Минск, 1971.
6. **Палутин, Ю. И.** Метод расчёта воздухообмена в салоне автобуса // Автомобильная промышленность. 1976. № 11. С. 98–103.
7. **Парфёнов, В.Н.** Разработка методов расчёта аэродинамического сопротивления движению и воздухообмена в салоне автобуса с кузовом вагонного типа: дисс. ... канд. техн. наук / Парфёнов В.Н. – М., 1984.
8. **Ханжонков, В. И.** Сопротивление истечению через отверстие в стенке в присутствии проходящего потока // Промышленная аэродинамика. 1959. Вып. 15. С. 5–12.
9. **Лойцянский, Л. Г.** Механика жидкости и газа / Л. Г. Лойцянский. – М.: Наука, 1970. – 904 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2011*

Yu. I. Palutin

THE SPHERE OF APPLYING UNLIMITED CRITERIA OF SIMILARITY AUTOMOBILE VENT SYSTEMS

The sphere of applying hydrodynamic criteria of similarity “Reindolds number”, “Eiler number” and their combination by analysis of efficiency of automobile vent systems are revealed. It is proved that estimating the air movement through ventilator under pressure overfall it is necessary to use as the main criteria “Eiler number” and its combination with “Reindolds number”. In this case the latter serves as a parameter of estimation.

Key words: ventilation of salons; criteria of similarity “Reinolds number” and “Eiler number”; combination of criteria of similarity.

УДК 621.43

Н.А. Кузьмин¹, И.О. Донато²**ВЫБОР ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ
ТЕПЛОНАПРЯЖЕННОСТИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Управление автомагистрали “Москва - Н.Новгород”²

Достоверность и практическая ценность результатов моделирования полей температур, напряжений и деформаций в деталях машин с применением метода конечных элементов и других расчетных методов определяется в первую очередь наличием научно-обоснованных подходов по выбору и правильности определения закладываемых в расчеты граничных условий, адекватно отражающих реальные условия работы деталей.

Ключевые слова: температура, теплонапряженность, метод конечных элементов, граничные условия, итерация, поршень, работоспособность, надежность.

Развитие современной техники вынуждает инженеров, конструкторов и проектировщиков разрабатывать новые, наиболее эффективные и совершенствовать существующие методы анализа и способы оптимизации теплового состояния деталей машин.

До недавнего времени при разработке машин различного функционального назначения наиболее распространенным был путь, основанный на экспериментальном поиске оптимальных форм теплонагруженных деталей. При таком подходе эффективность проводимых исследований в немалой степени зависит от опыта, интуиции исследователя, наличия статистических данных и в некоторых случаях бывает довольно высока. Экспериментальные методы исследования температурного состояния и теплонапряженности деталей являются наиболее надежными, но в то же время и наиболее трудоемкими. Эксперимент возможен лишь при наличии опытных образцов или уже выпускаемых машин и связан с большими затратами времени и средств, а также с трудностями измерений в условиях сложного характера движения деталей во время их работы. Вместе с тем, возможность успешного решения ряда практических задач при создании высоконадежных и совершенствовании уже существующих машин в значительной мере определяется наличием эффективных методов расчета, которые позволяют до минимума сократить трудоемкий и дорогостоящий натурный эксперимент, заменить его вариантными исследованиями на физических или математических моделях.

На современном этапе развития вычислительной техники расчетные методы позволяют не только получать интересующие исследователей тепломеханические характеристики, но и оценивать влияние на них самых разнообразных факторов, выбирать такие конструкционные формы деталей, которые наиболее точно удовлетворяют требованиям прочности и эксплуатационной надежности машин.

При изучении теплонапряженности узлов и деталей машин различного функционального назначения исследователи сталкиваются с необходимостью оценки теплового состояния объектов со сложными геометрическими формами при сложных условиях теплового и механического нагружения. Существующие аналитические методы математической физики позволяют эффективно решать лишь узкий круг подобных задач. Это связано с тем, что в данном случае для решения систем дифференциальных уравнений, описывающих поля температур в объемах деталей, приходится иметь дело с упрощенной трактовкой процесса – заменой реальной конфигурации тела простыми формами и упрощением граничных условий (ГУ). В результате этого практически исключается учет влияния многих факторов на поля температур и напряжений в объемах деталей, что приводит к результатам, зачастую, значительно отличающимся от истинных.

Развитие ЭВМ и численных методов позволило расширить круг задач, решаемых с

использованием дискретных математических моделей. Численное моделирование открывает возможности решения практически любых задач, поддающихся математическому описанию. Разработка достаточно гибкой системы математических моделей, адекватно описывающей сложную исследуемую реальную систему, и создание методов управления моделями позволяет коренным образом изменить процесс математического моделирования, довести его до уровня автоматизированной локальной и глобальной оптимизации конструкций деталей.

В основу функционирования дискретных математических моделей могут быть положены различные методы решения краевых задач теплопроводности, гидродинамики и теплообмена. Это, прежде всего – метод конечных разностей (МКР), метод конечных элементов (МКЭ), метод граничных элементов (МГЭ) и многие другие варианты и разновидности численных методов. Имеются основания для утверждений о том, что все численные методы по существу являются разновидностями глобального метода приближенного решения задач математической физики – метода взвешенных невязок [1]. И действительно, все эти методы основаны на дискретизации и аппроксимации области решений, сеточных функций и ГУ, а процедура нахождения приближенного решения поставленной исходной задачи по существу сводится к минимизации невязки между решением и приближением.

В качестве основных ГУ, описывающих тепловое взаимодействие поверхностей деталей машин и окружающей среды, используют следующие их виды (для цилиндрической системы координат) [1]:

– ГУ 1-го рода (задано распределение температур по поверхности детали в любой момент времени):

$$t = t(r, z, \Theta, \tau), \quad (1)$$

где $t(r, z, \Theta, \tau)$ – заданная на поверхности тела функция температуры; r, z, Θ – цилиндрические координаты, τ – координата времени;

– ГУ 2-го рода (задана плотность теплового потока (q) через поверхность):

$$q(r, z, \Theta, \tau) = \frac{-\lambda \cdot \partial t(r, z, \Theta, \tau)}{\partial n}, \quad (2)$$

где n – нормаль к поверхности детали в точке с координатами r, z, Θ ; λ – коэффициент теплопроводности материала детали, Вт/(м·град);

– ГУ 3-го рода (задана температура окружающей среды (t_{oc}) и закон теплообмена между средой и поверхностью):

$$\frac{-\lambda \partial t(r, z, \Theta, \tau)}{\partial n} = \alpha(t - t_{oc}), \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи для поверхности детали, Вт/(м²·град);

– ГУ 4-го рода (задан теплообмен системы тел, происходящий по закону теплопроводности):

$$\lambda_1 \left(\frac{\partial t_1}{\partial n} \right) = \lambda_2 \left(\frac{\partial t_2}{\partial n} \right). \quad (4)$$

Наибольшая достоверность прогнозируемых полей температур, деформаций и напряжений достигается при использовании ГУ 3-го рода, так как они наиболее стабильны при изменении конструкции деталей. Как показал анализ ранее проведенных исследований [1, 2 и т.д.], допущение стабильности ГУ 3-го рода при этом вполне отвечает запросам инженерной практики. Использование других ГУ оправдано только в случае необходимости получения распределения температур в теле исследуемой детали по известным их значениям на поверхностях.

Практическая ценность результатов моделирования полей температур, напряжений и деформаций в деталях машин с применением МКЭ и других расчетных методов определяется в первую очередь наличием научно-обоснованных подходов по выбору и правильности

определения закладываемых в расчеты ГУ, адекватно отражающих реальные условия работы деталей.

Одной из показательных, ответственных и сложных (по форме и тепловому нагружению) деталей является поршень двигателя внутреннего сгорания (ДВС). Вопросы применения расчетных методов для численных исследований по анализу теплового состояния деталей ДВС посвящено достаточно большое количество работ, как в России, так и за рубежом. В частности, накоплен обширный опыт в области исследования температурного состояния и теплонапряженности деталей цилиндропоршневой группы (ЦПГ) судовых двигателей и силовых установок тяжелых транспортных средств [1, 3 и т.д.]. В то же время этот опыт без существенных дополнений и уточнений не может быть распространен на двигатели автомобилей. Данное обстоятельство обусловлено, в основном, сравнительной тихоходностью тяжелых двигателей, большими их размерами, отличием в протекании основных фаз рабочего процесса. Все изложенное неминуемо вызывает различия в протекании процессов теплопередачи, происходящих в сравниваемых классах двигателей, отличия в уровне механических нагрузок на их детали. Это, в конечном итоге, и определяет отличия в уровнях теплового состояния деталей тяжелых двигателей и двигателей автомобильного класса.

Наибольшую трудность в процессе выбора ГУ 3-го рода представляет моделирование теплоотдачи от горячих газов к поверхностям деталей, образующих камеру сгорания (КС) ДВС. Для судовых, тепловозных и подобных им двигателей предложено большое количество формул [1,3 и т.д.] для определения коэффициента теплоотдачи от газов к поверхностям КС (α_r). Всего в настоящее время известно более 50 методик и формул для расчета теплоотдачи от газов к стенкам КС. Наибольшее внимания при исследовании теплообмена в цилиндре ДВС заслуживают исследования Г. Эйхельберга и Г. Вошни.

Из спектра формул определения величин коэффициентов теплоотдачи от газов к стенкам КС для автомобильных двигателей наиболее применима формула Вошни:

$$\alpha_2 = K_1 \cdot D^{-0,214} \cdot (p_2 \cdot C_m)^{0,786} \cdot (T_2^{-0,525} + B_1), \quad (5)$$

где K_1 – постоянная для конкретного двигателя, D – диаметр цилиндра, м; p_2 и T_2 – текущие значения давления (кГ/см^2) и температуры (K) газов в цилиндре; C_m – средняя скорость поршня (м/с); $B_1 = K_2 \cdot T_2 / T_c$ (K_2 – коэффициент, учитывающий вид сгорания, T_2 и T_c – температуры газов в конце горения и сжатия, K). Для двигателей с впрыском топлива B_1 не учитывается.

Формула Эйхельберга для определения коэффициента теплоотдачи от газов в стенки КС имеет вид:

$$\alpha_2 = 2,1 \cdot \sqrt[3]{C_m} \cdot \sqrt{p_2 \cdot T_2}. \quad (6)$$

Однако до настоящего времени нет единой методики, позволяющей определять адекватную величину коэффициента α_r для различных ДВС. Дело обстоит так, что даже в пределах одного класса двигателей применение методик и результатов, разработанных и полученных на одном двигателе, на другой затруднено и не всегда оправдано.

Все без исключения формулы расчета коэффициента α_r обладают определенными недостатками:

- каждая формула может быть достаточно успешно использована только для определенной группы двигателей;
- большинство из этих формул позволяют вычислять лишь усредненные по тепловоспринимающей поверхности детали КС значения коэффициентов α_r , что делает необходимым проведение корректировки при назначении их локальных величин для различных участков теплообмена;
- если формула и позволяет вычислять мгновенные значения коэффициента α_r для произвольного участка, то она использует местные скорости газов относительно участков. Однако определение местных скоростей газов является не менее трудной задачей;

- теплообмен излучением в некоторых формулах либо не учитывается (формулы Эйхельберга, Вошни, Пфляума, Огури и др.), либо учитывается упрощенно (формулы Нуссельта, Бриллинга, Шиткеи и др.). При этом расчетный радиационный поток оказывается в 7...10 раз меньше экспериментально полученного значения [3].

Все изложенное требует соблюдения особой осторожности при использовании данных зависимостей для оценки величин коэффициентов теплоотдачи α_r для теплонагруженных деталей различных ДВС, в особенности, автомобильного класса. Следует заметить, что в известной автору литературе не содержится подобной зависимости для автомобильных двигателей.

Накоплен достаточно большой опыт по заданию ГУ 3-го рода для поверхностей поршня со стороны цилиндра для тяжелых дизелей [1,3]. Наиболее правомерно, в этом плане, использовать зависимости, основанные на пропорциональности величин коэффициентов теплоотдачи для данных поверхностей поршня и величин заполненных маслом зазоров. Однако этот и другие подходы также без существенной корректировки не могут быть применены для автомобильных двигателей.

Задание ГУ с внутренней поверхности поршня производится, как правило, по чисто эмпирическим формулам [1, 3]. Данное обстоятельство сужает возможности математического моделирования температурного состояния и теплонапряженности деталей, образующих КС автомобильных двигателей. Ощутимый пробел в этом направлении заполняют исследования Р.М. Петриченко, предложившего достаточно точные и работоспособные аналитические зависимости для оценки величин коэффициентов теплоотдачи от внутренней поверхности поршня к охлаждающему маслу. Следует, однако, отметить, что данные зависимости апробированы только для тяжелых судовых, тепловозных и подобных им двигателей, для которых они разрабатывались и на базе которых проверялись. Для автомобильных двигателей требуется их уточнение.

Назначение определяющих температур окружающих сред (t_{oc}) для участков теплообмена поршня производится на основе экспериментальных данных. Со стороны газов – на базе диаграммы мгновенных значений температур газов в цилиндре [1], на других поверхностях – на основе непосредственных замеров температур окружающих участков сред. Величины значений t_{oc} для участков теплообмена поршня со стороны цилиндра и масляного охлаждения у различных двигателей отличаются очень незначительно. Все это говорит о том, что их назначение для поршня конкретного двигателя, в том числе автомобильного ряда, не представляет особых трудностей.

Использование для определения ГУ 3-го рода известных рекомендаций, методик и зависимостей в силу их неуниверсальности при исследованиях теплового состояния конкретного двигателя приводит в некоторых случаях к значительным ошибкам, величины которых доходят до 20...40% [1,3]. Для уменьшения ошибок многие исследователи прибегают к корректировке коэффициентов теплоотдачи по данным натурных испытаний. Для этой цели применяют, например, метод подгонки, метод комбинаций справочных и экспериментальных данных по наиболее важным поверхностям поршней и других теплонагруженных деталей ДВС [1, 3].

Таким образом, в случае анализа температурного состояния и теплонапряженности поршней автомобильных двигателей можно учесть накопленный опыт определения ГУ для поршней тяжелых дизелей и, используя метод решения обратных задач теплопроводности, получать достаточно точные значения ГУ 3-го рода. Однако этот путь назначения ГУ, в силу трудоемкости и эмпиризма, нельзя считать оптимальным, если не удастся организовать автоматизацию процесса.

Большой скачок в процессах прогнозирования полей температур, деформаций и напряжений в деталях ДВС был сделан с использованием МКЭ. При реализации МКЭ и решении задач производится:

- деление физической области задачи на подобласти или конечные элементы (КЭ);

- аппроксимация функцией специального вида на каждом КЭ исходной величины (температуры, перемещения, напряжения и т.д.);
- получение системы уравнений с неизвестными параметрами после подстановки этих аппроксимаций в определяющие уравнения. В результате решения данной системы получается приближенное решение поставленной задачи [1, 2, 3 и т.д.].

К числу преимуществ МКЭ следует отнести возможность применения одного и того же дискретно-элементного представления тела детали для решения задачи и теплопроводности, и термоупругости. Это позволяет, кроме сокращения общего количества исходной информации, иметь точную увязку температурных полей и вызываемых этими полями деформаций, определяющих напряженно-деформированное состояние (НДС) исследуемых деталей.

Наибольшая продуктивность при создании и совершенствовании конструкций ДВС достигается при комплексном использовании натуральных исследований и моделирования на ЭВМ. Уровень математического моделирования существенно повышается, когда исходную информацию для моделей получают на базе непосредственных натуральных испытаний экспериментальных образцов деталей двигателей. При таком пути резко сокращаются сроки доводки, повышается качество и технический уровень создаваемых конструкций ДВС.

Таким образом, в практике моделирования температурных полей деталей ДВС неизбежна корректировка ГУ по данным натуральных испытаний, независимо от способа их определения и типа двигателя. Корректировку обычно осуществляют на основе сравнения расчетных и экспериментальных температур в контрольных точках участков теплообмена поверхностей деталей. Успех данного процесса зависит от опыта и знаний исследователя о влиянии величин коэффициентов теплоотдачи (α) для различных участков теплообмена поверхностей на температурное состояние исследуемых деталей [1, 3 и т.д.]. В этой связи, при определении величин коэффициентов α для участков теплообмена по поверхностям теплонагруженных деталей ДВС (в частности, поршней) для ускорения процесса корректировки и повышения точности вычислений представляется целесообразным использование итерационных методов оптимизации физических процессов и упругих систем (конструкций деталей). Однако возможность и эффективность осуществления итерационных алгоритмов, при этом, зависит от наличия и выполнения некоторых исходных условий, которые необходимо предварительно проверить.

Перед разработкой универсальной итерационной методики определения ГУ 3-го рода для поршней ДВС разнообразных типоразмеров произведено исследование влияния изменения величин коэффициентов α для различных участков теплообмена на изменение расчетных значений температур поршня в контрольных точках участков. Для этих целей был специально взят изученный объект – поршень с камерой сгорания ЦНИДИ, для которого известны ГУ 3-го рода, показанный на рис. 1 [4]. В качестве “условно” экспериментальных температур были приняты их значения в точках участков теплообмена по поверхностям КЭМ температурного состояния поршня.

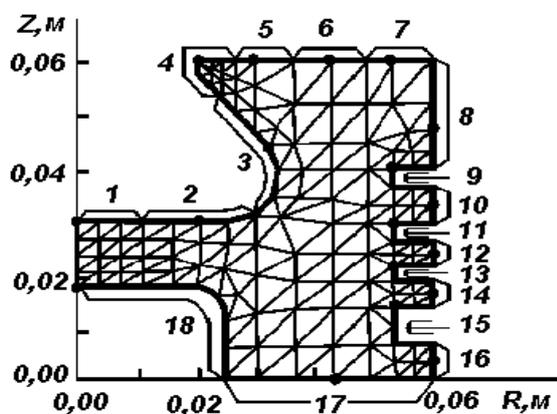


Рис. 1. Сетка КЭ и участки теплообмена поршня с камерой сгорания ЦНИДИ:

- – контрольные точки;  – участки теплообмена

Материал поршня – алюминиевый сплав АК9ч с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 167$ Вт/(м·град). Геометрические размеры, сетка КЭ, схема участков теплообмена, свойства материала поршня и ГУ 3-го рода взяты также из работы [4]. В качестве исходного принято температурное состояние поршня, определяемое набором началь-

Материал поршня – алюминиевый сплав АК9ч с коэффициентом теплопроводности $\lambda = 167$ Вт/(м·град). Геометрические размеры, сетка КЭ, схема участков теплообмена, свойства материала поршня и ГУ 3-го рода взяты также из работы [4]. В качестве исходного принято температурное состояние поршня, определяемое набором началь-

ных значений коэффициентов теплоотдачи и температур окружающих сред (α_i^H, t_{oci}) и, как следствие, $t_i^{(0)} = t_{zi}$ – температур поверхностей поршня в контрольных точках i -участков, которые представлены в табл. 1.

Таблица 1

Начальные значения ГУ 3-го рода и результаты сходимости итерационного процесса

Номер участка	t_{oci} , °С	α_i^H , Вт/(м ² ·град)	$t_i^{(0)} = t_{zi}$, °С	$\alpha_i^{(0)}$, Вт/(м ² ·град)	$K_i^{t(10)}$, -	$t_i^{(10)}$, °С	$\alpha_i^{(10)}$, Вт/(м ² ·град)
1	1040	500	245	600	1,001	245	539
2	880	610	245	600	1,000	245	607
3	870	650	291	600	0,998	291	622
4	765	600	352	600	1,001	352	619
5	770	610	327	600	1,000	327	615
6	840	575	303	600	0,998	303	577
7	900	530	297	600	0,997	296	505
8	640	390	268	600	0,999	268	379
9	200	20000	234	10000	1,001	235	18431
10	130	150	203	200	1,009	204	310
11	180	15000	200	10000	1,002	201	13297
12	130	150	178	200	0,997	178	193
13	150	10000	178	10000	1,001	178	10042
14	130	150	157	200	0,997	157	110
15	100	5000	162	10000	0,996	161	5247
16	100	150	148	200	1,003	148	129
17	100	5000	164	1000	1,009	165	1244
18	90	600	236	1000	0,999	235	736

Из исходного состояния осуществлялись приращения коэффициентов теплоотдачи $\Delta\alpha_j$ (на 100 Вт/(м²·град)) для каждого участка теплообмена и выполнялись расчеты МКЭ с набором коэффициентов теплоотдачи, которые можно записать в виде вектор-столбцов:

$$\alpha^j = (\alpha_1^H, \alpha_2^H, \dots, \alpha_j^H + \Delta\alpha_j, \dots, \alpha_i^H)^T, \quad i=1..18, j=1..18, \quad (7)$$

где T – знак транспонирования матрицы; i – количество участков теплообмена; j – конкретный участок.

Для каждого вектор-столбца (7) определялось температурное состояние поршня, характеризуемое вектор-столбцом значений температур в контрольных точках участков:

$$t^j = (t_1^j, t_2^j, \dots, t_i^j, \dots, t_{18}^j)^T, \quad j=1..18, i=1..18. \quad (8)$$

В результате исследований построена матрица Якоби J , которая состоит из элементов $J_{ij} = \frac{\partial t_i^j}{\partial \alpha_i} \approx \frac{\Delta t_i^j}{\Delta \alpha_i}$. Каждая i -строка матрицы соответствует участку теплообмена, на котором

определяется изменение температуры Δt_i^j , а j – столбец участка, на котором осуществляется изменение коэффициента α на величину $\Delta \alpha_j$. Таким образом, элемент матрицы

J_{ij} определяет изменение температуры Δt_i^j в контрольной точке i -участка теплообмена при изменении величины коэффициента теплоотдачи $\Delta \alpha_j$ на j -участке.

Другими словами, по результатам численных экспериментов определялись элементы матрицы J , с помощью которых можно оценить изменение температур в контрольной точке i -участка при варьировании коэффициента теплоотдачи на j -участке, что можно представить в виде:

$$J_{ij} = \frac{\Delta t_i^j}{\Delta \alpha_j} = \frac{(t_j^i - t_i^{(0)})}{\Delta \alpha_j}. \quad (9)$$

Анализ матрицы J позволил сделать следующие выводы:

– "локальное" изменение коэффициента теплоотдачи α_i на тепловоспринимающем i -участке ($i = 1..8$) приводит к "локальному" изменению температуры t_i в контрольной точке i -участка, значительно превышающему изменение температур t_j в контрольных точках других тепловоспринимающих участков, что выражается следующим образом:

$$\frac{\partial t_i}{\partial \alpha_i} > \frac{\partial t_j}{\partial \alpha_i}, \quad i \neq j, j = 1..8, i = 1..8, \quad (10)$$

– для теплоотводящих участков ($i = 9..18$) поршня справедливо неравенство, аналогичное (10):

$$\left| \frac{\partial t_i}{\partial \alpha_i} \right| > \left| \frac{\partial t_j}{\partial \alpha_i} \right|, \quad i \neq j, j = 9..18, i = 9..18, \quad (11)$$

– изменение величины коэффициента α_i на тепловоспринимающих участках поршня ($i = 1..8$) приводит к сравнительно большим изменениям температур в контрольных точках теплоотводящих участков. Например, при $\Delta \alpha_3 = 100$ Вт/(м²·град), изменение температуры в контрольной точке девятого участка $\Delta t_9 = 1,4^\circ\text{C}$, тогда как при таком же изменении α_9 , $\Delta t_9 = -0,1^\circ\text{C}$;

– изменение величин коэффициентов теплоотдачи на теплоотводящих участках поршня (исключая участок 18) приводит к незначительным изменениям температур на тепловоспринимающих его участках;

– наблюдается значительная взаимосвязь между величинами коэффициентов теплоотдачи и значениями температур в контрольных точках для участков головки поршня 1 и 18, которая объясняется близостью этих участков, что может вызвать трудности при организации итерационного процесса определения набора искомых коэффициентов α_i .

При корректировке ГУ 3-го рода рекомендуется исследователям использовать полученные закономерности, так как с большой вероятностью они справедливы для поршней самых различных типов ДВС. В частности, при использовании МКЭ для приближенного решения обратной задачи теплопроводности перебором вариантов рекомендуется осуществлять на первом этапе корректировку коэффициентов теплоотдачи на тепловоспринимающих поверхностях. Получив удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных значений температур на данных участках, следует переходить к корректировке коэффициентов теплоотдачи на теплоотводящих участках поршней. При этом в температурное состояние тепловоспринимающих участков заведомо вносится незначительное изменение.

Результаты проведенных численных исследований открывают возможность применения для решения обратной задачи теплопроводности итерационных методов решения нелинейных уравнений, используя особенности построенной матрицы Якоби J .

В математической формулировке задача определения коэффициентов теплоотдачи α_i для N участков теплообмена поршня сводится к отысканию вектор-столбца варьируемых параметров

$$\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i, \dots, \alpha_N)^T, \quad i = 1..N, \quad (12)$$

являющегося решением системы нелинейных уравнений

$$t_i(\alpha) = t_{\varepsilon i}, \quad i = 1..N, \quad (13)$$

которая в безразмерной форме имеет вид:

$$F_i(\alpha_i^p) = K_i^t(\alpha_i^p) - 1; \quad i = 1..N, \quad (14)$$

где введен коэффициент, характеризующий отклонение расчетной температуры $t_i(\alpha)$ от экспериментальной $t_{\varepsilon i}$ в контрольной точке i -участка:

$$K_i^t(\alpha_i^p) = \frac{t_i(\alpha_i^p)}{t_{\varepsilon i}}, \quad i = 1..N, \quad (15)$$

здесь p – номер шага итерационного процесса.

На основании проведенных выше расчетно-математических исследований установлено, что изменение коэффициента теплоотдачи α_i на i -участке теплообмена приводит к преобладающему "локальному" изменению температурного состояния поршня ДВС на i -участке, значительно превышающему изменение температур t_j в контрольных точках других участков теплообмена, т.е.:

$$\left| \frac{\partial K_i^t}{\partial \alpha_i} \right| > \left| \frac{\partial K_i^t}{\partial \alpha_j} \right|, \quad i \neq j, \quad j = 1..N, \quad i = 1..N. \quad (16)$$

Используя (16) при организации итерационного процесса решения системы (13), принимаем:

$$\left| \frac{\partial K_i^t}{\partial \alpha_j} \right| = 0, \quad i \neq j, \quad j = 1..N, \quad i = 1..N. \quad (17)$$

Условия (16) и (17) позволяют предложить для решения системы (13) итерационную формулу, которая была сформирована на базе одного из алгоритмов оптимизации зависимых систем [5]:

$$\alpha_i^{(p+1)} = \alpha_i^{(p)} \left[1 \pm \frac{F_i(\alpha^{(p)})}{r} \right], \quad i = 1..N, \quad (18)$$

где r – параметр, влияющий на скорость сходимости итерационного процесса.

При проведении итерационных расчетов, параметр r для каждого конкретного объекта исследований, отслеживая его особенности, определяется численным подбором, когда совершается наименьшее количество шагов итераций до достижения желаемого результата. Для данного случая r принят равным 0,3.

Знак "плюс" в выражении (18) используется при корректировке α_i на теплоотводящих участках теплообмена поршня, а знак "минус" – на теплоподводящих участках. Итерационный процесс по формуле (18) осуществляется до условия останова (задаваемой точности решения ε):

$$\left| F_i(\alpha^{(p)}) \right| \leq \varepsilon. \quad (19)$$

Как показали расчетные исследования, для ускорения итерационного процесса корректировки α_i при невозможности достижения условия останова (расхождении процесса) на

теплоотводящих участках поршней ДВС путем решения обратной задачи теплопроводности МКЭ, для тепловоспринимающих поверхностей можно задать ГУ 1-го рода, а потом произвести подобную операцию для теплоподводящих участков.

Проверка работоспособности данного алгоритма итерации осуществлена на примере того же поршня (см. рис. 1). Перед осуществлением итерационного процесса принималось $t_{эi} = t_i^{(0)}$ и искусственно (для имитации обычного практического процесса определения ГУ 3-го рода), были приняты условные значения $\alpha_i^{(0)}$, существенно отличающиеся от $\alpha_i^{(H)}$ – на некоторых участках это отличие доходило до 2 раз (см. табл. 1). После осуществления итерационных поисковых процедур по схеме (18) до выполнения условия останова (19) получен искомый набор $\alpha_i^{(10)}$, обеспечивающий в контрольных точках расхождение расчетных $t_i^{(10)}$ и соответствующих экспериментальных значений температур $t_{эi} = t_i^{(0)}$ не более 1°C ($\varepsilon = 0,01$). При этом потребовалось девять шагов итерации ($p = 9$). После первого шага итерации большие отличия изначально заданных и реальных значений коэффициентов теплоотдачи на всех участках теплообмена поршня сразу же существенно сглаживались (рис. 2). В табл. 1, кроме указанных выше величин, приведена информация, полученная в ходе итерационного процесса.

На рис. 2 приведены графики сходимости итерационного процесса для участков теплообмена исследуемого поршня 9, 17 и 18 в зависимости от числа шагов итерации. Для остальных участков отмечена лучшая сходимость.

Таким образом, применение итерационного процесса по формуле (18) позволяет определять для поршней ДВС значения коэффициентов теплоотдачи, обеспечивающие совпадение расчетных и экспериментальных значений температур в контрольных точках участков теплообмена с любой необходимой для практики точностью. При инженерных расчетах, очевидно, нет смысла задавать точность итерационного процесса для определения коэффициентов теплоотдачи выше погрешности экспериментальной оценки температур в точках участков.

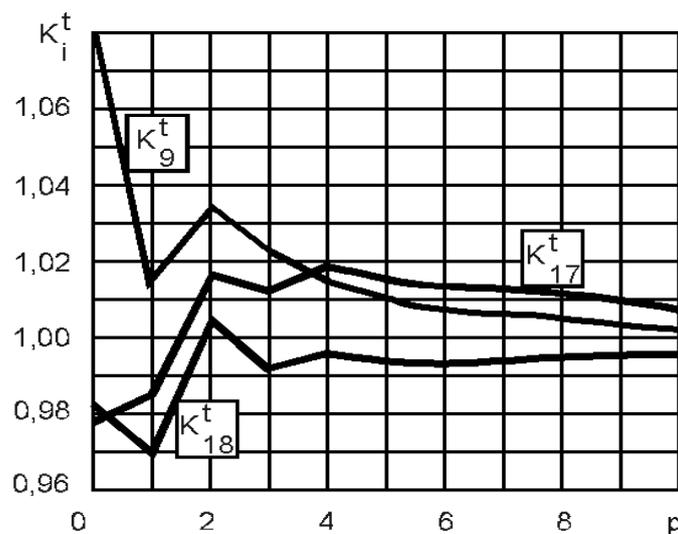


Рис. 2. Сходимость итерационного процесса по K_i^t

Определенный набор ГУ 3-го рода для участков теплообмена поршней ДВС и полученные поля температур и напряжений являются базовой КЭМ теплонапряженности поршней для разработки КЭМ перспективных конструкций поршней двигателей путем проведения численных экспериментов.

Итерационная методология определения ГУ 3-го рода в силу своей простоты, относительной легкости осуществления и высокой получаемой точности рекомендуется для численного моделирования теплового и напряженно-деформированного состояния теплонагруженных деталей любых машин.

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания. Конструирование и расчет на прочность поршневых и комбинированных двигателей / Д.Н. Вырубов [и др.]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1984. – 384 с.
2. **Кузьмин, Н.А.** Профилирование головок поршней ДВС // Изв. вузов. Машиностроение. – 2006. №12. С. 41–46.
3. **Костин, А.К.** Теплонапряженность двигателей внутреннего сгорания: справочное пособие / А.К. Костин, В.В. Ларионов, Л.Н. Михайлов. – Л.: Машиностроение, 1979. – 222 с.
4. Прочность материалов и элементов конструкций в экстремальных условиях / Г.С. Писаренко, [и др.]; под ред. Г.С. Писаренко. – Киев: Наук. думка, 1980. Т. 2. – 740 с.
5. **Малков, В.П.** Оптимизация упругих систем / В.П. Малков, А.Г. Угодчиков. – М.: Наука, 1981. – 216 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.02.2011*

N.A. Kuzmin, I.O. Donato

BOUNDARY CONDITIONS DETERMINATION FOR MACHINE ELEMENTS THERMAL TENSITY SIMULATION

The accuracy and practical value of finite element simulation and other computational methods that allow to estimate temperature fields, stresses and strains of machine elements are depend on science-based approaches that help to determine and validate necessary boundary conditions that is needed for sufficiently reproducing of machine elements real physical environment.

Key words: temperature, thermal tensity, finite element method, boundary condition, iteration, piston, working capacity, reliability.

УДК:624.042.12

А.П. Куляшов, И.А. Тютнев

**НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ТРУБОУКЛАДЧИКИ
ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматриваются вопросы работы трубоукладчиков в группе при выполнении подъема и укладки трубопроводов различных диаметров.

Ключевые слова: трубоукладчик, нагрузка, грузоподъемность.

К числу основных задач, которые возникают при оценке применимости того или иного трубоукладчика, относится определение его необходимой грузоподъемности. При этом следует отметить, что подавляющее большинство исследований [1, 2, 4, 12] посвящено изучению напряженно-деформированного состояния трубопровода в процессе его укладки. Как показывает анализ, именно при выполнении этого вида работ чаще всего возникают повреждения трубных плетей с образованием местных вмятин, гофр, складок [12]. Указанные явления с точки зрения строительной механики классифицируются как форма проявления локальной потери устойчивости стенки трубы.

Весь комплекс исследований, касающихся строительной прочности трубопроводов, условно может быть разделен на два направления. Одно из них включает в себя решение задач, связанных с поиском путей снижения изгибных напряжений в укладываемом трубопроводе как в балке, а другое – с оценкой величины критических значений таких напряжений, при которых труба может потерять местную устойчивость, т.е. получить повреждение.

При решении задач по первому направлению в основном акцент делается:

- на выбор оптимальных расстояний между трубоукладчиками в колонне;
- определение их рационального количества в технологической схеме;
- ограничение высот подъема плети и т.д.

Из рассмотрения результатов этих расчетов можно прийти к выводу, что для традиционных схем укладки возможность снижения уровня монтажных напряжений не безгранична (правда, если предположить, что весь укладываемый участок одновременно поднять и опустить в траншею множеством трубоукладчиков, то изгибные напряжения в нем могут стать близкими к нулю; но это представляется как сугубо теоретический вариант).

Относительно самих методов расчета трубопроводов при строительстве: изначально было принято рассматривать упруго изогнутый участок укладываемого трубопровода как линию, описываемую уравнением косинусоиды. Такая аппроксимация обеспечивала вполне удовлетворительную сходимость результатов (по отношению к данным, полученным более сложными методами, в частности, путем интегрирования общего дифференциального уравнения упругой линии [2, 4]), при вычислении прогибов трубопровода. Но при определении изгибающих моментов получаемая погрешность достигала при этом 41%.

Указанное обстоятельство побудило исследователей использовать более точные методы, но опять-таки основанные на тригонометрических функциях. Эти функции в отличие от многих других аналитических выражений легко интегрируются и неслучайно. Именно на этом «удобном» свойстве базируется известный в строительной механике вариационный метод Рейлея-Ритца, предусматривающий предварительное разложение исследуемой функции в ряд Фурье.

Используя классический принцип механики о том, что при равновесии упругой системы вариация разности между потенциальной энергией (упругой энергией внутренних сил)

и работой внешних активных сил равна нулю, можно записать общее уравнение этого баланса в виде:

$$EJ \int_0^l \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right)^2 dx - \sum_{k=1}^K P_k \delta y_k + \sum_{j=1}^N G_j \delta y_j + 2q \delta \int_0^l y dx, \quad (1)$$

где P_k G_k - сосредоточенные силы, направленные соответственно вверх (усилия со стороны трубоукладчиков) и вниз (нагрузки от веса технологических машин); EJ - изгибная жесткость трубопровода (как балки); l - длина рассматриваемого участка трубопровода; δ - символ вариации.

Исходя из теории рядов Фурье, прогиб трубопровода на участке длиной l представляется в виде функции:

$$y = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos \frac{(2n-1)\pi x}{2l}. \quad (2)$$

Соответствующий подбор коэффициентов $a_1, a_2 \dots a_n$ и последующие преобразования уравнений (1) и (2) позволяют определить прогибы трубопровода в любых произвольных сечениях, а также найти изгибающие моменты, возникающие в местах опирания плети на грузозахватные приспособления. Кроме того, по этой методике можно найти величины реакций, действующих со стороны захватов (троллейных подвесок) на трубопровод, т.е. определить нагрузки на трубоукладчики или, что главное в нашем исследовании – определить нагрузки, действующие со стороны трубопровода на трубоукладчик.

Степень точности расчета зависит только от того, сколько членов тригонометрического ряда было выбрано для рассмотрения. Однако увеличение числа членов этого ряда приводит к дополнительным сложностям расчета, и процедура вычислений становится сопоставимой по трудности с той, которая имеет место при интегрировании дифференциального уравнения упругой линии.

Указанное ранее обстоятельство представлялось крайне актуальным в тот период, а именно в 1960–1970 гг., когда основной объем вычислений производился вручную (без использования высокопроизводительной вычислительной техники). В настоящее же время, когда компьютерные технологии широко вошли во все области исследований, указанные сложности перестали считаться критичными. И тем не менее при поставке и формализации многих новых задач вопрос о выборе методов расчета (с учетом требований к точности окончательных результатов) по-прежнему актуален. Кроме того, при решении ряда исследовательских задач предпочтительным является изначальное изучение составленных функций методами математического анализа, или, как это принято называть, методами «ручного счета». В этом случае нередко удается установить совершенно неожиданные закономерности исследуемого процесса, что далеко не всегда достигается путем машинного счета.

Продолжая анализ литературных данных, касающихся методов расчета трубопроводов при строительстве, необходимо отметить успешно используемую в недалеком прошлом методику определения изгибных напряжений в стенках труб, основанную на применении теоремы о трех моментах [8].

Общий вид уравнений, которые должны быть составлены для построения системы счета, может быть представлен как

$$M_{n-1}l_n + 2M_n(l_n + l_{n+1}) + M_{n+1}l_{n+1} = \frac{q}{4}(l_n + l_{n+1}) - 6EJ \left(\frac{\Delta_n}{l_n} + \frac{\Delta_{n+1}}{l_{n+1}} \right), \quad (3)$$

где M_{n-1}, M_n, M_{n+1} - изгибающие моменты над левой, средней и правой опорами на рассматриваемом участке укладываемого трубопровода (в пределах двух смежных пролетов l_n и l_{n+1}); Δ_n и Δ_{n+1} - смещение средней опоры относительно левой и правой.

Недостатком этого метода является необходимость аппроксимации при выборе численных значений длин крайних пролетов. При некорректном выполнении этой процедуры

могут возникнуть неточности при получении окончательных результатов. Данная методика в основном предназначена для анализа существующих схем укладки, а также для обработки данных, полученных в ходе экспериментальных наблюдений за работой изоляционно-укладочной колонны. Более универсальной методикой, которая позволяет расчетным путем производить оптимизацию параметров схем укладки трубопроводов, является та, что предусматривает использование уравнения упругой линии. В общем виде запись этого уравнения может быть представлена как

$$EJy(x) = EJ_0 + EJ\varphi_0 x + M_0 \frac{x^2}{2} + R_0 \frac{x^3}{6} + \sum_{i=1}^n P_i \frac{(x-l_i)^3}{6} - \sum_{k=1}^m Q_k \frac{(x-l_k)^3}{6} - \frac{qx^4}{24}, \quad (4)$$

где EJ - изгибная жесткость трубопровода (как балки); $y(x)$ - прогиб трубопровода в текущей точке, удаленной от начала координат на расстоянии x ; y_0 - прогиб трубопровода в точке, где $x=0$; φ_0 и M_0 - соответственно угол поворота и изгибающий момент при $x=0$; R_0 ~ реакция грунта на трубопровод при $x=0$; P , и Q - сосредоточенные нагрузки от действия трубоукладчиков и технологических машин; l_i и l_k - расстояние от начала координат до точек приложения соответствующих нагрузок; q - вес единицы длины трубопровода (интенсивность вертикальной нагрузки).

В качестве исходных данных для расчета принимаются: технологические высоты подъема трубопровода, глубина траншеи, вес машин, а также физические характеристики самого трубопровода. Кроме того, в расчет могут быть введены дополнительные условия: минимизация изгибающих моментов в опасных сечениях трубопровода, равенство нагрузок на отдельные трубоукладчики и т.п.

В практическом приложении представляют интерес исследовательские работы, посвященные решению ряда конкретных производственных задач [8, 10, 12]. Применительно к укладке трубопроводов больших диаметров (1020–1420 мм) разработан специальный алгоритм расчета основных параметров данного процесса [8]. При его составлении использованы основные дифференциальные уравнения, представляющие собой соответствующие производные уравнения упругой линии (4).

Если бы рассматривалась схема укладки трубопроводов диаметром от 530 до 720 мм, то каждая точка подвеса могла бы быть реализована одним трубоукладчиком.

Принятое ранее допущение о приведении суммарной нагрузки в составе группы к одной точке вносит некоторую погрешность в результаты расчетов (до 5–8 %), но следует при этом иметь в виду, что эта погрешность идет в запас. И в том случае, когда один из трубоукладчиков этой группы случайно выходит из-под нагрузки, никаких отрицательных последствий возникать не должно.

Заметим, что вопрос о формировании в колонне трех групп трубоукладчиков в свое время был детально обоснован [10]; такой подход позволяет обеспечить (при равенстве всех опорных моментов) условие предельного снижения напряжений изгиба в укладываемом трубопроводе.

Значение опорных моментов для рассматриваемой задачи определяется из соотношения:

$$M_1 = M_2 = M_3 = 0,52\sqrt{EJhq}, \quad (5)$$

где h - технологическая высота подъема трубопровода относительно дна траншеи.

Расчетная длина пролета l вычисляется по формуле:

$$l = 2,46\sqrt{\frac{EJh}{q}}. \quad (6)$$

Нагрузка на комплекс трубоукладчиков может быть получена из уравнения:

$$M_1 = M_2 = M_3 = Pl \rightarrow P = \frac{M}{l} = \frac{0,52\sqrt{EJhq}}{2,46\sqrt{\frac{EJh}{q}}} = 0,211q. \quad (7)$$

Решение данного выражения дано в безразмерных величинах. Чтобы получить реально действующие значения сил, необходимо безразмерную величину умножить на расстояние между трубоукладчиками на трассе:

$$P_T = PL = 0,211qL. \quad (8)$$

Следует отметить, что расстояние между трубоукладчиками (или их группами) не может быть произвольным, так как оно влияет на создание напряжений в трубопроводе. Согласно [10], расстояние между группами трубоукладчиков следует определять по выражению:

$$L = 1,2 \div 1,94 \sqrt{\frac{EJh_T}{q}}. \quad (9)$$

Тогда уравнение (8) примет вид:

$$P_T = PL = 0,34 \sqrt{EJh_T q^3}. \quad (10)$$

Решения данного уравнения для существующих типов трубопроводов [1, 5] показаны на рис. 1

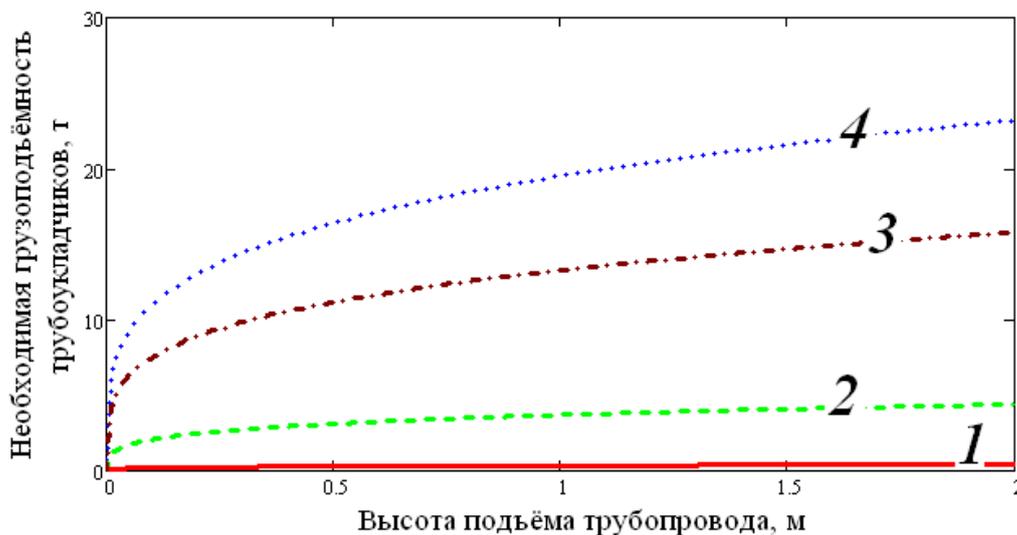


Рис. 1. Зависимость необходимой грузоподъемности трубоукладчиков от высоты подъема трубопровода:

1 – для диаметра 560 мм; 2 – для диаметра 720 мм;
3 – для диаметра 1200 мм; 4 – для диаметра 1400 мм

Полученное уравнение позволяет сделать правильный выбор трубоукладчиков на этапе подготовки комплекса машин для ремонта трубопровода на этапе выбора технологии его ремонта, от которой зависит необходимая величина подъема трубопровода.

Библиографический список

1. **Айнбиндер, А.Б.** Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость / А.Б. Айнбиндер, А.Г. Камерштейн. – М.: Недра, 1984.
2. **Аникин, Е.А.** Технология укладки подземных трубопроводов // Сер. Транспорт и хранение газа. ВНИИЭгазпром. 1983. Вып. 5. С. 41–50.
3. **Баловнев, В.И.** Моделирование процессов взаимодействия со средой рабочих органов дорожно-строительных машин / В.И. Баловнев. – М.: Высш. шк., 1973.
4. Организация строительства магистральных трубопроводов / Ю.П. Баталини [др.]. – М.: Недра, 1980.
5. **Бородавкин, П.П.** Механика грунтов в трубопроводном строительстве / П.П. Бородавкин. – М.: Недра, 1976.
6. **Бородавкин, П.П.** Прочность магистральных трубопроводов / П.П. Бородавкин, А.М. Синезов. – М.: Недра, 1984.

7. **Ващук, И.М.** Трубоукладчики / И.М. Ващук, В.И. Уткин, Б.И. Харкун. – М.: Машиностроение, 1989.
8. **Габеляя, Р.Д.** Исследование повышения групповой устойчивости трубоукладчиков при укладке магистральных стальных трубопроводов больших диаметров: дисс. ... канд. техн. наук / Габеляя Р.Д. – М., МИНХ и ГП им. И.М. Губкина, 1975.
9. **Гальперин, А.И.** Краны-трубоукладчики / А.И. Гальперин. – М.: Машиностроение, 1961.
10. **Гортинский, И.Е.** Определение оптимального числа трубоукладчиков в колонне с учетом маневренности // Строительство трубопроводов. 1980. №11. С. 23–25.
11. Строительство трубопроводов на слабых грунтах / Р.М. Султанов [и др.]. – Н. Новгород: НПК, 2002.
12. Совершенствование технологии и технических средств при капитальном ремонте линейной части магистральных газопроводов: дисс. канд. техн. наук по спец. 25.00.19 / Тютнев А.М. – М., 2006.

A.P. Kulyashov, I.A. Tutnev

WORKLOADS, INFLUENCED ON PIPELAYER, ON MANUFACTURING OPERATE

This article has devoted of determinated workload, influenced on pipelayer, on manufacturing operate.

Key words: pipelayer, workload, vehicle capacity.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.124

В.А. Зуев, Е.М. Грамузов

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ СУДНА В БИТЫХ ЛЬДАХ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен уточненный метод пересчета сопротивления битого льда с модели на натуре с учетом плотности воды и льда.

Ключевые слова: ледовые условия, сопротивление, битые льды, судно, физико-механические характеристики.

Большое разнообразие ледовых условий, нестабильность свойств и характеристик битых льдов делают практически невозможным достаточно точно и определенно зафиксировать многочисленные параметры, характеризующие натурную ледовую обстановку. Однако это обстоятельство не снимает актуальности вопроса оценки ледовых качеств судов в битых льдах. По-прежнему судостроителей волнует вопрос ледового сопротивления в этих условиях. Для описания ледовой обстановки и ее связи с ледовым сопротивлением вводят понятие «стандартных ледовых условий», позволяющих в некоторой степени однозначно зафиксировать ледовые условия относительно наиболее важных параметров, влияющих на ледовое сопротивление. К ним следует отнести природные мелкобитые льды и битые льды в каналах, образованных после похода ледокола в сплошном ледяном покрове.

При регламентации условий ледового плавания Российским морским регистром судоходства используются следующие определения [4]:

- сплоченность – мера сплошности ледяного покрова, характеризуемая отношением площади, занимаемой льдами, к общей площади рассматриваемого участка акватории (оценивается по 10-балльной шкале);
- разреженный лед – лед сплоченностью 4-6 баллов, в котором большинство льдин не соприкасаются между собой;
- сплоченный лед – лед сплоченностью 7-8 баллов, в котором большинство льдин соприкасаются между собой;
- очень сплоченный лед – лед, сплоченность которого равна или более 9 баллов, но менее 10 баллов;
- сплошной лед – лед сплоченностью 10 баллов.

Лед также характеризуется толщиной.

Российский речной регистр характеризует битые льды только толщиной [4].

Очевидно, что такое описание ледовых условий нельзя признать достаточным для адекватной оценки ледовой ходкости.

Мелкобитые льды принято характеризовать: толщиной h – средняя толщина плавающих льдин, как правило, равная толщине разрушенного ледяного покрова за счет ветра, волнения или после прохода ледокола; сплоченностью S – отношение площади, покрытой льдом, ко всей площади поверхности участка водоема. При анализе ледового сопротивления

к ним присоединяют: плотность льда ρ_l – масса льдины, отнесенная к ее объему; коэффициент трения f пары лед – наружная обшивка корпуса судна. Для описания ледовых каналов к характеристикам ледовых условий добавляют ширину канала B_k . Заметного разрушения льдин при контактах между собой и корпусом не происходит, поэтому прочие физико-механические характеристики льда принято не включать в рассмотрение.

В настоящее время существуют созданные различными авторами методы расчета сопротивления в битых льдах [1, 2]. В них учитываются главные размерения, некоторые характеристики формы корпуса судна, скорость хода и перечисленные параметры битого льда. Определяя основные взаимосвязи, они не могут в достаточной мере, отразить стереометрию взаимодействия корпуса судна со льдом.

Устоявшимся считается разделение ледового сопротивления $R_{л}$ на чистое ледовое сопротивление $R_{чл}$ и сопротивление воды $R_{в}$: $R_{л} = R_{чл} + R_{в}$. При этом чистое ледовое сопротивление разделяют на независимое от скорости v , так называемое прямое сопротивление $R_{п}$, и скоростное сопротивление $R_{ск}$: $R_{чл} = R_{п} + R_{ск}$. Сопротивление воды принято определять обычными методами и считать его независимым от чистого ледового сопротивления $R_{чл}$.

С физической точки зрения *прямое сопротивление* связывают с затратами энергии на притапливание льдин корпусом судна, а *скоростное сопротивление* – с динамическими процессами страгивания льдин при контакте с корпусом и их раздвигания в воде корпусом судна. Во всех случаях контакта льдин с корпусом возникают сопутствующие силы трения.

Картина взаимодействия корпуса судна с битым льдом существенно зависит от его сплоченности.

Так, например, для льда сплоченностью 10 баллов взаимодействие можно представить следующим образом. Льдины, взаимодействуя с корпусом, поворачиваются, притапливаются и раздвигаются, следуя обводам подводной части корпуса ледокола. Траектория движения льдин существенно зависит от формы корпуса. Практически весь сломанный лед попадает под корпус, образуя в его подводной части ледяную «рубашку». Облегание притопленным льдом подводной части корпуса происходит на значительном расстоянии от форштевня по длине судна и вниз от действующей ватерлинии. Ширина контакта обшивки с льдинами по периметру шпангоута с каждого борта равна, примерно, полуширине ледовой ватерлинии в соответствующем районе по длине судна (рис. 1). Между зонами облегания льда правого и левого борта образуется разрыв в ледяной рубашке. В носовой части судна обломки льда образуют оболочку, плотно прилегающую к наружной обшивке. Лед в данном районе корпуса прижимается к обшивке силами его плавучести и гидродинамическими силами, поскольку внешняя нормаль к наружной обшивке составляет острый угол с направлением движения. В кормовой части плотность оболочки уменьшается за счет противоположного действия гидродинамических сил. При приближении к корме возможны отрывы ледяной оболочки. Устойчивость ледяной оболочки особенно в кормовой оконечности зависит от формы корпуса подводной части и скорости движения судна. Пройдя наиболее широкую часть корпуса судна, часть льда всплывает по бортам, а часть остается под днищем и попадает в винты. После прохождения судна практически весь лед всплывает в канале, засоряя его до 9-10 баллов.

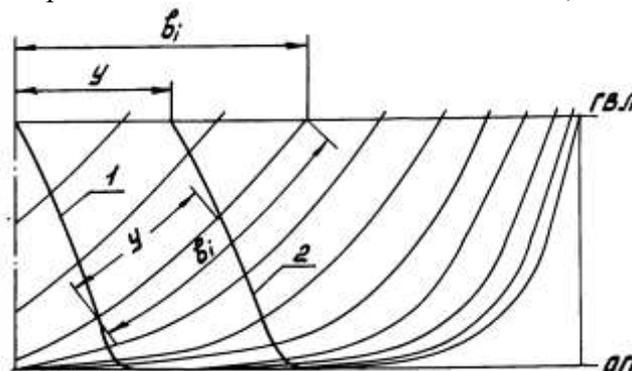


Рис. 1. Схема облегания корпуса обломками льда:
1 – нижняя граница ледяной «рубашки»; 2 – траектория движения льдины)

При движении судна в разреженных битых льдах льдины поворачиваются, притапливаются и раздвигаются. Взаимодействие с корпусом, за счет меньшего стеснения льдин, происходит в районе действующей ватерлинии, лед практически не попадает под корпус. При промежуточных значениях сплоченности 6–9 баллов имеет место переходная картина взаимодействия, существенно зависящая от скорости хода.

Существующие методы расчета чистого ледового сопротивления противоречат друг другу в количественном, а иногда и качественном плане, и часто не дают удовлетворительного, с точки зрения потребностей практики, ответа. В этой связи актуальными остаются экспериментальные методы определения ледового сопротивления.

Суть проведения испытаний, которая состоит в использовании в качестве моделей льда материалов, удовлетворяющих критериям подобия.

Анализ природы действующих на судно сил и условий их подобия позволил установить, что для моделирования движения в битых льдах необходимо выполнить следующие условия:

- форма корпуса модели должна быть геометрически подобной натурному судну. Масштаб геометрического подобия λ ;
- число Фруда одинаково для модели и натуре $Fr = idem$;
- сплоченность льда одинакова для модели и натуре $S = idem$;
- плотность воды и льда одинаковы для модели и натуре:

$$\rho_B = idem, \quad \rho_L = idem;$$

- коэффициент трения льда о корпус судна одинаков для модели и натуре $f = idem$;

При выполнении этих условий ледовое сопротивление натурного судна при движении в битых льдах можно определить пересчетом в соответствии с законом подобия Фруда по кубу масштаба λ^3 .

Требования критериев подобия технически может быть выполнено с разной степенью точности, что в свою очередь значительно влияет на результаты прогноза натурального сопротивления.

Геометрическое подобие модели может быть выполнено и проверено с достаточной точностью.

Коэффициент трения льда о корпус регулируется покрытием поверхности модели и выполняется с необходимой точностью.

Сплоченность льда обычно определяется суммарной площадью размещаемых льдин, а равномерность их распределения по поверхности бассейна – ответственностью руководителя испытаний, но может контролироваться с помощью фотографирования.

Соответствие плотностей воды и льда натурным условиям должны быть подвергнуты дополнительному анализу, который удобно выполнить для наиболее регулярных условий битого льда 10-балльной сплоченности.

Сопротивление битого льда можно представить в виде

$$R_o = R_n + R_u + R_2, \quad (1)$$

где R_n - сопротивление, обусловленное плавучестью льдин;

R_u - инерционная составляющая сопротивления;

R_2 - гидродинамическая часть сопротивления, связанная с сопротивлением воды движению льдин.

На элемент обшивки $d\Omega$, взаимодействующий с льдинами, действуют нормальное усилие dN , обусловленное перечисленными составляющими, и касательное усилие dF , обусловленное трением льда.

Применяя принцип суперпозиции, можно записать

$$dN = dN_n + dN_u + dN_2. \quad (2)$$

Если считать, что трение обшивки о лед подчиняется закону Кулона-Амонтона, то

$$dF = fdN, \quad dF_{n,u,z} = fdN_{n,u,z}. \quad (3)$$

Рассмотрим последовательно каждую составляющую сопротивления льда.

Обозначим углы, характеризующие форму обводов корпуса некоторой точки судовой поверхности:

φ_1 - угол между касательной к батоксу и ОП;

φ_2 - угол между касательной к ватерлинии и ДП;

φ_3 - угол наклона шпангоута к вертикали.

Введем также направляющие косинусы нормали и некоторого касательного направления для произвольной точки судовой поверхности. Для краткости записи обозначим их:

$$n_x = \cos(\vec{n}, \vec{x}); n_y = \cos(\vec{n}, \vec{y}); n_z = \cos(\vec{n}, \vec{z});$$

$$\tau_x = \cos(\vec{\tau}, \vec{x}); \tau_y = \cos(\vec{\tau}, \vec{y}); \tau_z = \cos(\vec{\tau}, \vec{z}).$$

Отметим, что направляющие косинусы и углы наклона судовой поверхности аналитически связаны между собой с помощью следующих равенств:

$$n_x = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}}; \quad n_y = \frac{1}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}};$$

$$n_z = \frac{\operatorname{tg}\varphi_3}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_2 + \operatorname{tg}^2\varphi_3}}; \quad n_x^2 + n_y^2 + n_z^2 = 1; \quad \operatorname{tg}\varphi_1 = \frac{\operatorname{tg}\varphi_2}{\operatorname{tg}\varphi_3}.$$

Нормальное усилие, действующее на элемент обшивки $d\Omega$, обусловленное плавучестью льда

$$dN_n = n_z dZ_n = n_z (\rho - \rho_n) gh d\Omega. \quad (4)$$

Проекция этих усилий dN_n и dF_n на направление движения (ось Ox):

$$dX_n = dN_n n_x + dF_n \tau_x. \quad (5)$$

Интегрируя (5) с учетом (4) и (3) по всей зоне облегаания корпуса льдом Ω_n , получим выражение для составляющей сопротивления, связанной с плавучестью льда

$$R_n = (\rho - \rho_n) gh \int_{\Omega_n} (n_z n_x + f n_z \tau_x) d\Omega. \quad (6)$$

При определении инерционной составляющей льдин учтем, что наиболее значительные ускорения льдины получают при первоначальном контакте корпуса со льдом. Поэтому приближенно можно считать, что инерционные силы приложены в районе действующей ватерлинии.

Изменение кинетической энергии элемента льда в момент контакта под действием элементарной силы, приложенной со стороны обшивки,

$$dN_u d\eta = K_2 + K_1, \quad (7)$$

где dN_u - нормальная инерционная сила, действующая на элемент ватерлинии;

$d\eta$ - перемещение вдоль нормали;

$K_2 + K_1$ - изменение кинетической энергии элемента льда.

Деля уравнение (7) на $d\eta$ и подставляя выражение для кинетической энергии, получим

$$dN_u = \frac{c_u}{d\eta} \cdot \frac{m(v_{N_2}^2 - v_{N_1}^2)}{2}, \quad (8)$$

где m - масса элемента льда;

v_{N_1} и v_{N_2} - скорости элемента льда до и после контакта;

c_u - безразмерный коэффициент, учитывающий присоединенные массы воды.

Пусть приращение скорости льда происходит скачкообразно в районе КВЛ от нуля до скорости, обусловленной скоростью судна, тогда

$$v_{N_1} = 0; \quad v_{N_2} = vn_x. \quad (9)$$

Массу элемента льда представим в виде

$$m = \rho_l h dx dy. \quad (10)$$

Выразим нормальное перемещение обшивки $d\eta$ через поступательное перемещение судна dx :

$$d\eta = dx n_x. \quad (11)$$

Подставляя (9), (10) и (11) в (8), получим

$$dN_u = c_u h \frac{\rho_l v^2}{2} n_x dy. \quad (12)$$

Проецируя инерционные и сопутствующие силы трения на направление движения и интегрируя по ширине носовой ветви КВЛ,

$$R_u = \rho_l h v^2 \int_0^{B/2} c_u (n_x^2 + f n_x \tau_x) dy. \quad (13)$$

Нормальное гидродинамическое усилие, действующее на элемент "ледяной рубашки" и передаваемое на корпус судна, может быть определено по формуле

$$dN_z = c_z \frac{\rho v_N^2}{2} d\Omega = c_z \frac{\rho v^2}{2} n_x^2 d\Omega. \quad (14)$$

Касательную компоненту и суммарную проекцию гидродинамических сил, действующих на элемент льда, найдем по формулам (3) и (5).

Интегрируя по площади зоны контакта, определим

$$R_z = \rho v^2 \int_{\Omega_l} c_z (n_x^3 + f n_x^2 \tau_x) d\Omega. \quad (15)$$

В интегралы (6), (13) и (15) входит косинус угла между касательной к траектории движения льда в данной точке и направлением движения τ_x . Из наблюдений за движением льда относительно обшивки следует, что лед движется в направлении, составляющем минимальный угол с направлением движения какой только допускают обводы корпуса в данном районе. В частности, по плоскому днищу движение происходит приблизительно по батоксам, а по вертикальному борту по ватерлиниям.

Определим τ_x , используя направляющие косинусы внешней нормали. В силу ортогональности нормали \vec{n} и вектора $\vec{\tau}$, совпадающего по направлению с движением льда

$$n_x \tau_x + n_y \tau_y + n_z \tau_z = 0. \quad (16)$$

Кроме того,

$$\tau_x^2 + \tau_y^2 + \tau_z^2 = 1. \quad (17)$$

Подставляя τ_x , полученный из (16) в (17), получим уравнение, связывающее в неявной форме углы $(\vec{\tau}, \vec{x})$ и $(\vec{\tau}, \vec{y})$, определяющие направление касательной к траектории льдин в данной точке

$$F[(\vec{\tau}, \vec{x}), (\vec{\tau}, \vec{y})] = \tau_x^2 + \tau_y^2 + \left[\frac{n_x}{n_z} \tau_x + \frac{n_y}{n_z} \tau_y \right]^2 - 1 = 0. \quad (18)$$

В силу гладкости функции $(\vec{\tau}, \vec{x}) = f(\vec{\tau}, \vec{y})$ при повороте вектора $\vec{\tau}$ на касательной плоскости ее экстремум однозначно определится условием

$$\frac{d(\bar{\tau}, \bar{x})}{d(\bar{\tau}, \bar{y})} = \frac{\partial F / \partial(\bar{\tau}, \bar{y})}{\partial F / \partial(\bar{\tau}, \bar{x})}, \quad (19)$$

которое в развернутом виде приводит к уравнению

$$\tau_y^2 + \frac{n_y}{n_z} \left(\frac{n_x}{n_z} \tau_x + \frac{n_y}{n_z} \tau_y \right) = 0. \quad (20)$$

Совместное решение уравнений (20) и (18) определяет искомый τ_x зависимости от направляющих косинусов внешней нормали

$$\tau_x = \pm \sqrt{n_y^2 + n_z^2} = \pm \sqrt{1 - n_x^2}. \quad (21)$$

В обобщенном виде сопротивление битого льда, с точки зрения анализа влияния плотностей на результаты пересчета с модели на натуру, можно представить следующим выражением:

$$R = (\rho - \rho_{\text{л}}) F_1(h, n_x, n_z, \tau_x, f, \Omega_{\text{л}}) + \rho_{\text{л}} v^2 F_2(h, n_x, \tau_x, f, B) + \rho v^2 F_3(n_x, \tau_x, f, \Omega_{\text{л}}). \quad (22)$$

Очевидно, что подобие функций F_1 , F_2 , F_3 определяется геометрическим подобием и равенством коэффициентов трения модели и натуре. Соответствие плотностей воды и льда и их влияние на прогнозирование сопротивления натуре является предметом настоящего анализа.

При испытаниях моделей судов в битых льдах в настоящее время используются обычные (не ледовые) опытовые бассейны [1, 2, 3], наполненные пресной водой. Как показали исследования [1], наиболее подходящим материалом для имитации битого льда, получившим распространение в большинстве опытовых бассейнов, в настоящее время является полиэтилен высокого давления. Плотность этого материала $0,92 \text{ т/м}^3$. Таким образом, плотность воды и льда с большой точностью соответствует льду пресных водоемов. Для морского льда необходимо вводить коррективы. Во-первых, морская вода имеет большую плотность, а во-вторых, морской лед – меньшую плотность. Огромное противоречие прогнозов ледового сопротивления, по нашему мнению, является результатом игнорирования этих фактов. При этом нетрудно заметить, что составляющие прямого и скоростного сопротивления подлежат непосредственному экспериментальному разделению. Этот факт позволяет ввести коррективы в схему пересчета ледового сопротивления с учетом фактических плотностей воды и льда.

Прямое сопротивление пропорционально разности плотностей воды и льда $(\rho - \rho_{\text{л}})$. При плотностях морской воды и льда $1,025 \text{ т/м}^3$, $0,89 \text{ т/м}^3$ и пресноводных $1,000 \text{ т/м}^3$, $0,92 \text{ т/м}^3$ эта разница равна $0,175 \text{ т/м}^3$ и $0,080 \text{ т/м}^3$ соответственно. То есть прямое сопротивление при пересчете на морской лед необходимо увеличивать в 1,7 раза.

Скоростное сопротивление, разделяемое на инерционное и гидродинамическое, не позволяет экспериментальное разделение. Как видно из формулы (22), инерционное сопротивление пропорционально плотности льда, а гидродинамическое – плотности воды. Учитывая большую определенность плотности воды, по аналогии с гипотезой Фруда для остаточного сопротивления, будем полагать (до получения более достоверных данных) скоростное сопротивление пропорциональным плотности воды.

В заключение приведем пример пересчета ледового сопротивления судна-снабженца проекта 22450 ледового класса Arc 5. Модель в масштабе 1:60 испытывалась в плитках полиэтилена толщиной 20 мм при сплоченности 10 баллов в канале шириной 0,48 м.

Последовательность пересчета ледового сопротивления с модели на натуру выглядит следующим образом:

1. Скорость модели v_m .
2. Сопротивление модели R_m .

3. Число Фруда.
4. Скорость судна v_n .
5. Сопротивление воды модели R_B^M .
6. Чистое ледовое сопротивление модели $R_{chl}^M = R^M - R_B^M$.
7. Прямое ледовое сопротивление модели $R_{пр}^M (v \rightarrow 0)$
8. Скоростное сопротивление модели $R_{ск}^M = R_{chl}^M - R_{пр}^M$.
9. Прямое сопротивление судна $R_{пр}^H = R_{пр}^M \left(\frac{\rho^c - \rho_l^c}{\rho^n - \rho_l^n} \right) \lambda^3$.
10. Скоростное ледовое сопротивление судна $R_{ск}^H = R_{ск}^M \frac{\rho^c}{\rho^n} \lambda^3$.
11. Сопротивление воды судна R_B^H .
12. Полное сопротивление судна $R = R_{пр}^H + R_{ск}^H + R_B^H$.

Индексами «н» и «м» обозначены натура и модель, а индексами «п» и «с» пресный и соленый лед соответственно.

Результаты пересчета ледового сопротивления морского судна без учета поправок на плотность воды и льда и с учетом соответствующих поправок приведены на рис. 2.

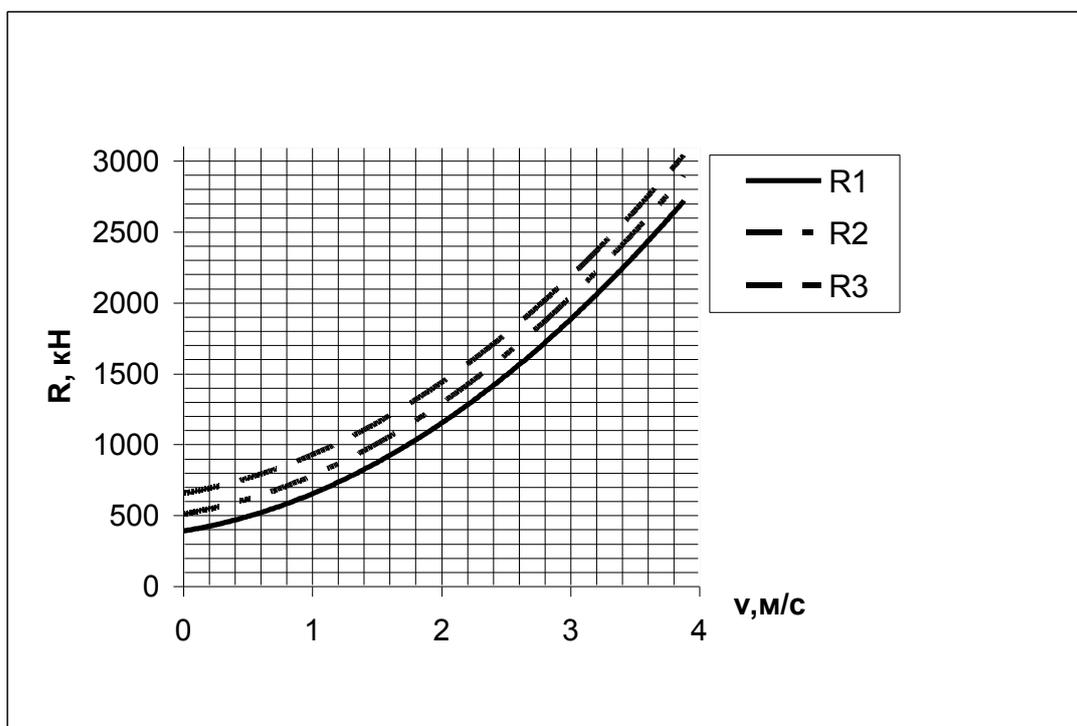


Рис. 2. Сопротивление натуры:

R_1 – без учета влияния плотности воды и льда;

R_2 – с учетом влияния плотности воды;

R_3 – с учетом влияния плотности воды и льда

Приведенные примеры прогнозирования сопротивления в битом льду с помощью модельных испытаний убедительно показывают необходимость учета поправок на плотность воды и льда

Библиографический список

1. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 208 с.
2. **Рывлин, А.Я.** Испытания судов во льдах / А.Я. Рывлин, Д.Е. Хейсин. – Л.: Судостроение, 1980. – 207 с.
3. **Сазонов, К.Е.** Ледовая управляемость судов / К.Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. академика А.Н. Крылова, 2006. – 251 с.
4. Российский Морской Регистр Судоходства. Правила. – СПб., 2008. Т. I.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A. Zuev, E.M. Gramuzov

PHYSICAL MODELING OF VESSEL MOTION IN BROKEN ICE

Refined methods of recalculation the resistance broken ice from the model to nature are considered. These methods are taking into account the density of water and ice.

Key words: ice conditions, resistance, broken ice, vessel, physical and mechanical characteristics.

УДК 534.6:532

В.А. Кикеев, П.И. Коротин, М.Б. Салин, А.С. Суворов

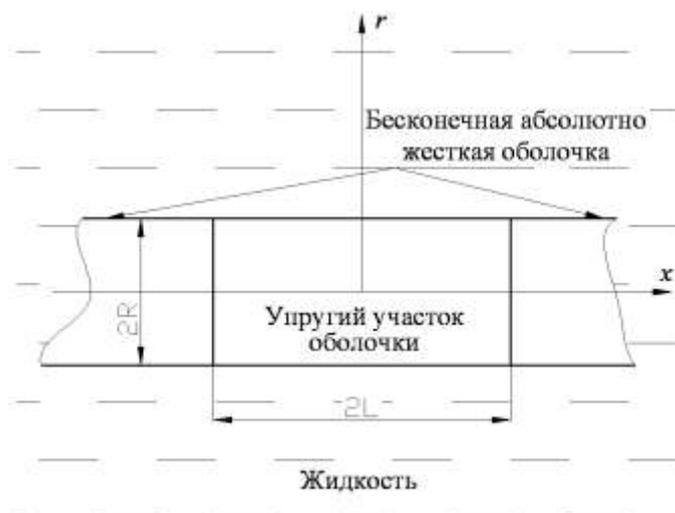
**АКУСТИЧЕСКОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ МЕХАНОАКУСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ,
НАХОДЯЩИХСЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ГИДРСТАТИЧЕСКОГО ДАВЛЕНИЯ**

Институт прикладной физики Российской академии наук

Исследовано влияние статического давления на виброакустические характеристики оболочечных конструкций. Получены зависимости, демонстрирующие, что это влияние эквивалентно появлению мембранной жесткости оболочки и её подкреплений, которая в ряде случаев может достигать значений изгибной жесткости. Для тонких осесимметричных оболочек выведены аналитические формулы для оценки изменения собственных частот оболочки от величины гидростатического давления. С помощью метода конечных элементов исследовано влияние гидростатики на акустические свойства оболочечных конструкций, имеющих сложную геометрию. Продемонстрировано наличие высокой чувствительности виброакустических характеристик внутреннего насыщения тонкостенных корпусов к внешнему давлению.

Ключевые слова: давление, виброакустические характеристики, оболочечные конструкции, изгибная жесткость.

При проектировании сложных инженерных конструкций, к которым предъявляются требования по акустическому излучению, необходимо уметь прогнозировать их виброакустические характеристики. Из-за сложности проведения физических экспериментов, удовлетворяющих всем критериям подобия, единственным методом прогноза звукового давления часто является расчет. Наличие внешнего гидростатического давления приводит к возникновению напряжений растяжения-сжатия в конструкции. При этом возникает так называемая "мембранная" жесткость [1, 2], которая при значительных величинах гидростатического давления становится сравнима с изгибной жесткостью оболочки, что непосредственно сказывается на акустических характеристиках конструкции. Данный феномен хорошо иллюстрируется на примере гитарной струны, при ослаблении или натяжении которой меняется спектр и уровень звукового излучения. Далее на примере различных оболочечных объектов выполнено исследование влияния статического давления на динамические характеристики конструкций.

**Рис. 1. Постановка задачи**

Известные авторам работы по расчету оболочек, погруженных в жидкость, направлены либо на статический расчет устойчивости под действием гидростатического давления,

либо на расчет вибрационных характеристик при отсутствии статической «мембранной» жесткости [1, 3]. При этом постановка задачи, в которой рассматриваются одновременно оба данных явления, авторам неизвестна. Следует отметить, что получение решения в квадратурах для сложных оболочечных конструкций является весьма затруднительным ввиду громоздкости выкладок, однако для тел канонической формы данная проблема может быть исследована аналитическими методами.

Анализ влияния гидростатического давления на тонкостенную оболочку выполним на примере бесконечной абсолютно жесткой цилиндрической оболочки радиусом R и толщиной h , имеющей упругий участок длиной $2L$ (рис. 1). При этом $R/L=\lambda$, а $R/h=\gamma$. Пусть оболочка погружена в жидкость с плотностью ρ_e и колеблется по гармоническому закону с циклической частотой ω . При этом на упругом участке оболочки возникают радиальные перемещения $W(X,\varphi)$, где X – продольная осевая координата; φ – азимутальный угол.

В такой постановке задачи уравнения теории изгиба тонкостенных оболочек, нагруженных внешним давлением [4], относительно неизвестной безразмерной величины радиального перемещения $w=W/R$ следует дополнить членами, учитывающими инерционные и гидродинамические силы в следующем виде:

$$\begin{cases} \Delta^2 w + \Delta w + w_{\varphi\varphi} + \nu \lambda^2 w_{xx} + w = \mu \gamma^2 (w - \iint w d\varphi^2) - \\ - p - q \left[w_{\varphi\varphi} + \frac{\lambda^2}{2} w_{xx} + w \right] + \frac{12\gamma^2 \lambda^2}{(1-\nu^2)} F_{xx} \\ \Delta^2 F = -\lambda^2 w_{xx} \end{cases}, \quad (1)$$

где $x=X/L$ – безразмерная продольная координата,

$$\Delta^2 = \frac{\lambda^4 \partial^4}{\partial x^4} + \frac{2\lambda^2 \partial^4}{\partial x^2 \partial \varphi^2} + \frac{\partial^4}{\partial \varphi^4}, \Delta = \frac{\lambda^2 \partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2},$$

$\mu=12\rho\omega^2 R^2(1-\nu^2)/E$ – инерционный коэффициент; E – модуль упругости; ν – коэффициент Пуассона; ρ – плотность материала оболочки, $q=12\rho_e g H(1-\nu^2)\gamma^3/E$ – цилиндрическая жесткость оболочки; g – ускорение свободного падения; H – глубина погружения; F – функция напряжений; p – безразмерное внешнее гидродинамическое давление, формула для которого может быть получена путем решения задачи об акустическом излучении колеблющегося в жидкости упругого участка бесконечной абсолютно жесткой цилиндрической оболочки [5]:

$$p = \frac{\mu \gamma^3}{2\pi \lambda} \frac{\rho_e}{\rho} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\tilde{w} K_n(k) e^{-i(mx-n\varphi)} dm}{n K_n(k) - k K_{n+1}(k)}, \quad (2)$$

где волновой параметр k и Фурье образ функции w определяются соотношениями:

$$k = \lambda \sqrt{m^2 - \chi^2}, \tilde{w} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi-1}^{\pi-1} w e^{imx+in\varphi} d\varphi dx,$$

$K_n(\cdot)$ – функция Кельвина n -го порядка; $\chi=L\omega/c$, c – скорость звука в воде; $w_{m,n}$ – Фурье образ функции w .

В качестве граничного условия для системы уравнений (1) выберем наиболее простые с точки зрения математических выкладок условия, моделирующие «шарнирную опору» и определяемые уравнениями:

$$\lim_{|x| \rightarrow 1} w = 0, \lim_{|x| \rightarrow 1} w_{xx} = 0. \quad (3)$$

С учетом граничных условий (3) решение уравнения (1) можно искать в виде тригонометрического ряда:

$$w = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \sum_j A_j e^{-in\varphi} \cos(\pi j x); j = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots, \quad (4)$$

где $A_{j,n}$ – коэффициенты разложения величины прогиба. Исходя из метода Галеркина [6], можно записать следующее вариационное соотношение:

$$\int_{-1}^1 w \frac{\delta w}{\delta A_j} dx = 0,$$

которое позволяет преобразовать уравнение (1) к следующей однородной системе уравнений относительно неизвестных величин A_j :

$$\begin{aligned} & \left[(n^2 + \pi^2 \lambda^2 j^2)^2 - 2n^2 - 1 - \lambda^2 \pi^2 (1 + \nu) j^2 - \mu \gamma (1 + n^2) - q \left(n^2 + \frac{\lambda^2 \pi^2 j^2}{2} + 1 \right) \right. \\ & \left. + \frac{12 \gamma^2 \lambda^4 \pi^4 j^4}{(1 - \nu^2)(n^2 + \lambda^2 \pi^2 j^2)^2} \right] A_j \\ & = \frac{2 \pi j \mu \gamma^3 \rho_b}{\lambda \rho} \sin(\pi j) \sum_{s=1/2}^{(2N+1)/2} s \sin(\pi s) A_s \\ & \times \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(2 \sin(m/2)^2 - 1)^2}{(\pi^2 j^2 - m^2)(\pi^2 s^2 - m^2)} \frac{K_n(k) dm}{n K_n(k) - k K_{n+1}(k)}. \end{aligned}$$

Эта система однородных уравнений может быть сведена к задаче по нахождению собственных чисел μ , имеющих физический смысл резонансных частот колебаний оболочки. В данном случае задача по нахождению μ является нелинейной вследствие наличия трансцендентной зависимости гидродинамических сил от частоты колебаний. Однако, считая гидродинамические силы достаточно малыми по сравнению с силами инерции, данную задачу можно решить методом последовательных приближений, с уточнением значения параметра μ на каждой итерации. В качестве примера были выполнены расчеты собственных частот стальной оболочки с характерными размерами $\lambda=0.5$; $\gamma=28.57$, находящейся в жидкости под давлением. Результаты аналитического расчета, представленные на рис. 3, а, отображают зависимость собственных частот колебаний оболочки от гидростатического давления. Параллельно данная задача была решена методом конечных элементов с помощью программного пакета ANSYS (рис. 3, б).

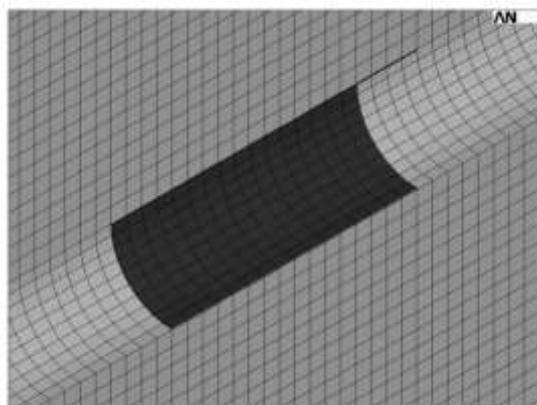


Рис. 2. Фрагмент конечно-элементной модели цилиндрической оболочки в жидкости

Использованная для расчетов конечно-элементная модель представлена на рис. 2, при этом темный цвет соответствует упругому участку оболочки, состоящему из элементов Shell63. Жидкость с наружи оболочки моделировалась стандартными акустическими элементами Fluid30. В целях корректного моделирования акустических процессов в жидкости внешняя граница конечно-элементной модели представляла собой сферическую поверхность, с расположенными на ней поглощающими звук элементами Fluid130. В расчете использовалась симметрия модели относительно вертикальной и поперечной плоскостей, при этом были заданы соответствующие граничные условия.

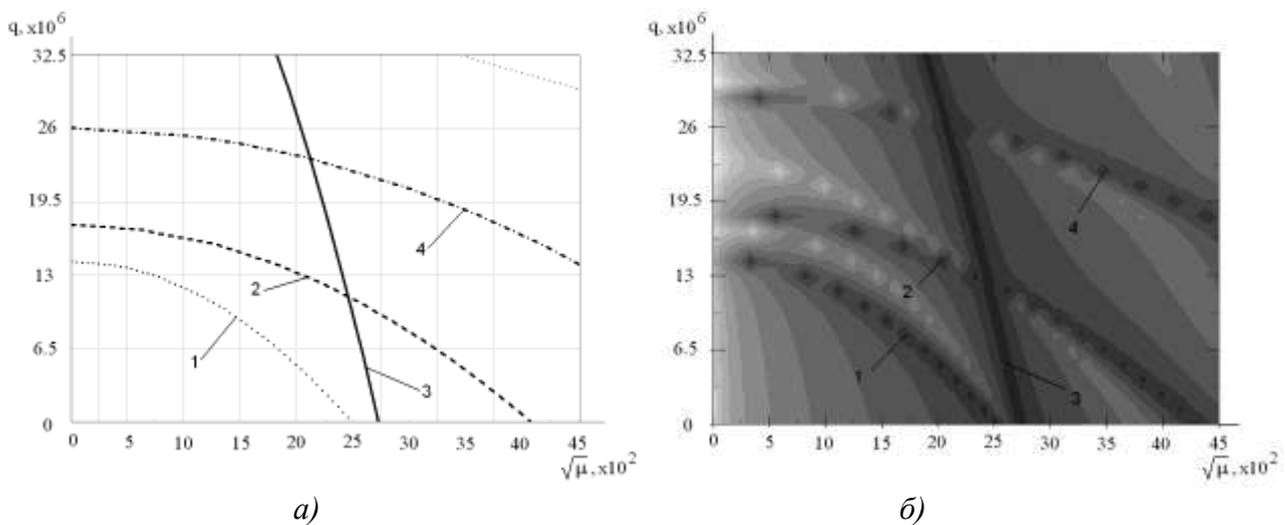


Рис. 3. Зависимость резонансных частот колебаний от внешнего гидростатического давления:
а – аналитическое решение; *б* – численное решение

Анализируя графики рис. 3, *а*, *б* можно отметить хорошее совпадение результатов, полученных аналитически и численно. Сравнение резонансных кривых, полученных аналитически и с помощью метода конечных элементов, показывает расхождение не более 5%. На графиках отчетливо видны максимумы, соответствующие резонансным колебаниям оболочки. При этом точки пересечения данных кривых с осью ординат соответствуют явлению потери устойчивости конструкции, а значение ординаты в данной точке – критическому статическому давлению $q_{кр}$. На графиках цифрами обозначены формы: 1 - гексапольная; 2 - октупольная; 3 - квадрупольная а; 4 - декапольная (и более высокие формы). При ином значении параметров λ и μ характер распределения экстремальных линий на графиках будет существенно изменяться.

Отметим, что представленные на данных графиках характеристики получены в линейной постановке. Вместе с тем известно, что при величинах внешнего давления, близких к первым критическим, в механической системе возникают сильные нелинейности, проявляющиеся в виде изменения геометрии конструкции. Таким образом, результат, соответствующий области графиков при $q > q_{кр1}$, лишен физического смысла и может быть корректно получен лишь с учетом геометрической нелинейности. Нелинейная задача об акустическом излучении и динамике оболочечной конструкции при воздействии внешнего давления, близкого к критическому, представляет не меньший интерес, однако выходит за рамки данной работы.

Для области графика с ординатами $q < q_{кр1}$, представляющей наибольший практический интерес, полученные формулы являются физически корректными. Полученные результаты можно использовать в целях прогнозирования уровня излучения. На рис. 4 приведен график дальнего акустического поля оболочки для значений давления $q=0$ и $q=0,8q_{кр}$.

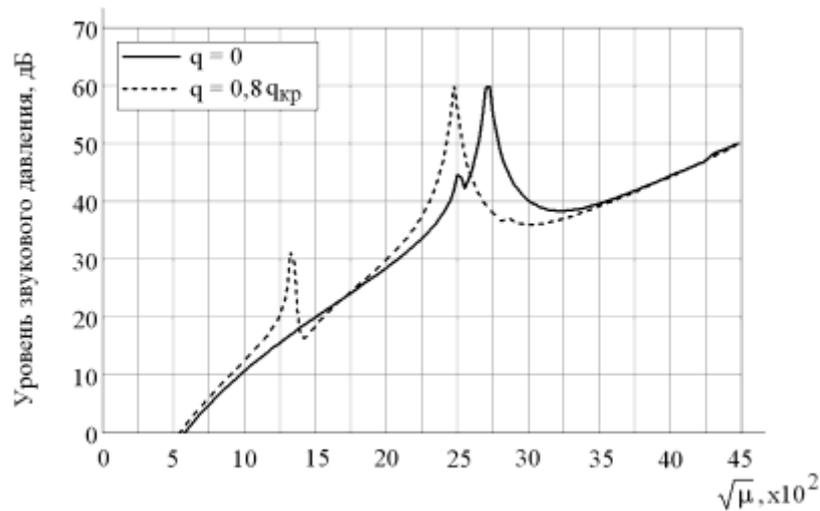


Рис. 4. Дальнее акустическое поле

Из рисунка видно, что наибольшие изменения в АЧХ дальнего поля при изменении внешнего давления возникают вблизи резонансного пика квадрупольной формы колебаний.

Рассмотренный ранее пример характеризуется ортогональностью резонансных форм колебаний, вследствие наличия осевой симметрии. В связи с этим на графиках рис. 3 возможно пересечение кривых. При отсутствии осевой симметрии характер кривых может существенно образом меняться. Наглядным примером такой системы может служить бесконечно длинная оболочка, погруженная в жидкость и содержащая сосредоточенную амортизированную массу (рис. 5).

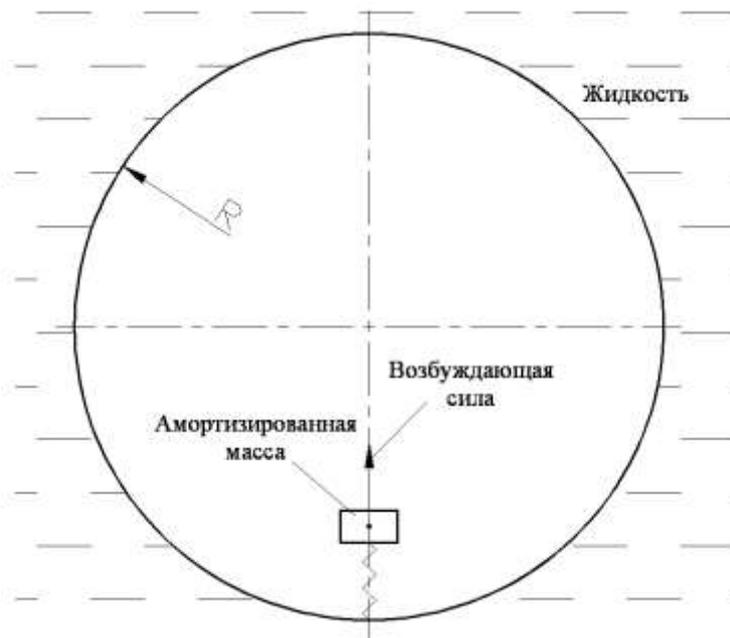


Рис. 5. Поперечное сечение оболочки с амортизированной точечной массой

Жесткость амортизирующего элемента в данном случае подобрана таким образом, что резонансная частота колебаний массы относительно оболочки при отсутствии внешнего давления равняется $1/3$ резонансной частоты квадрупольной формы колебаний оболочки. Результаты аналитического расчета звукового давления при возбуждении оболочки сосредоточенной силой представлены на рис. 6, б. Для сравнения на рис. 6, а приведены результаты

расчета звукового давления, излучаемого точно такой же оболочкой без сосредоточенной амортизированной массы. Уровень серого на графике отображает уровень звука в логарифмической шкале в дальнем акустическом поле. Темные области графика соответствуют максимуму уровня давления, светлые - минимуму уровня давления. На графике рис. 6, а отлично видна темная линия, соответствующая резонансным квадрупольным колебаниям оболочки. Как можно видеть, с ростом давления частоты собственных колебаний оболочки уменьшаются до нуля в точке потери устойчивости. В месте с этим для представленного на рис. 6, б графика характерно наличие двух линий. При этом в данном случае линии не могут быть отождествлены с конкретными формами резонансных колебаний, поскольку формы существенно меняются при изменении внешнего давления. Так, вблизи оси абсцисс левая линия соответствует резонансным колебаниям массы относительно оболочки, а правая – квадрупольным колебаниям оболочки. С ростом давления частота колебаний оболочки начинает существенно уменьшаться, однако пересечения кривых не возникает, вследствие «перемешивания» резонансных мод. Для области графика, характеризуемой наиболее близким расположением темных кривых, левая кривая соответствует синфазным колебаниям оболочки и точечной массы, а правая – противофазным. Максимум на оси ординат относится к критическому значению внешнего давления, соответствующего потере устойчивости оболочки по квадрупольной форме. Из рисунков следует вывод о том, что для конструкций с внутренним насыщением гидростатическое давление может оказывать существенное влияние не только на динамические характеристики оболочек, но и на акустическое излучение. Это означает, что учет данного явления необходим при расчете акустических характеристик.

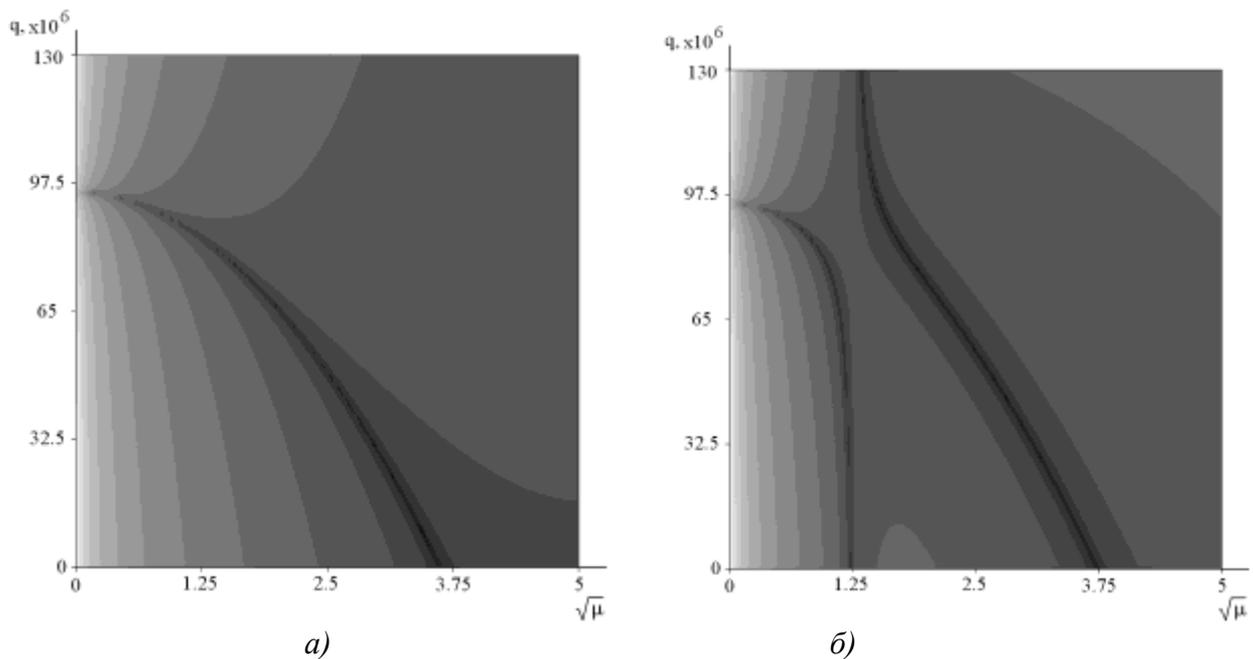


Рис. 6. Зависимость уровня звука от гидростатического давления для оболочечной системы:

a – без амортизированной точечной массы; *б* – с амортизированной точечной массой

Рассмотренные примеры характеризуются довольно простой геометрией, что позволяет получать оценочные аналитические зависимости, например, для излучения подводного трубопровода от внутреннего потока. Для более сложной геометрии, в частности, при наличии всевозможных продольных и поперечных ребер жесткости, фундаментных конструкций и распорок представляется возможным лишь проведение численного учета рассматриваемых в работе явлений. Более того, в ряде случаев оболочки с подкреплениями характеризуются высокой чувствительностью именно внутреннего насыщения к гидростатическому давлению.

нию. В качестве примера приведем результат численного модального анализа оребренной тонкостенной оболочки (разрез на рис. 7).

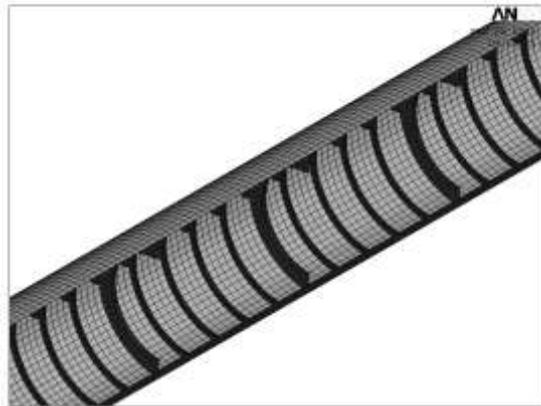
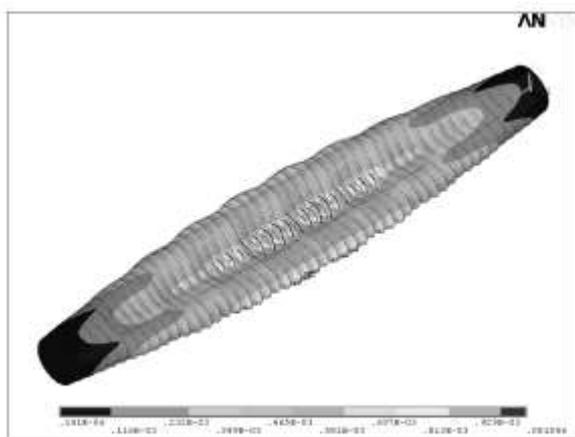
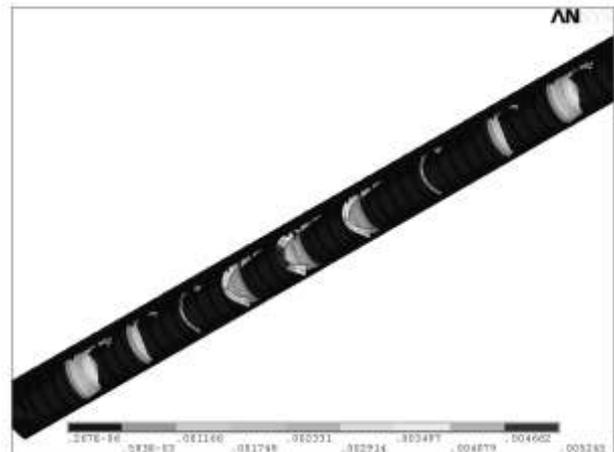


Рис. 7. Конечно-элементная модель оболочки

Как показал расчет, уже при незначительном изменении (в пределах 15%) значений частот глобальных форм колебаний, таких как первая квадрупольная форма, представленная на рис. 8, *а*, возникают существенные изменения формы и частот мод локальных колебаний оболочки и её внутреннего набора. При этом собственные частоты насыщения значительно сильнее реагируют на статическое давление. Так, для формы колебаний внутренних поперечных ребер жесткости (рис. 8, *б*) в данном случае реализуется семикратное уменьшение значения резонансной частоты колебаний.



а)



б)

Рис. 8. Моды:

а – первая оболочечная; *б* – колебаний поперечных ребер жесткости

Таким образом, изменение частотных характеристик излучения переменных сил, приложенных к внутреннему насыщению оболочки, будет существенно более выражено, чем для сил, действующих на оболочку (например, рис. 4).

Вывод

В работе проанализировано влияние гидростатического давления на виброакустические характеристики оболочечных конструкций и их внутреннее насыщение. Выведены расчетные формулы для получения оценки влияния гидростатики на собственные частоты ци-

линдрической оболочки и проведена численная верификация КЭМ. Для оболочки с сосредоточенной амортизированной массой показано возникновение изменений в формах колебаний. На примере сложной оболочечной конструкции численно получены оценки влияния статического давления на частоты различных форм колебаний оболочки и внутреннего насыщения. Исследованное в работе явление может иметь практическое значение при проектировании оболочечных с заданными требованиями на виброакустические характеристики.

Библиографический список

1. **Волошановский, Ю.П.** Собственные колебания замкнутых цилиндрических оболочек и панелей при наличии равномерного статического давления // Исследования по теории пластин и оболочек / Казанский ун-т. Казань, 1978. № 13. С. 186–192.
2. **Пикуль, В.В.** К теории устойчивости оболочек // Вестник ДВО РАН. 2006. № 4. С. 81–86.
3. **Ильгамов, М.А.** Колебания цилиндрической оболочки конечной длины в акустической среде / М.А. Ильгамов, А.З. Камалов // Исследования по теории пластин и оболочек / Казанский ун-т. Казань. 1966. № 4. С. 367–376.
4. **Постнов, В.А.** Строительная механика корабля и теория упругости / В.А. Постнов // Судостроение. 1987. Т. 2. С. 360–361.
5. **Лепендин, Л.Ф.** Акустика / Л.Ф. Лепендин. – М.: Высш. шк., 1978. – 232 с.
6. **Флетчер, К.** Численные методы на основе метода Галёркина / К. Флетчер. – М.: Мир, 1988. – 43 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A Kikeev, P. I. Korotin, M. B. Salin, A. S. Suvorov

ACOUSTIC RADIATION OF MECHANICAL SYSTEMS UNDER THE INFLUENCE OF HYDROSTATIC PRESSURE

Influence of static pressure on vibroacoustic characteristics of the shell structures is investigated. The obtained dependences show that this influence is equivalent to the occurrence of membrane rigidity of a shell and its reinforcements which in some cases can reach values of flexural rigidity. For axially symmetric thin shells, analytical formulas for estimation of the change in eigen frequencies of a cover from size of hydrostatic pressure are deduced. Effect of hydrostatics on the acoustic characteristics of the shell samples with complex geometries is investigated using the method of finite elements. Presence of high sensitivity of vibroacoustic characteristics of internal infills of thin-walled cases to external pressure is shown.

Key words: static pressure, vibroacoustic characteristics, shell structures, flexural rigidity.

УДК 621.43

А.К. Лимонов¹, Л.А. Захаров², В.Л. Химич², И.Л. Захаров², А.В. Сеземин²**НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ В КОНСТРУИРОВАНИИ РЯДНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С РАБОЧИМ ОБЪЕМОМ ЦИЛИНДРА 10,64 Л**ОАО «РУМО»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Проведен анализ среднеоборотных двигателей ОАО «РУМО» первого и второго поколения, а также сравнение их с зарубежными аналогами. Двигатели ОАО «РУМО» второго поколения приблизились по своим характеристикам к лучшим зарубежным образцам, а именно к двигателям фирм MAN B&W и Wartsila.

Ключевые слова: дизельный двигатель, среднеоборотный двигатель, термодинамические, энергетические и экономические показатели, геометрические размеры

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) применяются для привода самых разнообразных машин и механизмов в самых различных условиях: на воде и под водой, на земле и в воздухе; стоя неподвижно на фундаменте или качаясь на волнах вместе с судном, перемещаясь в составе автомобиля, тепловоза или самолета. Ни одна отрасль техники не может сравниться с судостроением по многообразию применяемых двигателей. Двух- и четырехтактные, тронковые и крейцкопфные, дизельные, газовые и бензиновые, простого и двойного действия, одно- и многоцилиндровые, тихоходные и быстроходные, воздушного и водяного охлаждения – все, что придумано двигателестроителями, применяется в судостроении.

В 2004 году отечественные и зарубежные моторостроительные предприятия отметили 100-летие со дня рождения поршневого двигателя внутреннего сгорания (ПДВС), работающего по смешанному циклу, названного в честь его изобретателя – русского инженера Густава Тринклера (цикл Тринклера). Сегодня поршневые и комбинированные ДВС реально применяются для энергетических установок водного, наземного и воздушного транспорта. В настоящее время для энергетических установок водного транспорта выпускается множество судовых комбинированных и поршневых ДВС разнообразных моделей, которые обеспечивают потребности судостроения и судоходства. Их принято делить на четыре группы:

- малооборотные поршневые ДВС с частотой вращения до 240 мин^{-1} , (МОД);
- среднеоборотные поршневые и комбинированные ДВС с частотой вращения $240..750 \text{ мин}^{-1}$, (СОД);
- повышенной оборотности поршневые и комбинированные ДВС с частотой вращения $750..1500 \text{ мин}^{-1}$, (ПОД);
- высокооборотные поршневые и комбинированные ДВС с частотой вращения свыше 1500 мин^{-1} , (ВОД).

В последние 20 лет судовое отечественное и зарубежное двигателестроение энергично развивалось, при этом были разработаны новые тенденции его проектирования. Концепции создания современных СОД и принципы конструирования СОД рассмотрим на примере проектирования двигателей ОАО «РУМО»: первого поколения 6ЧН 36/45 и второго поколения 6ЧН 22/28 (рис. 1). Необходимо отметить, прежде всего, эффективность работ по повышению технических характеристик СОД (табл. 1).

Таблица 1

Технические характеристики ряда СОД

№ п/п	Показатель	Модели типоразмерного ряда					
		MAN B&W L 40/54	Wartsila Vasa 22/26	ОАО «РУМО»			
				первое поколение		второе поколение	
				ЧН 36/45	ЧН 36/45	ЧН 22/28	ЧН 22/28-1
0	1	2	3	4	5	6	7
1	Число цилиндров	6	6	6	6	6	6
2	Диаметр цилиндра, см	40	22	36	36	22	22
3	Ход поршня, см	54	26	45	45	28	28
4	Отношение S/D	1,35	1,18	1,25	1,25	1,273	1,273
5	Геометрическая степень сжатия	15	15	11,5	12	13,5	16
6	Частота вращения, мин ⁻¹	514	750	375	500	750	750
7	Средняя скорость поршня, м/с	9,25	6,5	5,625	7,5	7,0	7,0
8	Максимальная номинальная мощность, кВт	3990	1125	883	1150	775	1150
9	Удельная литровая мощность, кВт/л	9,805	18,981	3,215	4,187	12,142	18,017
10	Удельная «цикловая-литровая» мощность, Вт/ц·л	38,151	50,62	17,147	16,746	32,378	48,044
11	Максимальное давление сгорания, МПа	18,00	18,00	6,943	6,791	13,5	17,260
12	Среднее эффективное давление цикла, МПа	2,29	2,28	1,028	1,005	1,83	2,28
13	Отношение p_i/p_e	7,860	7,895	6,754	6,757	7,377	7,571
14	Термодинамический КПД цикла	0,6615	0,6615	0,6235	0,6299	0,6469	0,6701
15	Эффективный КПД	0,463	0,444	0,38	0,396	0,432	0,444
16	Удельный эффективный расход топлива, г/кВт·ч	182	190	213	213	195	190
17	Удельный эффективный цикловой расход топлива, мг/кВт·ц	11,803	8,445	18,933	14,200	8,667	8,445
18	Удельный эффективный «цикловой-литровой» расход топлива, мг/кВт·ц·л	0,029004	0,000143	0,068926	0,051939	0,135778	0,132296
19	Удельный эффективный расход масла на угар, г/кВт·ч	0,7	0,9	1,22	1,22	1,0	0,9
20	Удельный эффективный расход масла на угар, мг/кВт·ц	0,046	0,04	0,109	0,082	0,045	0,040
21	Удельный эффективный «цикловой-литровой» расход масла на угар, мг/кВт·ц·л	0,000113	0,000675	0,000397	0,000299	0,000705	0,000627
22	Рабочий объем цилиндра, л	67,824	9,87844	45,7812	45,7812	10,63832	10,63832
23	Рабочий объем двигателя, л	406,944	59,32706	274,6872	274,6872	63,82992	63,82992

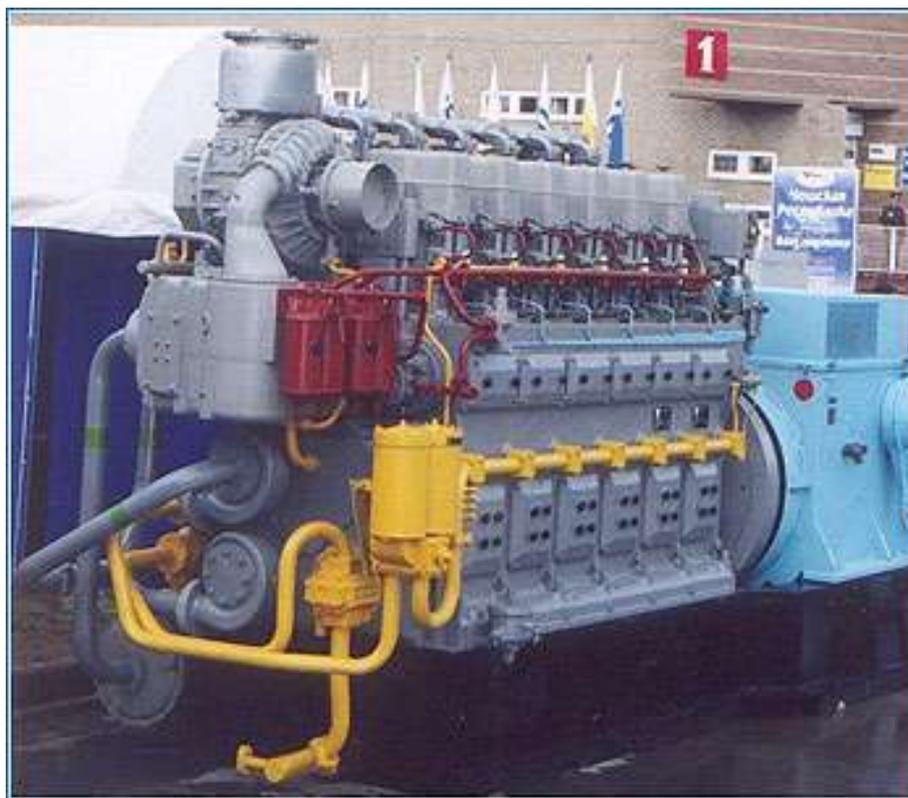


Рис. 1. Дизельный двигатель ОАО «РУМО» 6ЧН 22/28

По геометрическим размерам рабочего и полного объема цилиндров СОД ОАО «РУМО»:

- диаметр цилиндра двигателя первого поколения составляет 36 см, второго поколения 22 см, т.е. меньше на 38,9%;
- ход поршня двигателя первого поколения – 45 см, второго поколения – 28 см, т.е. меньше на 37,8%;
- рабочий объем цилиндра двигателя первого поколения – 45,78 л, второго поколения – 10,64 л, т.е. меньше на 76,8%;
- рабочий объем двигателя первого поколения – 274,68 л, второго поколения – 63,84 л, т.е. меньше на 76,8%;
- отношение хода поршня к диаметру цилиндра двигателя первого поколения – 1,25, двигателя второго поколения – 1,273, т.е. больше на 1,84% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют $S/D=1,35$);
- средняя степень сжатия двигателей первого поколения – 11,75, второго поколения – 14,75, т.е. больше на 25,5% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют степень сжатия 15-16);
- средняя скорость поршня двигателя первого поколения – 6,56 м/с, второго поколения – 7,5 м/с, т.е. больше на 14,3% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 8,5..9,2 м/с).

Термодинамические показатели рабочего цикла СОД ОАО «РУМО»:

- средний термический КПД цикла двигателя первого поколения составляет 0,627, второго поколения – 0,658, т.е. больше на 5,02% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют – 0,66..0,68);
- отношение среднего максимального давления цикла к среднему эффективному давлению двигателя первого поколения составляет – 6,756, второго поколения – 7,474, т.е. больше на 10,63% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 7,86).

Энергетические показатели работы СОД ОАО «РУМО» имеют:

- средняя удельная литровая мощность двигателей первого поколения – 3,7 кВт/л, второго поколения – 15,08 кВт/л, т.е. больше в 4 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 9,81..18,98 кВт/л);
- наибольший интерес представляет средняя удельная «цикловая-литровая» мощность двигателей первого поколения – 16,95 Вт/ц·л, двигателей второго поколения – 40,21 Вт/ц·л, т.е. больше в 2,4 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 38,2..50,6 Вт/ц·л);
- среднее эффективное давление двигателей первого поколения – 1,02 МПа, двигателей второго поколения – 2,06 МПа, т.е. в два раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 2,29..2,32 МПа)

Экономические показатели работы СОД ОАО «РУМО» имеют:

- средний эффективный КПД двигателей первого поколения – 0,388, второго поколения – 0,438, т.е. больше на 12,9% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют – 0,44..0,46);
- средний удельный эффективный расход топлива двигателей первого поколения – 213 г/кВт·ч, второго поколения – 195 г/кВт·ч, т.е. меньше на 9,62% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 182..190 г/кВт·ч);
- средний эффективный цикловой расход топлива двигателей первого поколения – 16,57 мг/кВт·ц, второго поколения – 8,57 мг/кВт·ц, т.е. меньше в 1,93 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 11,8..8,45 мг/кВт·ц);
- средний удельный эффективный «цикловой-литровой» расход топлива двигателей первого поколения – 0,060 мг/кВт·ц·л, второго поколения – 0,134 мг/кВт·ц·л, т.е. больше в 2,3 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 0,023..0,097 мг/кВт·ц·л);
- средний удельный эффективный расход масла на угар двигателями первого поколения – 1,22 г/кВт·ч, второго поколения – 0,95 г/кВт·ч, т.е. меньше на 22,13% (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 0,7..0,9 г/кВт·ч);
- средний удельный эффективный цикловой расход масла на угар двигателями первого поколения – 0,096 мг/кВт·ц, второго поколения – 0,043 мг/кВт·ц, т.е. меньше в 2,23 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 0,046 мг/кВт·ц);
- средний удельный эффективный «цикловой-литровой» расход масла на угар двигателями первого поколения – 0,000348 мг/кВт·ц·л, второго поколения – 0,00666 мг/кВт·ц·л, т.е. больше в 1,91 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 0,000113.. мг/кВт·ц·л);
- среднее максимальное давление впрыска двигателей первого поколения – 20,0 МПа, второго поколения – 135 МПа, т.е. больше в 6,75 раза (лучшие зарубежные образцы СОД имеют 140..160 МПа).

Развитие судовых СОД ОАО «РУМО» в последние годы осуществляется по ряду основных направлений.

1. Повышение удельной «цикловой-литровой» мощности, получаемой с одного литра рабочего объема за один цикл работы двигателя. В новейших модификациях СОД ОАО «РУМО» среднее эффективное давление повышено до 1,83..2,28 МПа. При этом:

- усовершенствованы органы впуска и выпуска подсистемы газообмена, что позволяет увеличить массовое наполнение воздухом рабочих цилиндров при снижении относительных энергетических затрат на их наполнение (коэффициент наполнения до 0,9, коэффициент остаточных газов до 0,02, коэффициент избытка воздуха до 1,3);
- усовершенствованы взаимодействия турбины с органами выпуска, компрессора с органами впуска подсистемы газообмена.

2. Повышение тепловой экономичности достигалось путем:

- увеличения максимального давления рабочего цикла до 17,26 МПа и степени сжатия до 16, что позволяет обеспечить высокую термодинамическую эффективность цикла;
- уменьшения потерь энергии выпускных газов в органах выпуска подсистемы газообмена, увеличения КПД агрегата наддува, а также оптимизации фаз газораспределения и согласования подсистемы «поршневой двигатель – агрегат наддува»;
- повышения давления впрыска топлива до 140 МПа и сокращения его продолжительности в целях интенсификации процессов смесеобразования, сгорания и соответственно тепловыделения;
- повышения длинноходности двигателя S/D до 1,273, что при одновременном повышении степени сжатия и максимального давления цикла способствует увеличению высоты открытых камер сгорания, сокращению доли пристеночного смесеобразования, повышению коэффициента использования теплоты.

Практическая реализация перечисленных путей улучшения экономичности поршневого четырехтактного дизельного ДВС обеспечила значительный прогресс в процессе модернизации выпускаемых и создания новых моделей четырехтактных СОД ОАО «РУМО».

Библиографический список

1. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для студ. ВТУЗов / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин [и др.]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
2. **Конкс, Г.А.** Мировое судовое дизелестроение. Концепции конструирования, анализ международного опыта / Г.А. Конкс, В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 512 с.
3. Судовые дизель-редукторные и дизель-электрические агрегаты с дизелями ряда ЧН 22/28. – Нижний Новгород: ОАО «РУМО», 2004. – 8 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

A.K. Limonov, L.A. Zakharov, V.L. Khimich, I.L. Zakharov, A.V. Sezemin

NEW TRENDS IN DESIGNING IN-LINE DIESEL ENGINE CAPACITY CYLINDER 10.64L

In this paper, an analysis of medium engine RUMO first-and second-generation, as well as their comparison with foreign analogues. Engines RUMO second generation were approximately in their characteristics to the best foreign models, namely, the engines of firm MAN B&W and Wartsila.

Key words: diesel engine, medium-speed engine, the thermodynamic energy and economic indicators, the geometric dimensions.

УДК.621.43

Л.А. Захаров, А.Н. Тарасов, В.Л. Химич, И.Л. Захаров

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ
ПОРШНЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО ПО ГИБРИДНОМУ ЦИКЛУ**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

Приведены основные направления совершенствования термодинамических показателей поршневого ДВС с переменной степенью сжатия и гибридным рабочим циклом.

Ключевые слова: поршневой ДВС, степень сжатия, гибридный рабочий цикл, ДВС Карно, Отто, Гринклера, САПР ДВС.

При проектировании кривошипно-шатунного механизма (КШМ) поршневого двигателя внутреннего сгорания (ДВС) основные геометрические параметры (полный объем цилиндра, рабочий объем, объем пространства камеры сжатия) определяются общими концептуальными решениями по конструкции и организации рабочего процесса ДВС. Таким образом, при проектировании полного объема цилиндра стоит ряд задач по его обеспечению постоянного и несменяемого количества массы окислителя и постоянного и несменяемого, условного количества массы топлива при минимальной степени сжатия. Вместе с решением данных задач существует необходимость решения проблемных явлений работы КШМ. К таким, в частности, относится процесс изменения рабочего объема цилиндра, характеризующийся регулированием изменения геометрической степени сжатия. Обеспечение работы теоретического поршневого двигателя с переменной степенью сжатия должно происходить при одновременном выполнении других задач проектирования, и поэтому имеется потребность в исследовании метода соотношения процесса изменения рабочего объема цилиндра и других *термодинамических процессов*.

Современные поршневые бензиновые и дизельные двигатели можно представить как систему, состоящую из остова, трех механизмов и подсистем. Остов представляет собой стержневую конструкцию, предназначенную для монтажа на ней деталей и узлов трех механизмов и подсистем. К механизмам относим: кривошипно-шатунный механизм (КШМ); газораспределительный механизм (ГРМ); механизм уравнивания (МУ) сил инерции второго порядка кривошипно-шатунного механизма. Кривошипно-шатунный механизм состоит: из коренных подшипников скольжения с деталями крепления; коленчатого вала с маховиком, демпфером крутильных колебаний, каналов для подвода смазочного масла к трущимся деталям; шатуна с нижней разъемной головкой, подшипником скольжения и деталями крепления, стержня шатуна с каналом подвода смазочного масла к трущейся паре подшипник скольжения – поршневой палец в малой головке шатуна и подачи смазочного масла для охлаждения внутренней поверхности поршня; поршневого пальца с деталями крепления; поршня с камерой охлаждения и камерой сжатия; поршневых колец – из них два компрессионных и одно маслосъемное; цилиндра двигателя с рубашкой охлаждения; головки цилиндра с камерой сгорания и рубашкой охлаждения; металлической уплотняющей прокладкой между цилиндром и головкой цилиндра с деталями крепления. КШМ – главный механизм двигателя, на который работают еще два механизма двигателя (ГРМ и МУ) и все подсистемы двигателя.

Фирмы-изготовители поршневых ДВС широко используют последние достижения науки и техники при создании новых и совершенствовании существующих моделей. Поэтому в настоящее время идет постоянный процесс поиска и внедрения инноваций с целью конструктивного совершенствования обычных поршневых бензиновых и дизельных двигателей и их сближения, как по конструктивным решениям, так и сам теоретический процесс сгора-

ния паров топлива, проходящий в обычном четырехтактном бензиновом двигателе по циклу Отто. Рассмотрим конструкторские прогрессивные решения зарубежных фирм:

Фирма MAN разработала корпус цилиндра гарантирующего высокую деформационную жесткость стенки цилиндра; равномерное распределение температуры по всей поверхности цилиндра за счет рационального охлаждения; надежное перемещение поршня в цилиндре без заклинивания.

Поршень из высококачественного алюминиевого материала обеспечивает: эффективное охлаждение смазочным маслом его головки; надежную работу в результате тщательно продуманной конфигурации его профиля, конструкцию поршневых колец; уменьшение механической нагрузки на поршневые кольца за счет малого рационального зазора между бочкообразной поверхностью поршня и стенкой цилиндра, вследствие чего абразивные частички не попадают в зазор, смазочная пленка и жидкостное трение сохраняются; незначительные расход масла на угар и прорыв картерных газов.

По газораспределительному механизму

В 1989 году фирма «Хонда» впервые применила систему изменения фаз газораспределения для очистки от отработавших газов (ОГ) пространства камеры сжатия и лучшее наполнение ее свежим рабочим телом. Регулирование времени и величины хода клапанов в зависимости от частоты вращения вала и режимов работы двигателя способствует снижению расхода топлива.

Регулирование фаз газораспределения обеспечивает лучшую характеристику кривой крутящего момента, уменьшает расход топлива и токсичность отработавших газов.

ГРМ фирмы «Порше» изменяет не только фазы газораспределения, но и ход впускных клапанов. Для этого распредвал имеет на каждый цилиндр по три впускных кулачка разного профиля, позволяющих изменять ход клапанов в пределах 3...10 мм. В результате крутящий момент комбинированного двигателя резко возрастает в зоне малых оборотов (1000...2500) в минуту при заметном снижении удельного эффективного расхода топлива.

ГРМ фирмы BMW позволяет изменять ход клапана в зависимости от частоты вращения вала двигателя. Механизм работает от электромагнитов, при этом на большой частоте вращения вала двигателя достигаются: наилучшая продувка пространства камеры сжатия цилиндра и его заполнение свежим рабочим телом. При минимальной частоте вращения коленчатого вала ход клапана наименьший, при этом уменьшается эффект перекрытия впускных и выпускных отверстий, благодаря чему эффективный расход топлива уменьшается.

Органы впуска и выпуска подсистемы газообмена

Фирмы VOLVO, BMW имеют регулируемые длины впускных и выпускных каналов подсистемы газообмена, что позволяет двигателю развивать равномерно высокий крутящий момент в широком диапазоне частоты вращения вала двигателя.

Подсистема топливоподачи занимают особое место инновации.

В 1967 году на смену распыления топлива разрежением в диффузоре карбюратора пришел распределенный впрыск бензина во впускной канал головки цилиндров под низким давлением 0,2...0,6 МПа.

Последующей эффективной инновацией в этом направлении стало применение непосредственного впрыска бензина в камеру сгорания под давлением 145...165 МПа, что обеспечивает более точное управление топливоподачей и смесеобразованием, быстрым эффективным сгоранием паров топлива при положении поршня около верхней мертвой точки.

В 1988 году фирма «Фольксваген» соединила в конструкции дизеля непосредственный впрыск топлива с аккумулятором давления и турбонаддувом и электронным управлением. Эти конструктивные решения в настоящее время применяют и другие дизелестроительные фирмы.

Конструкции, разработанные в последующие годы, свидетельствуют о сближении бензиновых и дизельных двигателей. Основным шагом к сближению, с одной стороны, является ос-

воение непосредственного впрыска бензина, а основным шагом, с другой стороны, является электронное управление непосредственного впрыска дизельного топлива на дизелях.

Дизели привлекают своими характеристиками, *во-первых*, меньшим эффективным расходом топлива, а *во-вторых*, заметно более низким выбросом оксида углерода. Если оценивать экономичность, то дизель выглядит перспективнее бензиновых моторов. Его КПД выше – около 40% (вместо 30% в среднем у бензинового), и соответственно увеличение доли транспортных средств с дизельными двигателями в потенциале должно уменьшить общее количество потребляемого топлива. Поэтому в настоящее время европейские фирмы General Motors Corp, Robert Bosh Corp и др. объединяют усилия для разработки более экономичных бензиновых двигателей и повышение экологичности дизелей по выбросам сажи и оксидам азота. Кроме того, они и целый ряд других организаций занимаются работами в области применения *новой технологии* Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) – *компрессионное воспламенение однородной смеси*, которая представляет в некотором виде гибрид бензинового и дизельного моторов, в двигателях легковых автомобилей. Первой начала такие работы для грузовых автомобилей фирмы Scania. По новой технологии (HCCI) в двигателе топливо смешивается с воздухом, как и в обычном бензиновом, но только в большем соотношении воздух/топливо. Смесь воспламеняется не искрой, а в результате сжатия (как и в дизельных двигателях, но при более низких температурах). Новая технология HCCI может повысить эффективность работы бензинового двигателя на 20%, при этом выброс вредных веществ сводится почти к нулю. По некоторым прогнозам специалистов, к 2020 году около 40% транспортных средств будет иметь двигатели по новой технологии HCCI. Представители фирмы Mercedes-Benz уже сообщали о разработке подобного мотора под названием DiesOtto. В этом двигателе объединены технологии бензиновых и дизельных моторов: при малых и средних оборотах бензиновая смесь будет зажигаться при помощи сжатия, а не от искры. Первым в серию пойдет агрегат объемом 1,8 л, который, благодаря разработанным новым технологиям, будет развивать мощность 238 л.с. и крутящий момент 400 Нм, средний расход топлива составит лишь 6 л на 100 км на большом седане S-класса. DiesOtto имеет весь современный уровень инноваций. Здесь будет турбонаддув, непосредственный впрыск топлива, регулировка хода клапана.

Основной проблемой двигателестроения является создание поршневого ДВС, в котором максимально возможное количество внутренней энергии превращалось бы в полезную механическую работу при обязательном условии повышения их жизненного цикла. Решение поставленной проблемы рассмотрим по термодинамическим показателям на примере теоретического поршневого ДВС, работающего по циклу Отто.

На рис. 1 приведен теоретический поршневой ДВС, работающий по циклу Отто в V, p и S, T диаграммах, по которому работают современные ДВС в составе наземного, водного и воздушного транспортных средств на легком топливе (бензине, природном газе, спиртах и др.).

Идеальный цикл поршневого ДВС с подводом теплоты Q_1 от теплоисточника $A]$, при постоянном объеме V_c и отводом принципиально неустранимой потери теплоты Q_2 в теплоприемник $B]$ при постоянном объеме V_a осуществляется за один оборот коленчатого вала или за два последовательных хода поршня. Он состоит из четырех последовательно повторяющихся единичных термодинамических процессов:

ac – адиабатического процесса сжатия рабочего тела в цилиндре ЗТДС;

cz – изохорического процесса подвода теплоты Q_1 от теплоисточника $A]$ к рабочему телу в цилиндре ЗТДС;

zb – адиабатического процесса расширения рабочего тела в цилиндре ЗТДС;

ba – изохорического процесса отвода теплоты Q_2 от рабочего тела из цилиндра ЗТДС в теплоприемник $B]$.

Основными характеристиками при исследовании и расчете цикла Отто являются:

Геометрические:

V_a – полный объем цилиндра; V_s – рабочий объем цилиндра; V_c – объем камеры сжатия; D – диаметр цилиндра; S – ход поршня.

Термодинамические:

$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$ – степень сжатия; $\lambda = \frac{p_z}{p_c}$ – степень повышения давления рабочего тела в цилиндре ЗТДС;

$\delta = \frac{V_b}{V_z}$ – степень последующего расширения рабочего тела в цилиндре ЗТДС;

$\sigma = \frac{p_b}{p_a}$ – степень понижения давления рабочего тела в цилиндре ЗТДС; $k = \frac{c_p}{c_v}$ – показатель адиабаты.

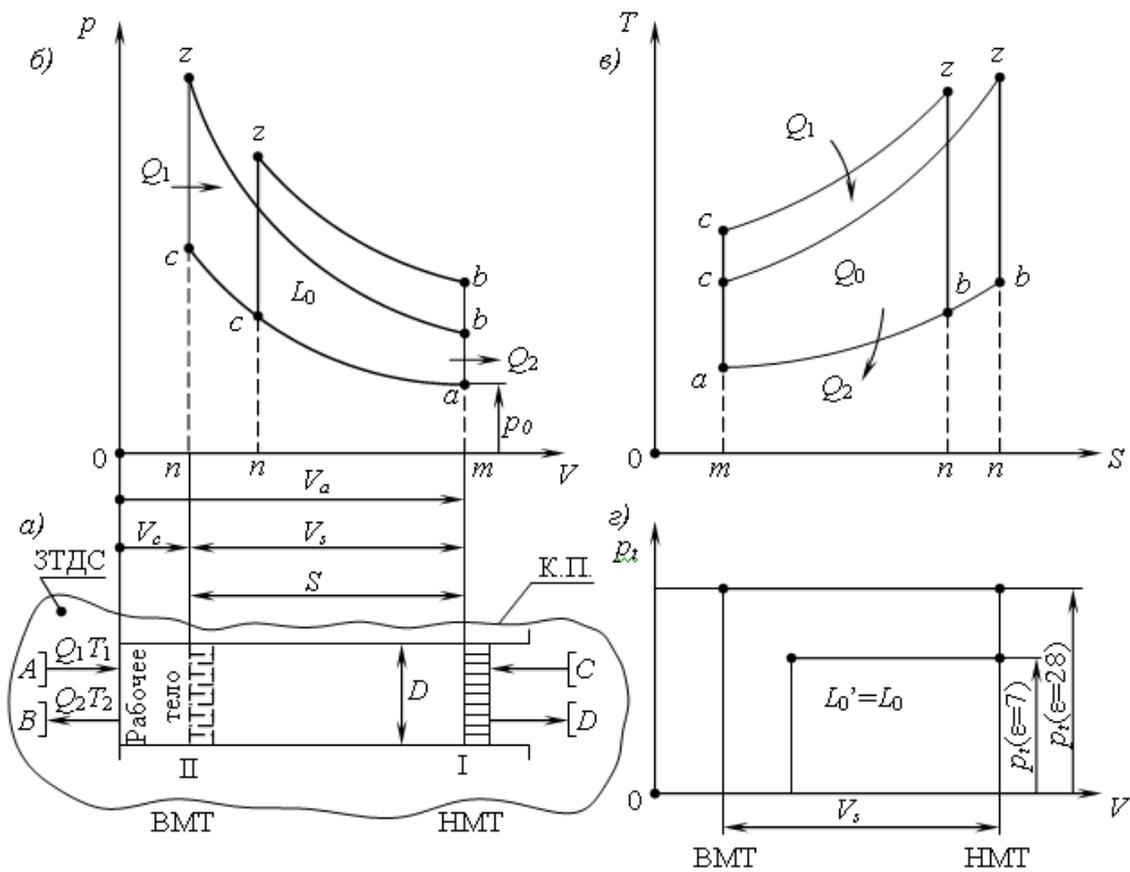


Рис. 1. Теоретический поршневой ДВС работающий по циклу Отто в V, p и S, T диаграммах для степеней сжатия 7 и 28:

- a – закрытая термодинамическая система (теоретический поршневой ДВС);
- b – pV – работа, совершенная произвольным количеством рабочего тела ЗТДС;
- v – TS – теплота, подведенная к рабочему телу, в ЗТДС;
- z – p_t – среднее термодинамическое давление рабочего тела в ЗТДС

Методика оценки термодинамических показателей поршневого ДВС, работающего по циклу Отто, представленного на рис. 1, a , проводится по формулам:

1) геометрические параметры КШМ рассматриваемого рядного четырехцилиндрового двигателя берем за основу (диаметр цилиндра $D=0,087$ м, ход поршня $S=0,094$ м, степень сжатия $\varepsilon=7:1$, длина шатуна $l_{ш}=0,158$ м и др.);

2) полный объем цилиндра в m^3 для степени сжатия $\varepsilon = 7:1$ определяем по следующей формуле и принимаем постоянной:

$$V_a = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S \cdot \frac{\varepsilon}{\varepsilon - 1} = \text{const}; \quad (1)$$

3) массу рабочего тела ($M = \kappa \rho$) в полном объеме цилиндра при степени сжатия $\varepsilon = 7:1$ и нормальных термодинамических условиях (давлении $p = 101332$ Па, плотности $\rho_v = 1,293$ кг/м³, температуре $T = 273,16$ К) определяем по следующей формуле, принимаем постоянной и несменяемой при проведении всесторонних исследований:

$$M_a = V_a \rho_v = \text{const}; \quad (2)$$

4) при постоянных V_a и M_a изменение степени сжатия ($\varepsilon_x = 7, 14, 21, 28$) проводили за счет изменения рабочего объема цилиндра V_{Sx} , путем изменения хода поршня S_x и определялись по формуле:

$$S_x = \frac{V_a}{\frac{\pi D^2}{4} \cdot \frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_x - 1}}; \quad V_{Sx} = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S_x, \quad (3)$$

5) при переменных степенях сжатия ($\varepsilon_x = 7, 14, 21, 28$) и показателях адиабаты ($k_x = 1, 1; 1, 2; 1, 3; 1, 4; 1, 5; 1, 6; 1, 67$), КПД теоретического поршневого двигателя определяли по равенству:

$$\eta_{tx} = 1 - \frac{1}{\varepsilon_x^{k_x - 1}}, \quad (4)$$

6) теоретически необходимое количество воздуха $\left(l_0 = \frac{\text{кг воздуха}}{\text{кг топлива}} \right)$ и низшая теп-

лота сгорания топлива $\left(Q_H = \frac{\text{кДж}}{\text{кг}} \right)$ определялись по химическому составу топлива ($C = 0,874$ и $H = 0,126$) по выражению:

$$l_0 = \frac{1}{1,232} \left(\frac{8}{3} C + 8H \right), \quad Q_H = 341066 \cdot C + 1024321 \cdot H; \quad (5)$$

7) при постоянной и несменяемой массе воздуха ($M_a = \kappa \rho$) и коэффициенте избытка воздуха ($\alpha = 1$) термодинамическая мощность ($N_{tx} = Bm$) теоретического поршневого двигателя определялась по формуле:

$$N_{tx} = M_a \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot \frac{1}{60}, \quad (6)$$

где i - количество цилиндров; m - тактность двигателя; $n = \text{мин}^{-1}$ - частота вращения вала двигателя; 60 - перевод мин. в с;

8) по известной термодинамической мощности определяется крутящий момент ($M_{kx} = Nm$) поршневого теоретического ДВС по формуле:

$$M_{kx} = 9,55 \cdot \frac{N_{tx}}{n}; \quad (7)$$

9) часовой расход топлива ($G_T = \text{кг/ч}$) постоянного и несменяемого количества определяется так:

$$G_T = M_a \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot i \cdot \frac{1}{m} \cdot n \cdot 60; \quad (8)$$

10) удельный термодинамический расход топлива ($g_{tx}=\text{кг}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$) теоретического поршневого ДВС определяется по формуле:

$$g_{tx} = \frac{G_T}{N_{tx}}; \quad (9)$$

11) среднее термодинамическое давление ($p_{tx}=\text{МПа}$) определяется по формуле:

$$p_{tx} = M_a \cdot \frac{1}{\alpha \cdot l_0} \cdot Q_H \cdot \eta_{tx} \cdot i \cdot \frac{1}{V_{Sx}}; \quad (10)$$

12) форсировка теоретического поршневого двигателя оценивается по равенству:

$$\Phi_{tx} = \frac{P_{zx}}{P_{tx}} \geq 7. \quad (11)$$

Предложенная методика оценки термодинамических показателей легко реализуется в программном комплексе MATLAB с получением наглядных и информативных выходных данных.

В табл. 1 и на рис. 2 в качестве примера приведены результаты расчета и графики зависимости η_b , N_b , M_b , p_b , g_t от ε , k теоретического рядного четырехцилиндрового поршневого двигателя рабочим объемом 2,23 л ОАО ЗМЗ. Полученные поверхности в трехмерном изображении являются **верхним пределом** термодинамических показателей теоретического поршневого двигателя, которые необходимо получить на ранней стадии проектирования реального поршневого атмосферного двигателя. Особое место в САПР ДВС занимает прикладное математическое обеспечение. С этой целью по результатам расчета табл. 1 и графикам рис. 2 удалось построить математическую модель:

$$\eta_t = -1,8663739459 k^2 - 0,0138191434 k \cdot \varepsilon + 0,0001272972 \cdot \varepsilon^2 + \\ + 6,5664619582 \cdot k + 0,0207828951 \cdot \varepsilon - 4,9243253857$$

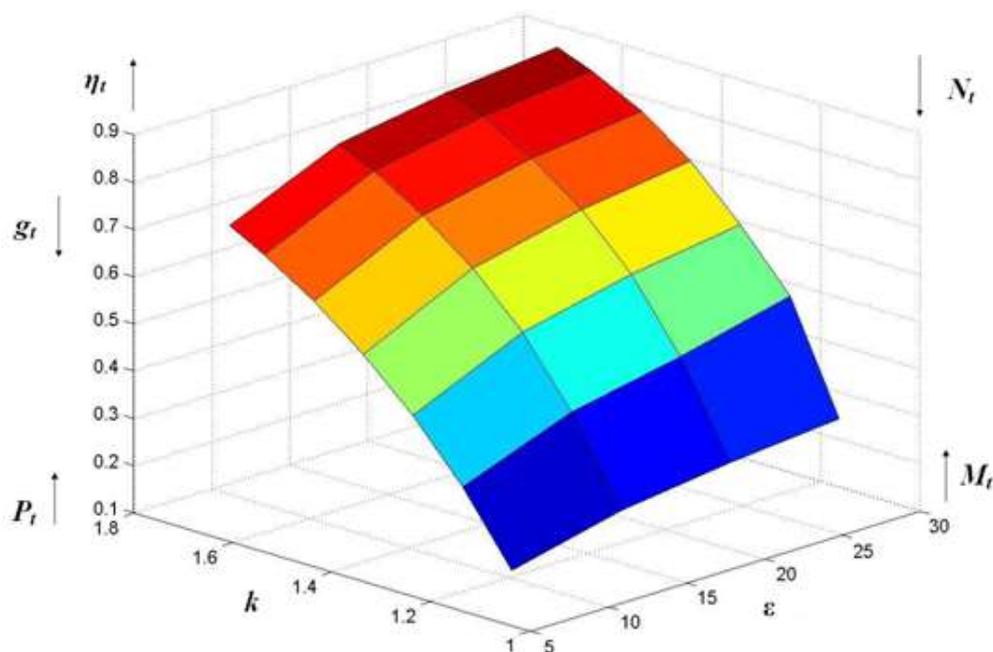


Рис. 2. График зависимости:

$$\eta_t = f(\varepsilon; k); N_t = f(\varepsilon; k); M_t = f(\varepsilon; k); p_t = f(\varepsilon; k); g_t = f(\varepsilon; k)$$

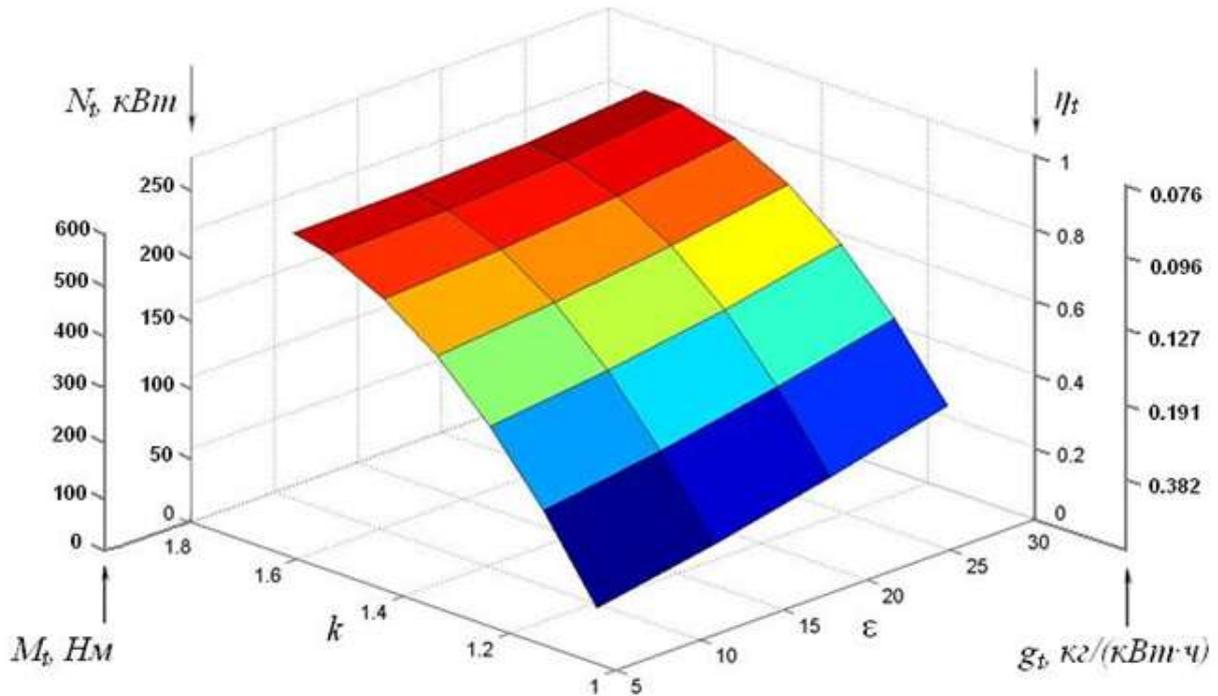


Рис. 3. График зависимостей полученный по математической модели:

$$\eta_t = f(\varepsilon; k); N_t = f(\varepsilon; k); M_t = f(\varepsilon; k); g_t = f(\varepsilon; k)$$

Таблица 1

Результаты расчета термического КПД

ε	7						
k	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,67
η_t	0,1768	0,3224	0,4422	0,5408	0,6220	0,6889	0,7285
ε	14						
k	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,67
η_t	0,2319	0,4101	0,5469	0,6520	0,7327	0,7947	0,8293
ε	21						
k	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,67
η_t	0,2625	0,4560	0,5988	0,7041	0,7818	0,8390	0,8699
ε	28						
k	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,67
η_t	0,2834	0,5135	0,6320	0,7363	0,8110	0,8646	0,8927

Таблица 2

Термодинамические показатели поршневого ДВС

Степень сжатия ε	7	14	21	28
Среднее термодинамическое давление p_t , МПа	2,053	2,219	2,274	2,285
Термодинамическая мощность N_t , кВт	146,850	177,045	191,193	199,936

Окончание табл. 2

Крутящий момент $M_t = \frac{9,55 \cdot N_t}{n}$, Н·м	369,057	444,942	480,498	502,471
Термический КПД η_t	0,5408	0,6520	0,7041	0,7363
Удельный термодинамический расход топлива g_t , кг/(кВт·ч)	0,141	0,117	0,108	0,104
Часовой расход топлива G_t , кг/ч	20,75			
Форсировка $\Phi_t = \frac{P_z}{P_t}$	5,189839	9,812758	14,52645	19,37548

В дальнейшем по методике, существующей на кафедре «Энергетические установки и тепловые двигатели» НГТУ им. Р.Е. Алексеева, были получены термодинамические характеристики ДВС, работающего по циклу Карно, а также математическая модель.

Анализ термодинамических КПД циклов Отто и Карно представлен в табл. 3 и на рис. 4 и рис. 5.

Таблица 3

Оптимизация КПД термодинамического поршневого ДВС, работающих по циклу Отто относительно КПД цикла Карно

КПД циклов	$\varepsilon = \frac{V_a}{V_c}$	Трехатомный газ $k = 1,1$	Двухатомный газ $k = 1,4$	Одноатомный газ $k = 1,67$
Карно η_t^K	7	0,5528 100%	0,7371 100%	0,8340 100%
Отто η_t^o		0,1738 32%	0,5408 73,4%	0,7285 87,4%
Карно η_t^K	28	0,6038 100%	0,8361 100%	0,9227 100%
Отто η_t^o		0,2834 47%	0,7363 88,1%	0,8927 97%

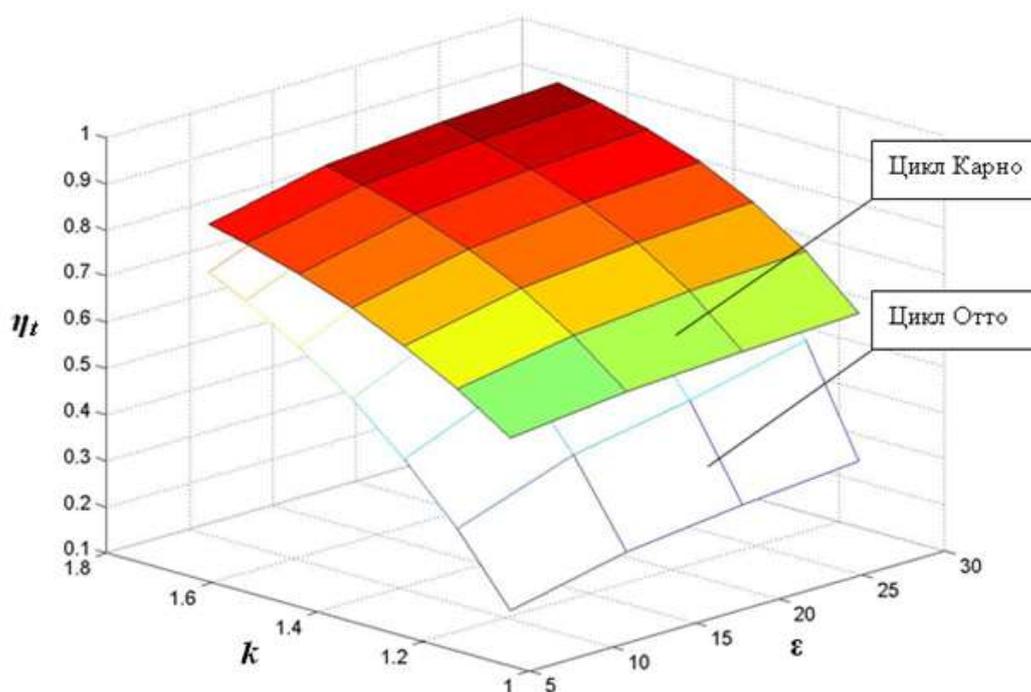


Рис. 4. Графики изменения термического КПД от степени сжатия ε и показателя адиабаты k циклов поршневых ДВС Отто и Карно

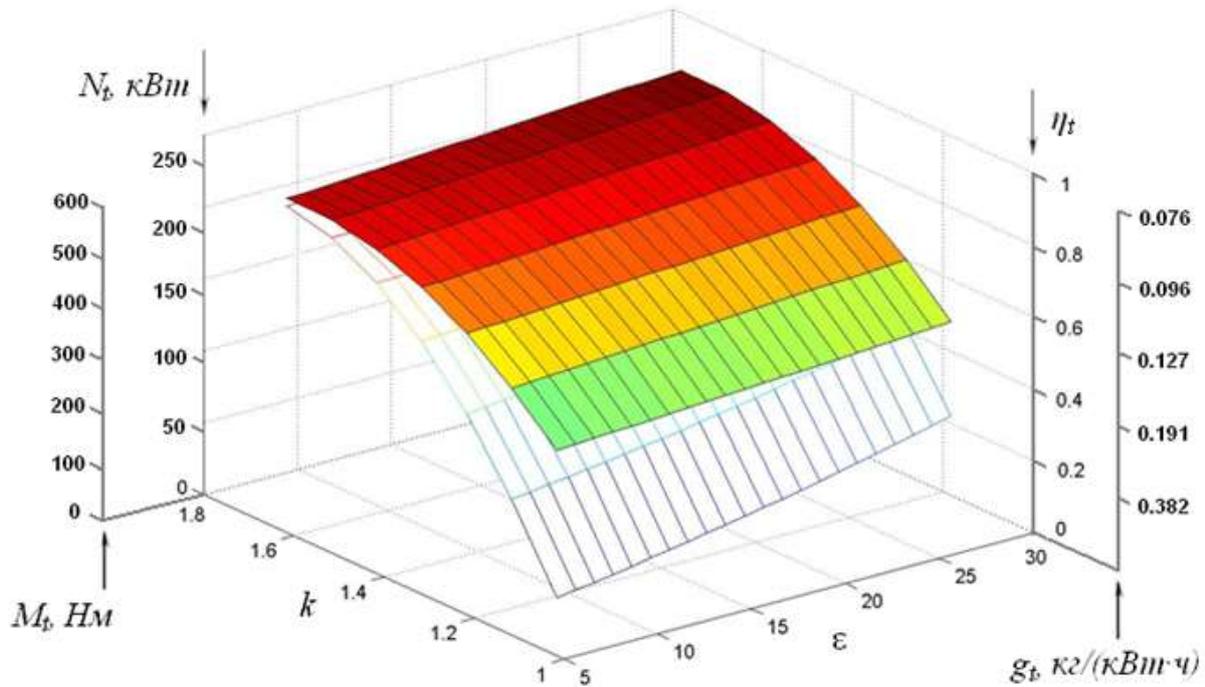


Рис. 5. График изменения термодинамических показателей, полученных по математическим моделям поршневого ДВС Карно и Отто:

$$\eta_t = f(\varepsilon; k); N_t = f(\varepsilon; k); M_t = f(\varepsilon; k); p_t = f(\varepsilon; k); g_t = f(\varepsilon; k)$$

При частных значениях: 1) $\varepsilon=7$, $k=1,1, k=1,4, k=1,67$, приведенные в табл. 3, показывают, что η_t^o цикла Отто приближается с 32 до 87%, 2) $\varepsilon=28$, $k=1,1, k=1,4, k=1,67$ - цикла Отто приближается с 47 до 97% к циклу Карно.

С увеличением степени сжатия ε улучшается смесеобразование, увеличивается дозарядка и, следовательно, коэффициент наполнения η_n .

Если шатун с бесконечной длиной шатуна ($L_{ш}=\infty$) будет ходить по продольной оси, скорость поршня уменьшается, а пик максимальной скорости V_{\max} приходится на 90° (рис. 6), поршень движется равномерно, что улучшает смесеобразование, увеличивает дозарядку и, следовательно, коэффициент наполнения η_n .

При увеличении степени сжатия ε мощность двигателя N_t увеличивается и чтобы сохранить мощность постоянной для всех ε , можно уменьшить обороты коленчатого вала, значит КПД механических потерь η_m уменьшается, а термодинамический КПД η_t увеличивается.

Математическая модель позволила в САПР ДВС «методом научного исследования» получить максимально предельные термодинамические показатели теоретического поршневого ДВС, работающего по циклу Отто (табл. 2 и рис. 3). Анализ табл. 1 и 2, рис. 1, 2, 3 показывает, что предложенная методика позволяет: 1) прогнозировать объединение бензиновых и дизельных поршневых двигателей как по конструктивному решению, так и по организации рабочих процессов; 2) значительно повысить эффективность ДВС, их экономические, энергетические и экологические свойства, возможно, применяя переменные: степень сжатия и рабочий объем. Полный объем цилиндра и масса рабочего тела в нем постоянные и несменяемые, а их величины выбраны при минимальной степени сжатия. Данная методика позволяет прогнозировать, что простыми способами можно повысить термодинамические показатели рядного четырехцилиндрового поршневого ДВС ОАО ЗМЗ, рабочим объемом 2,23 л на 15...20%.

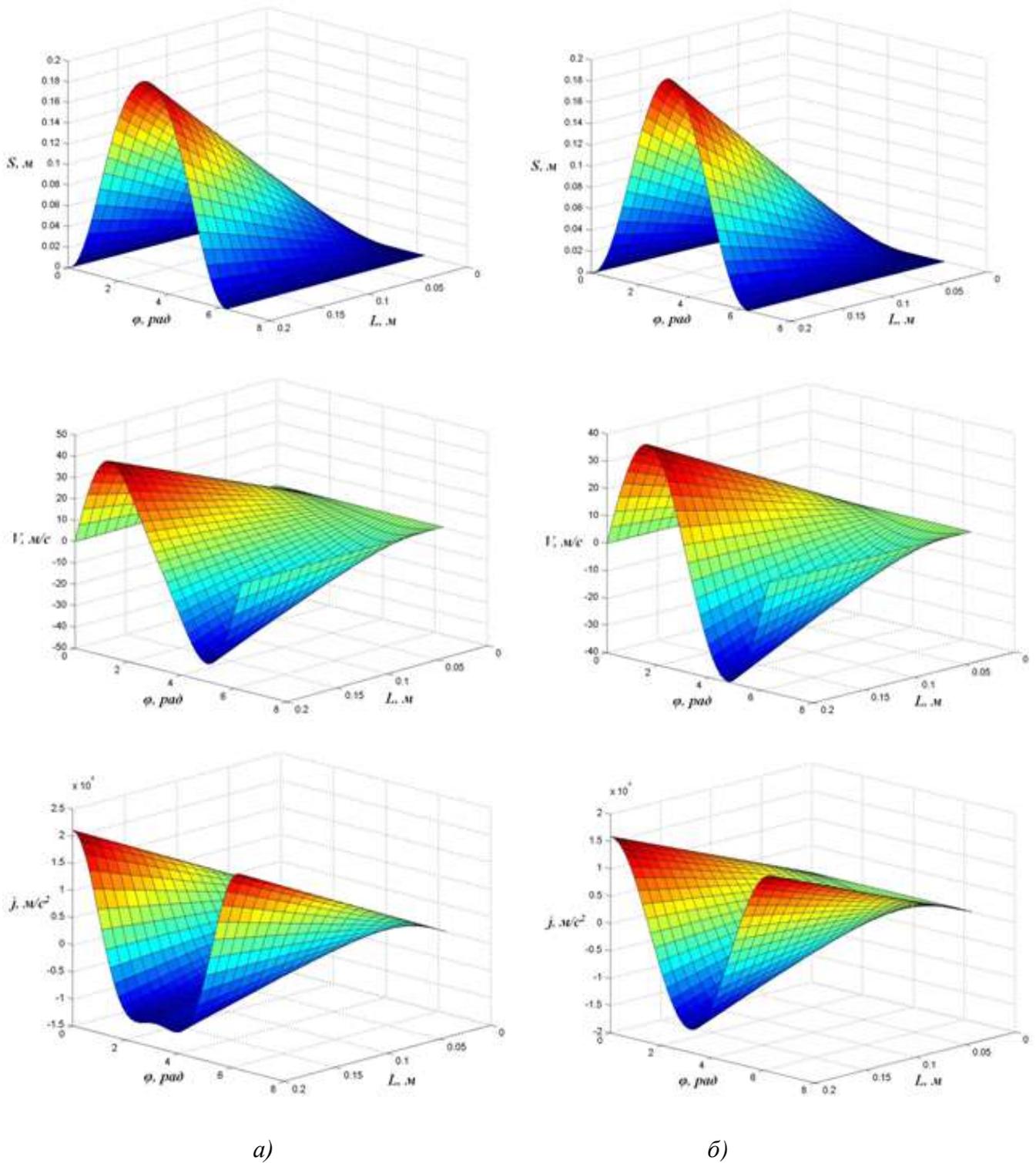


Рис. 6. Графики зависимости $S=f(\varphi,L)$, $V=f(\varphi,L)$, $j=f(\varphi,L)$:
 $a - L_u=148$ мм; $b -$ бесконечная длина шатуна ($L_u=\infty$)

Библиографический список

1. **Бурячко, В.Р.** Автомобильные двигатели. Рабочие циклы. Показатели и характеристики. Методы повышения эффективности / В.Р. Бурячко, А.В. Гук. – СПб.: НППКЦ, 2005. – 291 с.
2. **Орлин, А.С.** Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / А.С. Орлин, М.Г. Круглов. – М.: Машиностроение, 1983. – 540 с.
3. **Архаров, А.М.** Теплотехника / А.М. Архаров. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. – 712 с.

4. **Ленин, И.М.** Теория автомобильных и тракторных двигателей / И.М. Ленин. – М.: Машиностроение, 1969. – 368 с.
5. **Лашко, В.А.** Мировое судовое дизелестроение концепции конструирования, анализ международного опыта / В.А. Лашко. – М.: Машиностроение, 2005. – 502 с.
6. **Гзовский, М.Б.** Тенденции двигателестроения. Пойти своим путем // За рулем. 2006. №1. С. 24–25.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

L.A. Zakharov, A.N. Tarasov, V.L. Khimich, I.L. Zakharov

**PERFECTION OF THERMODYNAMIC INDICATORS OF THE PISTON ENGINE
WORKING ON THE HYBRID CYCLE**

In given article the basic directions of perfection of thermodynamic indicators piston the ICE with variable degree of compression and a hybrid running cycle are resulted.

Key words: piston the ICE, compression degree, hybrid running cycle, the ICE Carnout, Otto, Trinkler, CAD the ICE.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

О.С. Хватов², А.Б. Дарьенков¹, И.А. Тарпанов², В.В. Пшеничников²

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ПЕРЕМЕННОЙ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ С ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ УПРАВЛЕНИЯ ТОПЛИВОПОДАЧЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹
Волжская государственная академия водного транспорта²

Рассмотрены математическая модель, функциональная и структурная схемы дизельной электростанции с переменной скоростью вращения на основе асинхронного генератора с фазным ротором. Приведены результаты моделирования электростанции в пакете Matlab.

Ключевые слова: электростанция, дизель-генератор, генератор, преобразователь частоты, экономичный режим.

Системы "двигатель внутреннего сгорания - генератор" представляют широкий класс электроэнергетических систем, к которому относятся установки типа "дизель-генератор" (Д-Г), "бензиновый двигатель – генератор", судовые валогенераторные установки, ветродизель-электрические установки и ряд других.

Из приведенных выше систем наибольшее распространение получили установки типа Д-Г. Они, обладая высокой надежностью, достаточно большим моторесурсом и долговечностью, незаменимы в качестве автономных источников основного или резервного электропитания. Системы Д-Г строятся, как правило, на базе генераторов переменного тока.

подавляющее большинство систем Д-Г работает со стабильной скоростью вращения (ω) вала дизеля, независимо от мощности нагрузки (P). Такой режим работы дизеля является неоптимальным с точки зрения потребления топлива. Для обеспечения оптимального режима работы дизеля необходимо с изменением P менять ω [1]. Известно, что уменьшение ω при снижении нагрузки сокращает удельный расход топлива дизеля на 20-30%. При этом также обеспечивается оптимальный тепловой режим работы дизеля, снижение его износа и, следовательно, повышение моторесурса. Однако при этом должно выполняться требование стабильности частоты выходного напряжения ($f_1 = \text{const}$) при $\omega = \text{var}$.

Функциональная система Д-Г с переменной ω на базе машины двойного питания (МДП), в качестве которой используется асинхронный генератор с фазным ротором (АГ), представлена на рис. 1. Устройство работает следующим образом. Электропривод рейки топливного насоса (ЭПН) получает сигнал с блока вычислителя мощности нагрузки (ВМ), который соединен с выходами датчиков напряжения (ДН) и тока (ДТ), измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе преобразователя частоты (ПЧ). В зависимости от значения P задатчик экономичного режима работы дизеля (ЗЭР) формирует на своем выходе оптимальное значение скорости вращения $\omega_{\text{опт}}$ вала дизеля, при котором потребление топлива минимально для текущего значения P . С помощью сумматора сигналов, входящего в состав ЭПН, вычисляется разность сигнала задания $\omega_{\text{опт}}$ и сигнала датчика скорости враще-

ния вала дизеля (ДСВ). Сигнал от сумматора поступает на вход регулятора скорости вращения вала дизеля (РСВ), который с помощью исполнительного электродвигателя (ИЭД), перемещающего рейку топливного насоса, поддерживает скорость вращения вала дизеля на уровне, заданном ЗЭР. Таким образом, при изменении P на выходных выводах, а значит, и на валу дизеля, скорость вращения вала ω будет поддерживаться оптимальной с точки зрения минимального потребления топлива.

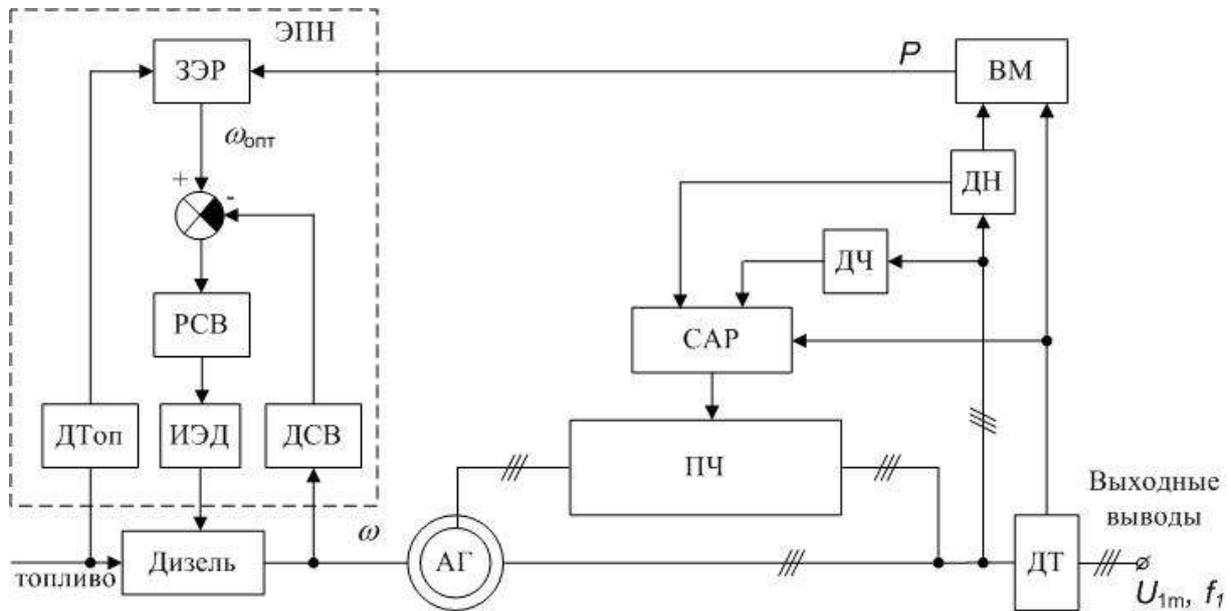


Рис. 1. Функциональная схема системы Д-Г с переменной скоростью вращения

Поскольку ω дизеля изменяется в зависимости от P , то амплитуда U_{1m} и частота f_1 переменного напряжения АГ будут также меняться в зависимости от P . При работе дизеля во всем диапазоне нагрузок стабилизацию амплитуды и частоты выходного напряжения ($U_{1m}=\text{const}$ и $f_1=\text{const}$) возможно обеспечить за счет ПЧ, включенного в цепь ротора АГ. Система автоматического регулирования (САР) формирует сигналы управления ПЧ в функции сигналов с датчиков частоты (ДЧ), а также датчиков ДТ и ДН.

Объектом управления ЭПН является дизель с газотурбинным наддувом, который описывается системой дифференциальных уравнений, характеризующих его динамические свойства и составленных для двух случаев [2]:

- изменение состояния дизеля под влиянием нагрузки M_C при неизменной координате регуляторного воздействия – цикловой подаче g_c , однозначно связанной с ходом топливной рейки h ;
- изменение состояния дизеля под влиянием регуляторного воздействия при неизменной величине активной мощности нагрузки P .

Система уравнений дизеля с газотурбинным наддувом имеет вид

$$\left. \begin{aligned} (T_{a\mu} p + \delta_{d\mu}) y_0 &= k_1 y_H - \mu; \\ (T_T p + \delta_T) y_T &= k_T y_0 - y_H; \\ y_H (T_K p + \delta_K) &= y_T - k_K y_0; \\ (T_{ax} p + \delta_d) y_0 &= x_0 + k_d y_H; \\ (T_T p + \delta_T) y_T &= k_h x_0 + k_T y_0 - y_H; \\ k_g g_c &= x_0 + \theta_\varphi y_0, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $y_0, \mu, y_n, y_T, x_0, g_{\Sigma}$ - безразмерные величины изменения, скорости вращения вала и нагрузки дизеля, давления нагнетаемого воздуха, скорости вращения ротора турбины, положения рейки топливного насоса и цикловой подачи топлива соответственно;

$T_{a\mu}, T_{ax}, T_T, T_K$ - постоянные времени, дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $T_{ax} \approx T_{a\mu}$), турбонагнетателя и впускного коллектора соответственно;

$\delta_{d\mu}, \delta_d, \delta_T, \delta_K$ - коэффициенты самовыравнивания, дизеля в каналах нагрузочного и регуляторного воздействий (при этом $\delta_d \approx \delta_{d\mu}$), турбонагнетателя и впускного коллектора соответственно;

k_1, k_T, k_d, k_K, k_h - коэффициенты, учитывающие, зависимость крутящего момента на валу дизеля от давления наддува, изменение момента сопротивления на валу дизеля при изменении мощности нагрузки; зависимость расхода воздуха через дизель от скорости его вращения; зависимость крутящего момента турбины от ее скорости вращения и положения рейки топливного насоса;

k_g и θ_ϕ - коэффициенты самовыравнивания дизеля и усиления топливоподающей аппаратуры дизеля.

Математическая модель МДП – генератора основывается на базе уравнений Парка – Горева в системе синхронно вращающихся координат, опорный вектор которой вращается с частотой поля статора ω_1 , и имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned} U_{1X} / \omega_1 &= \omega J_{\Sigma} p / I_{1X}; \\ U_{1Y} &= -\omega_1 X_1 I_{1Y} + \omega_1 X_m I_{2Y}; \\ U_{2X} &= R_2 I_{2X} + p \sigma X_2 I_{2X} - E_{2Y}; \\ U_{2Y} &= R_2 I_{2Y} + p \sigma X_2 I_{2Y} + E_{2X}; \\ \Psi_{1X} &= X_1 I_{1X} + X_m I_{2X}; \\ \Psi_{1Y} &= X_1 I_{1Y} + X_m I_{2Y}; \\ \Psi_{2X} &= \sigma X_2 I_{2X} + X_m I_{1X}; \\ \Psi_{2Y} &= \sigma X_2 I_{2Y} + X_m I_{1Y}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где $U_{1X}, U_{1Y}, U_{2X}, U_{2Y}$ - проекции векторов напряжения статора и ротора на оси X и Y ортогональной системы координат;

$I_{1X}, I_{1Y}, I_{2X}, I_{2Y}$ - проекции векторов токов статора и ротора на оси X и Y;

$\Psi_{1X}, \Psi_{1Y}, \Psi_{2X}, \Psi_{2Y}$ - проекции векторов потокосцеплений на оси X и Y;

E_{2X}, E_{2Y} - проекции ЭДС ротора на оси X и Y;

ω_1, ω, σ - частота поля статора, частота вращения ротора и коэффициент рассеяния соответственно;

J_{Σ} - суммарный момент инерции МДП, приведенный к валу дизеля;

R_2 - активное сопротивление ротора МДП;

X_1, X_2, X_m, R_n, X_n - реактивные сопротивления статора, ротора и цепи намагничивания МДП, активное и реактивное сопротивления нагрузки.

Нагрузка МДП-генератора описывается системой уравнений

$$\left. \begin{aligned} U_{1X} &= R_{\text{н}} I_{\text{н}X} + x_{\text{н}} I_{\text{н}X} + L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{н}X}}{dt}; \\ U_{1Y} &= R_{\text{н}} I_{\text{н}Y} + x_{\text{н}} I_{\text{н}Y} + L_{\text{н}} \frac{dI_{\text{н}Y}}{dt}; \\ I_{\text{н}X} &= I_{1X} + I_{\text{пч}X}; \\ I_{\text{н}Y} &= I_{1Y} + I_{\text{пч}Y}; \\ \Delta P &= P_{\text{ген}} - P_{\text{наг}}; \\ \omega_1 - \omega_{\text{эт}} &= \frac{d}{dt} \Delta\alpha; \\ \Delta\alpha &\sim \Delta P; \\ (I_{\text{рген}} - I_{\text{рнаг}}) \cdot Z_{\text{в}} &\approx \Delta U_1, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $L_{\text{н}}$ - индуктивность нагрузки;

$I_{\text{н}X}, I_{\text{н}Y}$ - проекции вектора тока нагрузки на оси X и Y ;

$I_{\text{пч}X}, I_{\text{пч}Y}$ - проекции обобщенного вектора тока ПЧ на стороне сети, определяемого током I_2 и углами управления ПЧ, на оси X и Y ;

$P_{\text{ген}}, P_{\text{наг}}$ - активные мощности МДП и нагрузки соответственно;

$\omega_{\text{эт}}$ - эталонное значение частоты напряжения статора МДП;

$\Delta\alpha$ - изменение фазы вектора напряжения статора МДП;

$I_{\text{рген}}, I_{\text{рнаг}}$ - реактивные составляющие токов МДП и нагрузки соответственно;

$Z_{\text{в}}$ - сопротивление контура возбуждения МДП;

ΔU_1 - изменение величины напряжения статора генератора.

На основе систем уравнений (1), (2) и (3) разработана структурная схема системы Д-Г (рис. 2). Система регулирования содержит три канала: по скорости вращения ω вала дизеля, частоте f_1 и амплитуде U_{1m} выходного напряжения АГ [3].

Одной из важнейших задач при создании систем Д-Г с переменной скоростью вращения является разработка ЗЭР дизеля, который в зависимости от P должен формировать на своем выходе оптимальные, с точки зрения потребления топлива значения скорости вращения $\omega_{\text{опт}}$ вала дизеля [4]. Зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ может быть легко определена по многопараметровой характеристике дизеля. Однако, многопараметровая характеристика для каждого конкретного дизеля носит индивидуальный характер, и производители дизелей, как правило, не предоставляют таких характеристик. Кроме того, многопараметровая характеристика дизеля будет меняться в зависимости от условий внешней среды, от степени износа дизеля и марки топлива.

Функциональная схема ЗЭР приведена на рис. 3 и состоит из четырех основных элементов: контроллера обучения (КО), контроллера управления (КУ), ассоциативной памяти (АП) и памяти данных, которые объединены общей информационной шиной.

Основным функциональным элементом ЗЭР является АП, представляющая собой нейронную сеть с радиальными базисными функциями. Важное достоинство нейронных сетей данного типа – способность решать задачу аппроксимации табличной функции многих переменных, дополненной процедурой интерполяции (экстраполяции) для нахождения произвольного значения данной функции. Таким образом, АП обладает способностью накапливать дискретные значения скорости $\omega_{\text{опт}}$ в зависимости от P , а также генерировать значения $\omega_{\text{опт}}$ для отсутствующих в памяти дискрет. Это свойство освобождает ЗЭР от необходимости знания непрерывной зависимости $\omega_{\text{опт}} = f(P)$.

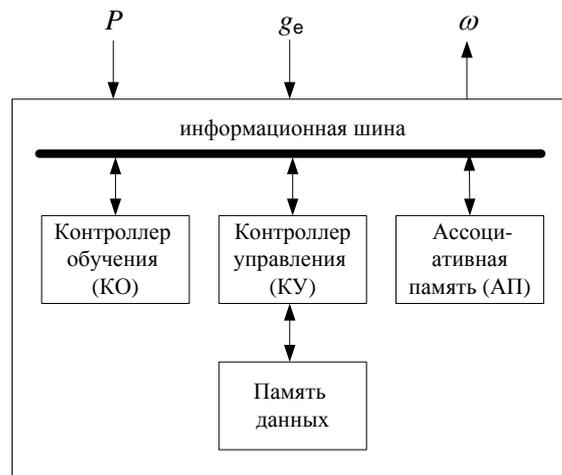


Рис. 3. Функциональная схема ЗЭР

Обучение нейронной сети осуществляется КО на основе алгоритма «обратного распространения ошибки». Целью обучения нейронной сети является такая настройка ее весов, чтобы некоторое множество значений, поданное на ее входы, приводило к получению требуемого множества выходных значений. При этом минимизируется ошибка выходного параметра $\omega_{\text{опт}}$ в соответствии с целевой функцией среднеквадратического отклонения результата работы нейронной сети от целевой функции. Используемое в процессе обучения «обучающее множество» логических пар $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ формируется КУ в процессе управления Д-Г установкой.

В случае выхода текущего значения мощности нагрузки P за пределы диапазона, в котором производилось обучение АП, соответствующее значение $\omega_{\text{опт}}$ определяется контроллером КУ. При этом контроллером КО производится «дообучение» нейронной сети АП. Точность расчета зависимости $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ и, как следствие, экономичность системы будет определяться плотностью значений и шириной диапазона обучения, который можно сравнить с накопленным «опытом» ЗЭР.

На основе структурной схемы Д-Г с переменной скоростью вращения (рис. 2) и функциональной схемы ЗЭР (рис. 3) в пакете Matlab разработана имитационная модель электростанции на базе Д-Г с переменной скоростью вращения.

Результаты моделирования для дизеля номинальной мощностью 142 кВт представлены на рис. 4. В частности, моделировался наброс нагрузки P на 100% и сброс на 30%, при этом получены зависимости изменения скорости вращения вала дизеля ω (рис. 4, а, б), а также частоты f_1 и амплитуды U_{1m} выходного напряжения системы (рис. 4, в, г) для значений $\cos\varphi$ нагрузки, равных 0,5 и 0,9. Анализ показал, что при набросе нагрузки на 100% скорость вращения ω вала дизеля увеличилась на 50% и достигла номинального значения, а при сбросе нагрузки на 30% - снизилась от номинальной на 10%. При набросе нагрузки кратковременные провалы величины выходного напряжения достигают 8 и 16% соответственно для $\cos\varphi = 0,9$ и $\cos\varphi = 0,5$; провалы частоты выходного напряжения достигают 10 и 20% для $\cos\varphi = 0,5$ и $\cos\varphi = 0,9$ соответственно.

На рис. 5 приведена кривая, являющаяся результатом работы модели ЗЭР. Точками обозначены дискретные значения $\omega_{\text{опт}}$ в относительных единицах, полученные с помощью КО для соответствующих им значений P в относительных единицах. Сплошной линией показана непрерывная зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$, полученная на основе дискретных значений с помощью АП. При этом значения $\omega_{\text{опт}}$, рассчитанные с помощью АП, отличаются от дискретных значений, определенных КО для соответствующих значений P , на величину, не превышающую 0,03% от номинального значения скорости вращения ω вала дизеля.

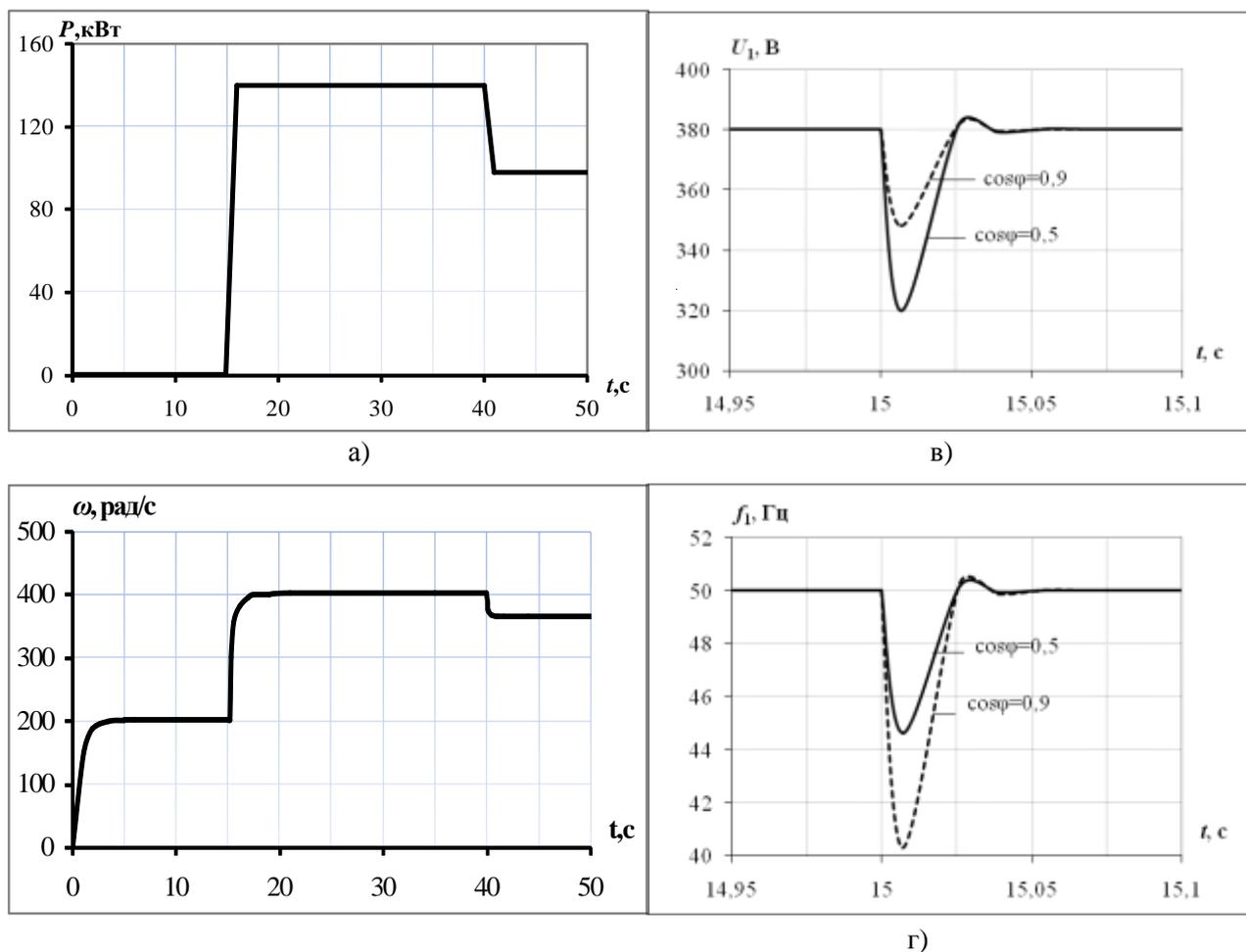


Рис. 4. Результаты моделирования системы Д-Г переменной скорости вращения на базе МДП в пакете Matlab при значениях $\cos\varphi=0,5; 0,9$:

- a* – наброс нагрузки P – 100%, сброс нагрузки P – 30%;
- б* – изменение скорости вращения вала дизеля ω , соответствующее набросу и сбросу нагрузки;
- в, г* – изменение частоты f_1 и напряжения U_1 системы Д-Г в момент наброса нагрузки

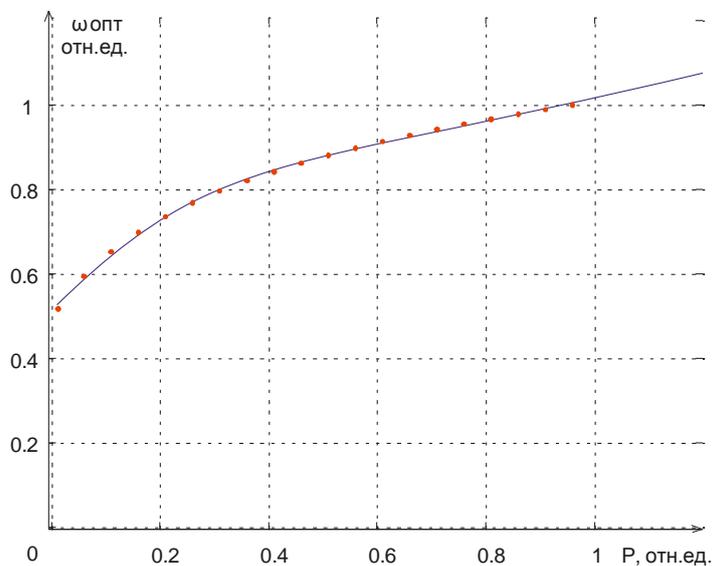


Рис. 5. Результат работы модели ЗЭР

Анализ полученных значений показывает, что наибольшая погрешность работы ЗЭР приходится на граничные точки диапазона обучения. Однако необходимо отметить, что в случае выхода за его пределы значения $\omega_{\text{опт}}$, определяемые ЗЭР в целом согласуются с критериями минимального расхода топлива, не являясь случайными величинами, но погрешность при этом возрастает по мере удаления от границ диапазона обучения и может достигать единиц процента. ЗЭР, модель которого разработана, позволяет уточнять зависимость $\omega_{\text{опт}} = f(P)$ при эксплуатации Д-Г в зависимости от изменения характеристик дизеля в процессе его износа, марки топлива и меняющихся условий работы дизеля. Таким образом, Д-Г с переменной скоростью вращения, оснащенный ЗЭР, можно отнести к классу самообучающихся систем.

Выводы

1. Работа системы Д-Г с переменной скоростью вращения позволит обеспечить экономии топливных ресурсов до 20-30%.
2. Применение в составе электрогенерирующих установок дизелей с переменной скоростью вращения требует нового подхода к управлению топливоподачей, который возможно реализовать на базе интеллектуальной управляющей системы, построенной на базе нейронной сети.
3. Разработанные при моделировании Д-Г с переменной скоростью вращения и ЗЭР в Matlab алгоритмы в дальнейшем возможно реализовать на базе современной микропроцессорной техники при создании экспериментального стенда.

Библиографический список

1. **Орлов, А.В.** Перспективы создания дизель-электрических установок с переменной частотой вращения / А.В. Орлов, В.А. Путятинский, В.В. Сапожников // Судостроение. 1976. № 10. С. 28–29.
2. **Крутов, В.И.** Автоматическое регулирование двигателей внутреннего сгорания: учеб. пособие для вузов / В.И. Крутов. – М.: Машиностроение, 1979. – 615 с.
3. Высокоэффективная дизель-генераторная электростанция переменной частоты вращения на основе машины двойного питания / О.С. Хватов [и др.] // Приводная техника. 2010. №5. С. 14–19.
4. **Хватов, О.С.** Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков // Известия ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ. 2010. Ч. 4. С. 126–131.

Дата поступления
в редакцию 01.02.2011

O.S. Khvatov, A.B. Daryenkov, I.A. Tarasov, V.V. Pshenichnikov

IMITATION MODEL OF DIESEL ELECTRIC POWER STATION CHARACTERIZED BY ALTERNATING FREQUENCY ROTATION WITH INTELLECTUAL CONTROL SYSTEM OF FUEL GIVING

The consideration of the mathematical model, flow and structural sheets of diesel electric power station based on the asynchronous generator with a phase rotor. The description of results of modeling of electric power station in Matlab.

Key words: electric power station, diesel generator, asynchronous generator, converter, economic mode.

УДК 621.314.2

А.С. Плехов¹, М.Н. Охотников², В.Г. Титов³

ТЕХНОЛОГИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

ООО «Энергосбережение»¹,ООО «Развитие»²,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева³

На примерах использования компенсационного выпрямителя в звене постоянного тока частотно управляемого электропривода обсуждаются комплексные технические решения для предприятий промышленности и жилищно-коммунального хозяйства. Для демонстрации и оценки прогнозируемых результатов инноваций в указанной предметной области предлагается информационный подход на базе дескриптивного моделирования процессов производства, использующего предлагаемые энергосберегающие системы электрооборудования.

Ключевые слова: частотно управляемый электропривод, звено постоянного тока, реактивная мощность, компенсация реактивной мощности, компенсационный выпрямитель, раздельное управление группами вентиля, автономный инвертор тока, широтно-импульсное управление, производительная функция электрооборудования, балансовая модель электрооборудования.

В настоящее время производители все чаще стремятся продвинуться на рынке за счет освоения новых технологий. Ни одна страна мира не обеспечивает себя технологиями полностью. Более того, для любой страны объемы импортируемых технологий больше, чем объемы собственных. Для России, находящейся в настоящий момент на стадии заимствования в развитых странах стандартов потребления, объемы технологий, разрабатываемых ею самой, существенно меньше, чем объемы технологий, которые она должна закупать для нормального развития или хотя бы для обеспечения восприимчивости к мировым достижениям. Это в значительной степени предопределяет слабый интерес бизнеса, в том числе и российского, к российским технологиям, особенно в связи с частым отсутствием комплексных решений.

В ответ на этот вызов авторы предлагают комплексное решение - технологию энергосбережения, основанную на компенсации реактивной мощности и на ее дополнительной генерации при условии наличия в данный момент резервов в части установленной мощности электрооборудования.

Поскольку двигатель не всегда работает в номинальном режиме с максимальной производительностью, то имеется возможность для электрооборудования работать не только на выполнение технологического процесса, но и генерировать реактивную мощность в сеть. Такая возможность много десятилетий используется при эксплуатации синхронных двигателей, способных генерировать реактивную мощность емкостного характера в режиме перевозбуждения в определенных пределах по условиям температурного режима [1, 2].

Применение в частотно-регулируемом приводе преобразователя частоты с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет снизить затраты промышленных предприятий, благодаря компенсации реактивной мощности на месте потребления.

Применение в двухзвенном преобразователе частоты управляемого выпрямителя в сочетании с автономным инвертором тока позволяет реализовать работу электропривода во всех возможных режимах с рекуперацией в сеть энергии торможения [3]. Это важно не только для электроприводов подъемно-транспортных механизмов, но для любых электроприводов, когда частота использования тормозных режимов двигателя с учетом его номинальной мощности достигает значения, экономически оправдывающего усложнение схемы.

Питание асинхронного двигателя от преобразователя частоты, в частности двухзвенного, открывает возможности не только регулирования производительности машины, но и одновременной компенсации реактивной мощности в питающей сети [4].

В реальных условиях при применении бестрансформаторных схем выпрямителей на входе преобразователя частоты при использовании асинхронного двигателя на 380/220 В возможны два варианта для практической реализации рассматриваемой схемы [5].

Первый вариант характеризует режимы работы преобразователей частоты при питании от сети 380 В и при соединении обмоток статора двигателя в звезду.

В зависимости от угла управления компенсационным преобразователем α результаты расчетов в относительных единицах представлены графиками на рис. 1, где показаны: потребляемая активная мощность $P_{дв}/P_{ном}$; генерируемая реактивная мощность емкостного характера $Q_{с(зв)} = f(\sin \alpha)$; угол управления α .

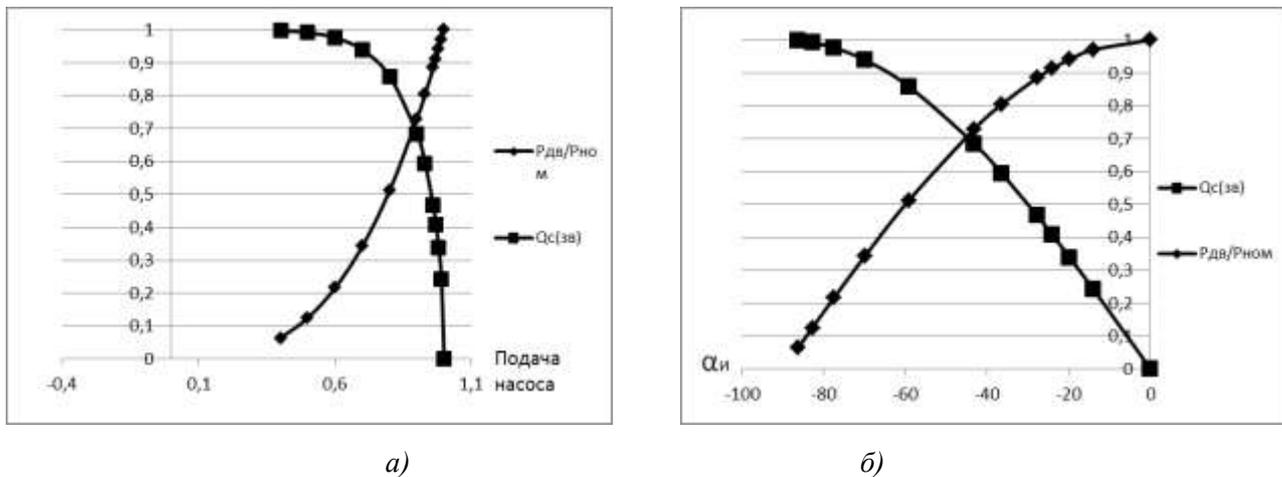


Рис. 1. Характеристики работы привода (а) и компенсационного преобразователя (б) при включении обмоток двигателя в «звезду»

При нулевом значении угла управления α потребляемая активная мощность равна максимальному значению, а реактивная мощность равна нулю. Характерной особенностью таких выпрямителей является резкое возрастание углов управления при уменьшении нагрузки на двигатель. Так, при снижении нагрузки от полной (в относительных единицах это 1,0) до 0,9 потребляемая двигателем мощность снижается до уровня 0,729, а генерируемая реактивная мощность возрастает с нуля до 0,682 от полной мощности активного компенсационного выпрямителя. Начиная с 70% режима загрузки и менее, реактивная мощность превышает уровень 0,9 от полной мощности выпрямителя S_p .

Во втором варианте напряжение питающей сети 380 В, обмотки двигателя соединены в «треугольник» – $U_{л} = 220$ В.

В таком режиме среднее значение на выходе выпрямителя будет $U_{д0} = 500$ В, а для обеспечения максимального значения напряжения на инверторе для формирования наибольшего действующего значения переменного тока 220 В потребуется выпрямленное напряжение $U_{д0дв} = 300$ В. В этом случае, чтобы получить начальное напряжение для инвертора 300 В, необходимо установить минимальное значение угла управления α_{\min} :

$$\alpha_{\min} = \arccos(U_{д0дв} / U_{д0выпр}), \text{ что соответствует углу } 53 \text{ град. эл.}$$

Так как расчетная мощность выпрямителя получается больше установленной мощности двигателя, определим отношение мощности двигателя к полной мощности выпрямителя:

$$S_{дв.прив} = S_{дв} (U_{д0дв} / U_{д0выпр}). \quad (1)$$

Это означает, что избыточное напряжение $U_{изб} = 500 - 300 = 200$ В будет затрачиваться на дополнительную генерацию реактивной мощности емкостного характера и последняя будет иметь постоянную составляющую, независимую от загрузки двигателя. С учетом изложенного, на графике рис. 2 приведены результаты пересчета режимов работы двигателя по отношению к полной мощности выпрямителя в системе относительных единиц.

Характерной особенностью этого варианта является то, что при полной нагрузке выпрямитель будет генерировать постоянную составляющую реактивной мощности емкостного характера в $n = (U_{d0\text{выпр}}/U_{d0\text{дв}})$ раз большую, чем в первом варианте, до момента достижения углом управления значения $\alpha_{и\text{min}} = \arccos(U_{d0\text{дв}}/U_{d0\text{выпр}})$. Этот угол соответствует напряжению на входе преобразователя частоты $U_{d0\text{дв}} = 300\text{В}$, что позволяет при модуляции получить действующее значение линейного напряжения переменного тока 220 В.

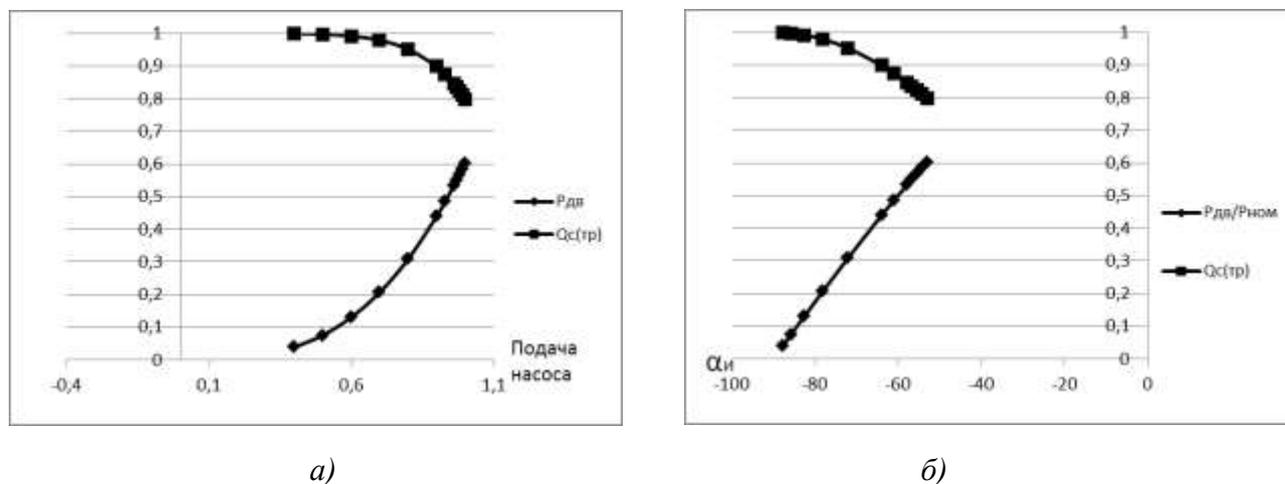


Рис. 2. Характеристики работы привода (а) и компенсационного преобразователя (б) при соединении обмоток двигателя в «треугольник»

Зона непостоянства составляющей генерации реактивной мощности $Q_{с(тр)} = f(\sin \alpha_{и})$ в этом случае начинается только при угле управления $\alpha_{и\text{min}} = \arccos(U_{d0\text{дв}}/U_{d0\text{выпр}}) = 53^\circ$. При этом составляющая реактивной мощности быстро приближается к значению $(0,98 - 0,99) S_{П}$.

Возможности структуры, реализованной по второму варианту, целесообразно использованы и в более гибких схмотехнических решениях. Тем более, что включение обмоток двигателя в «треугольник» предполагает соответствующее увеличение номинального тока преобразователя, что позволяет компенсировать реактивную мощность распределительной сети уже не в 1,66 раза, а в три раза большую, чем при действующем значении напряжения на выходе преобразователя частоты для питания двигателя 380 В.

Однако значения одинаковых углов управления вентилями анодной и катодной групп активного компенсационного выпрямителя диктуются механической нагрузкой на электродвигатель, при этом компенсационный преобразователь генерирует реактивную мощность в сеть «по остаточному принципу».

Вместе с тем, уровень генерируемой в распределительную сеть реактивной мощности емкостного характера требует непрерывной коррекции из-за непрерывного изменения нагрузки электроприемников, включенных параллельно на эту сеть, о чем свидетельствует изменение мгновенного значения напряжения в сети.

Безусловно, и генерируемая на постоянном уровне реактивная мощность весьма желательна для сокращения технологического расхода электроэнергии, однако обеспечение возможности ее регулирования независимо от технологической нагрузки электропривода с компенсационным преобразователем в функции, например, текущего значения действующего напряжения в сети является актуальной задачей.

Авторами предложены два способа решения этой проблемы [6, 7]:

- использовать раздельное управление углами вентиляей групп, работающих при естественной и принудительной коммутации;

- наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения компенсационного выпрямителя применять регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции.

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Рассмотрим схему на рис. 3, реализующую первый из них.

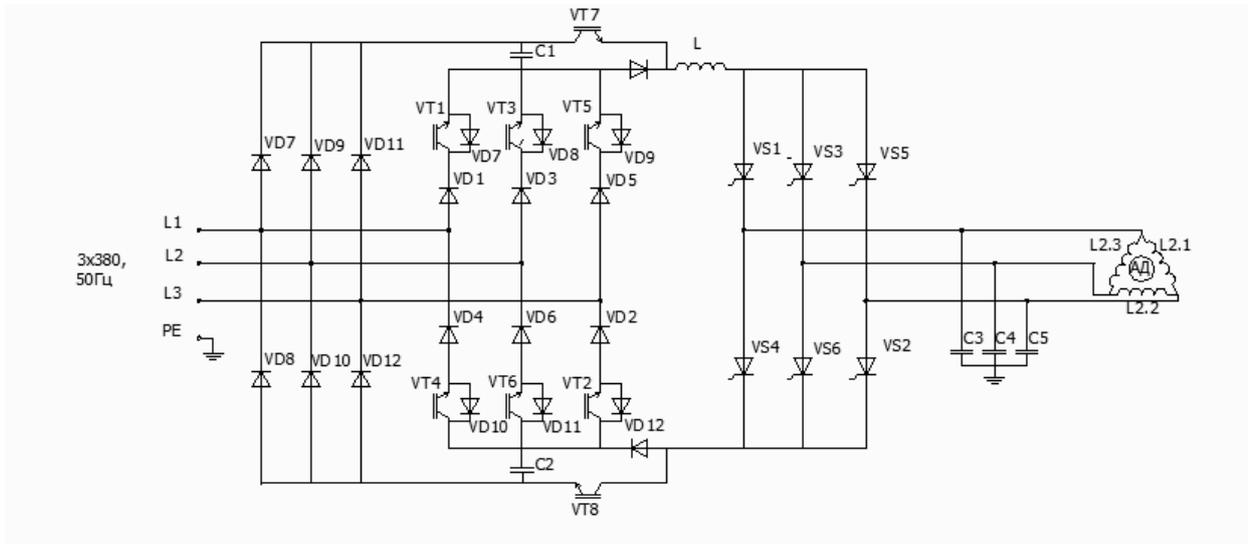


Рис. 3. Схема силовых цепей частотно управляемого асинхронного электропривода с компенсационным выпрямителем и выходным инвертором тока

Автономный компенсационный выпрямитель (АКВ) позволяет получить выпрямленное напряжение на выходе, потребляя из сети активную и реактивную энергию, которая может иметь индуктивный или емкостной характер в зависимости от углов управления α_e и α_n . При этом полагаем, что вентили катодной группы (VT1, VT3, VT5) управляются с углом α_n , т.е. работают в режиме принудительной коммутации с генерацией реактивной мощности в сеть. А вентили анодной группы (VT4, VT6, VT2) управляются с углом α_e , потребляя реактивную мощность из сети.

Подобный режим работы выпрямителя наблюдается в полупроводящем мостовом выпрямителе, который можно рассматривать как последовательное соединение однополупериодных управляемых и неуправляемых выпрямителей. Выпрямленное напряжение неуправляемого выпрямителя постоянно, и оно суммируется с регулируемым напряжением на выходе управляемого выпрямителя. При углах управления, больших 90° , управляемая группа работает в инверторном режиме и передаваемая через диоды мощность возвращается в сеть переменного тока. Электродвижущая сила инвертора направлена навстречу напряжению выпрямителя и уменьшает результирующее напряжение на выходе моста. Теоретически выходное напряжение равно нулю при $\alpha = 180^\circ$, что практически недопустимо по условиям коммутации.

Поскольку мостовая схема может быть замещена соединением двух нулевых схем, как показано на рис.4, то действующее значение выпрямленного напряжения может быть представлено как:

$$U_e = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} U_c \sin \frac{\pi}{6} [\cos \alpha_n + \cos(\gamma - \alpha_e)] \approx \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_n + \frac{U_{d0}}{2} \cos \alpha_e. \quad (2)$$

С другой стороны, от углов α_e и α_n зависит и величина потребляемой активной и реактивной мощности:

$$P_{AKB} = mU I_{I(1)} (\cos \alpha_e + \cos \alpha_n),$$

$$Q_{AKB} = mU I_{I(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_n) \quad (3)$$

Технологическая задача требует заданного значения $P_{AKB} = f(p_{вент}, q_{вент})$, где $p_{вент}, q_{вент}$ - соответственно давление и подача, например, вентилятора. Предложенная схема позволяет обеспечить не только заданное значение активной мощности, но и изменение реактивной мощности, потребляемой из сети или генерируемой в сеть в зависимости от соотношения углов управления вентилями.

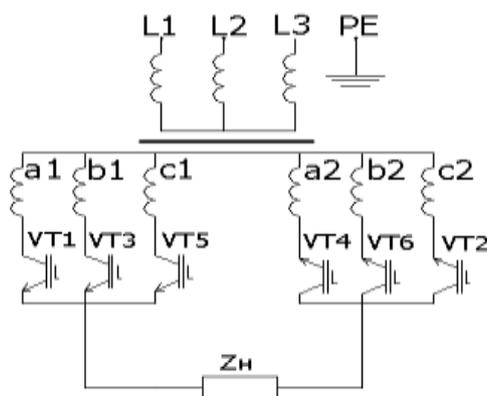


Рис. 4. Схема замещения мостового компенсационного выпрямителя с раздельным управлением вентилями катодной и анодной групп

Таким образом, изменением управления - координаты точки на плоскости в осях α_e и α_n - в допустимой для них области можно обеспечить минимально возможное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах.

Ограничивающим фактором может быть мощность, выделенная для электроустановки или установленная мощность выпрямителя.

Поскольку $\cos \varphi = \cos(\alpha + \frac{\gamma}{2})$ и полагая $\frac{\gamma}{2} \approx 0$, можно считать, что $\varphi_{(1)} \approx \alpha$. Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) компенсационным выпрямителем, будет

$$Q_{AKB} = mU I_{I(1)} (\sin \alpha_e + \sin \alpha_n), \quad (4)$$

где $\alpha_n < 0$.

Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор - гармоника тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [8, 9]. Авторами разработаны практические схемы такого фильтра гармоник на основе релейного регулятора тока, осуществлено исследование на модели свойств и характеристик активного фильтра гармоник, который способен с точностью до 5% компенсировать все гармоники в полосе частот до 2000 Гц.

Использование транзисторов в качестве вентилях в рассматриваемых схемах позволяет реализовать их свойства приборов с непрерывным управлением: в схеме на рис. 4 коммутирующий конденсатор фильтра С1 и С2 может включаться не один раз за период коммутации тока из одной фазы сети в другую, а несколько раз, в целях уменьшения коммутационных перенапряжений на вентиле [10]. В этой связи предложенная авторами схема компенсационного выпрямителя может быть названа активным компенсационным выпрямителем.

Другая возможность - реализация широтно-импульсной модуляции выпрямленного тока при регулировании выходного напряжения на обмотках двигателя, включенного на выходе АИТ. Автономный инвертор тока построен по схеме, аналогичной схеме АКВ (на рис. 5).

В ПЧ на основе инвертора тока выпрямленный ток сохраняет направление во всех режимах работы электропривода. Выпрямленное напряжение изменяется за счет угла фазового управления АКВ. Для снижения скорости электропривода производится снижение U_d . Для этого в компенсационном выпрямителе увеличивают угол опережения вектора тока по отношению к напряжению на стороне сети. АКВ – преобразователь со стороны сети переходит в режим инвертора, что позволяет рекуперировать энергию в сеть.

Однако главное предназначение схемы АКВ, совмещенного с инвертором тока (ИТ) с ШИМ (рис. 6), состоит в том, что преобразователь на стороне нагрузки, работая в режиме автономного инвертора тока с ШИМ, позволяет в определенных пределах регулировать напряжение на статоре двигателя, независимо от угла управления компенсационным выпрямителем.

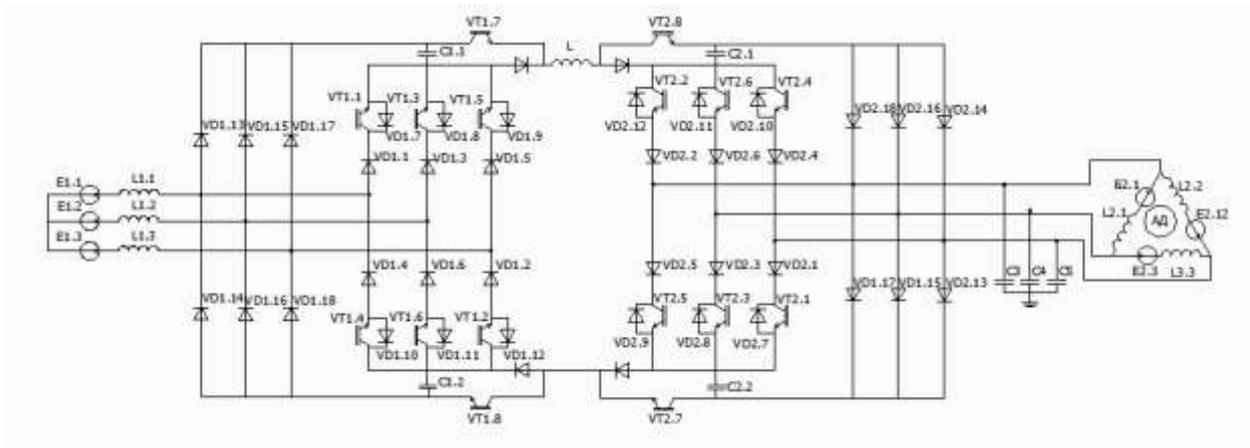


Рис. 5. Схема силовых цепей частотно управляемого асинхронного электропривода с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока и инвертором тока с широтно-импульсной модуляцией

Указанные пределы зависят от значения необходимой механической мощности на валу двигателя

$$P_M = M(\omega) * \omega, \quad (5)$$

которая в свою очередь обеспечивается необходимым значением тока на входе инвертора тока. Без учета потерь можно считать, что

$$P_M = P_{AKB} = I_d (M(\omega)) * U_{d0} * \cos(\alpha_n) * \gamma, \quad (6)$$

где γ – степень регулирования напряжения на нагрузке автономного инвертора тока, $\gamma = U_{m2}/U_d$. Напряжение на статоре приводного двигателя U_{m2} формируется на его комплексном сопротивлении при протекании тока по обмоткам статора. Этот ток изменяется под управлением ШИМ, но при этом остается неизменным ток в звене постоянного тока, благодаря специальному алгоритму управления ключами и наличию конденсаторов на выходе инвертора тока с ШИМ [7].

Поэтому реактивная мощность, генерируемая в сеть, при пренебрежении потерями, может быть выражена так:

$$Q_{AKB} = I_d (M(\omega)) * U_{d0} * \sin(\alpha_n). \quad (7)$$

Аналогично приведенной математической формулировке, задача управления рассматриваемым АКВ - ИТ с ШИМ будет следующей: найти оптимальное соотношение между значением угла управления α_n вентилями компенсационного выпрямителя на стороне сети и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора γ , доставляющие

$$\min(\operatorname{tg} \varphi_{\text{сети}}) = \min \left(\frac{Q_{\text{сети}} - Q_{AKB}}{P_{AKB}} \right). \quad (8)$$

В современном мире все более возрастает коммерческая значимость технологий. Передача технологий оказывается не менее важной, чем оборот денежных средств, поскольку технологическая невосприимчивость покупателя является главнейшим барьером для продаж высокотехнологичных продуктов и услуг. Даже «сам» бизнес должен знать, что существует лучшее и более дешевое решение. Если это касается электрооборудования, то необходимо демонстрировать его новые функции, как определяющие преимущества в существующем и модернизированном бизнес-процессе. Бизнес-процесс состоит из последовательности операций.

Исследование операций начинается тогда, когда для обоснования решений применяется тот или другой математический аппарат. Под операцией понимается любое мероприятие (система действий), объединённое единым замыслом и направленное к достижению какой-то цели. Операция всегда является управляемым мероприятием, то есть зависит от человека, каким будет выбор определенных решений.

Кроме обоснования самих решений, исследование операций позволяет сравнить возможные варианты (альтернативы) организации операции, оценить возможное влияние на результат отдельных факторов, выявить «узкие места», то есть те элементы системы, нарушение работы которых может особенно сильно сказаться на успехе операции и т. д.

Из определения исследования операций следует, что область их применения столь же широка, как человеческая деятельность. Поэтому не удивительно, что их использование является неотъемлемой частью для таких областей, как экономика, производство, техническая политика предприятий. Благодаря методам исследования операций можно решать такие задачи, как выбор оптимального оборудования для энергетической системы, на основании сравнения и анализа всех альтернативных вариантов изучить влияние замены одного технического устройства на всю систему в целом, а также рассчитать экономические выгоды при использовании различных электро-технологических установок либо при их замене, модернизации.

Технические резервы повышения эффективности эксплуатации электрооборудования разнообразны по своему содержанию, но все они связаны с улучшением надежности, КПД и другими эксплуатационными свойствами электрооборудования. Технологические резервы относятся обычно к основному производству и связаны с разработкой и внедрением новых производственных машин и технологий, обеспечивающих большую степень использования и равномерную загрузку электрооборудования, улучшающих условия эксплуатации и снижающих энергоёмкость производства продукции. Именно к технологическим резервам относят авторы свои предложения.

Для решения ряда задач анализа и планирования производственных процессов авторами предложена модель электрооборудования в виде его производительной функции. Она представляет собой уравнение многофакторной регрессии, описывающее зависимость результата производства от затрат ресурсов. При описании результатов использования электрооборудования с помощью производительной функции эта подсистема рассматривается как «черный ящик», на вход которого поступают ресурсы R_1, R_2, \dots, R_n , а на выходе получается результат в виде готовых объемов производства различных видов продукции X_1, X_2, \dots, X_n . В качестве ресурсов электрооборудования рассматриваются установленная мощность электрооборудования P_n и потребляемая из сети активная электроэнергия W_p , а в качестве результата - валовый выпуск X продукции, полученной при эксплуатации электрооборудования. Таким образом, процесс потребления и преобразования электроэнергии в электроприборе или электротехнологической установке замещается своей моделью в форме нелинейных производительной функции $X = F(P_n, P)$, то есть выпуск есть функция от затрат ресурсов. Оптимизация возможна в том случае, если факторы, влияющие на производственную функцию, могут быть взаимозаменяемыми в некотором диапазоне.

Мультипликативная форма записи производительной функции электрооборудования:

$$X = AP_{\text{уст}}^{\alpha_1} W_n^{\alpha_2}, \quad (9)$$

где A – коэффициент нейтрального технологического прогресса; α_1 и α_2 – коэффициенты эластичности по установленной мощности и потребленной энергии, $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 > 0$.

Применительно к электротехнологическим производственным процессам производительная функция позволяет судить о возможном росте выпуска продукции, увеличении эффективности технологического процесса при заданных установленных мощностях и известном потреблении энергии.

Обобщенный показатель эффективности есть взвешенное среднее геометрическое частных показателей эффективности: фондоотдачи и производительности потребленной электроэнергии:

$$E = \left(\frac{X}{P_H} \right)^{\alpha} \left(\frac{X}{W_{\Pi}} \right)^{1-\alpha}. \quad (10)$$

Здесь роль весов выполняют относительные эластичности

$$\alpha = \frac{\alpha_1}{\alpha_1 + \alpha_2}; \quad 1 - \alpha = \frac{\alpha_2}{\alpha_1 + \alpha_2}.$$

То есть частные эффективности участвуют в образовании обобщенной эффективности с такими же приоритетами, с какими входят в производительную функцию соответствующие ресурсы.

При применении производительной функции встает вопрос об интерпретации переменных и наполнении модели исходными данными. Мультипликативная производительная функция определяется по временному ряду выпусков и затрат ресурсов $(X_t, P_{Ht}, W_{\Pi t})$, $t = 1, \dots, T$, где T – длина временного ряда, при этом предполагается, что имеет место T соотношений:

$$X_t = \delta_t A P_{Ht}^{\alpha_1} \cdot W_{\Pi t}^{\alpha_2},$$

где δ_t – корректировочный коэффициент, который приводит в соответствие фактический и расчетный выпуск и отражает флюктуацию результата под воздействием других факторов.

В логарифмах эта функция линейна,

$$\ln X_t = \ln A + \alpha_1 \cdot \ln P_{Ht} + \alpha_2 \cdot \ln W_{\Pi t} + \varepsilon_t, \quad (11)$$

где $\varepsilon_t = \ln \delta_t$, $M\varepsilon_t = 0$.

Получаем модель линейной множественной регрессии. Параметры функции A , α_1 , α_2 могут быть определены по методу наименьших квадратов с помощью стандартных пакетов прикладных программ, содержащих метод множественной регрессии.

Математические модели, применяемые в настоящее время в задачах исследования операций, подразделяются на аналитические и статистические. В аналитических моделях при принятых упрощениях и допущениях составляются те или иные аналитические зависимости между переменными решаемой задачи. С помощью аналитических моделей удастся с удовлетворительной точностью описать лишь сравнительно простые операции, где число переменных не слишком велико. В статистических моделях сама операция как бы «копируется» на вычислительной машине со всеми случайными изменениями. Статистические модели позволяют учесть большее число факторов, нежели аналитические, и не требуют грубых упрощений и допущений. Однако результаты такого анализа, естественно, труднее поддаются анализу и осмыслению.

Авторы полагают, что демонстрации бизнесу возможностей имеющихся технических решений наиболее перспективно использование совместно аналитической и статистической моделей для одной и той же задачи, так как аналитическая модель позволяет разобраться в

основных закономерностях явлений, а дальнейшее уточнение можно получить статистическим моделированием. Авторами накоплена большая библиотека дескриптивных и имитационных динамических моделей для изучения внутрисистемных статистических операций.

Внутрисистемный статистический анализ базируется на использовании статистических экспериментальных табличных данных. Каждая система характеризуется балансом. Бесперебойная работа электроприемников (электрооборудования) возможна только при балансе расчетов электропотребителей с энергосистемой и другими контрагентами за все затраты и работы.

Ответить на вопросы, каким должно быть потребление энергии из сети для обеспечения необходимого количества энергии для реализации технологического процесса и какие количества энергии, потребленной из сети на обеспечение заданной технологической переменной, «потребляются» другими технологическими потребителями, то есть каково распределение энергии на технологические переменные, сопутствующие данному процессу и взаимосвязанные с ним, позволяют результаты анализа балансовой модели [11].

Сущность балансовой модели можно определить как определение итоговых затрат энергии по заданному количеству энергии на обеспечение технологического процесса на основе данных о технологических возможностях, отраженных в коэффициентах прямых функциональных затрат. Разумеется, по этим же зависимостям может быть решена и обратная задача. В основе балансовой модели лежит матрица, представляющая (обычно в стоимостной форме) все связи между блоками оборудования, производственными подсистемами.

Энергетические связи между выбранными переменными состояниями, результатами технологического процесса и окружающей систему электрооборудования средой в производственном процессе и при распределении энергии или результатов технологического процесса представляются в энергетическом выражении с помощью таблицы энергетического баланса (ТЭБ). Структура таблицы, приведенной на рис. 7, отражает все показатели энергетических взаимосвязей в производственном процессе и при распределении энергии или результатов технологического процесса за единичный производственный цикл.

Технологические процессы (переменные состояния)		Переменные расплачивающиеся за электроэнергию									Конечное использование энергии, Y _i	Потребленное значение энергии, X	
		сеть	система управления				электродвигатель						
			задающее устройство	управляю- щее устройст- во	преобразо- ватель	датчики обратной связи	ротор двигател- я	ЭМП	передаточ- ное устройст- во	рабочий механизм			
переменные, потребляющие энергию	сеть	a11	a12	a13	a14	a15	a16	a17	a18	a19	Y1	X1	
	система управления	задающее устройство	a21	a22	a23	a24	a25	a26	a27	a28	a29	Y2	X2
		управляющее устройство	a31	a32	a33	a34	a35	a36	a37	a38	a39	Y3	X3
		преобразователь	a41	a42	a43	a44	a45	a46	a47	a48	a49	Y4	X4
		дос	a51	a52	a53	a54	a55	a56	a57	a58	a59	Y5	X5
		электродвигатель	ротор двигателя	a61	a62	a63	a64	a65	a66	a67	a68	a69	Y6
	ЭМП		a71	a72	a73	a74	a75	a76	a77	a78	a79	Y7	X7
	передаточное устройство	передаточное устройство	a81	a82	a83	a84	a85	a86	a87	a88	a89	Y8	X8
		рабочий механизм	a91	a92	a93	a94	a95	a96	a97	a98	a99	Y9	X9
Компенсация за обслуживание электрооборудования, L		L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9			
Компенсация капиталовложений в инфраструктуру, A		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9			
Энергия в результирующем продукте, O		O1	O2	O3	O4	O5	O6	O7	O8	O9			
Сумма калькуляций для субагентов, X'		X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9			

Рис. 6. Таблица энергетического баланса производственной технологической установки с электроприводом

Выводы

1. Применение в частотно-регулируемом приводе преобразователя частоты на основе автономного инвертора тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока позволяет снизить затраты промышленных предприятий благодаря компенсации реактивной мощности в узле нагрузки. Реализована схема активного компенсационного выпрямителя, в которой искусственная коммутация вентиляей осуществляется посредством использования свойств полностью управляемых полупроводниковых приборов.

2. В реальных условиях применения бестрансформаторных схем выпрямителей с напряжением питающей сети 380 В обмотки двигателя на выходе инвертора тока предлагается соединять в «треугольник». При этом избыточное напряжение будет затрачиваться на дополнительную генерацию реактивной мощности, которая увеличится в 1,66 раза и будет иметь постоянную составляющую, практически независимую от технологической загрузки двигателя. При этом увеличение номинального тока компенсационного выпрямителя во столько же раз увеличивает диапазон компенсируемой реактивной мощности.

3. Рассмотрена возможность регулирования генерируемой реактивной мощности независимо от технологической нагрузки электропривода. Для решения данной комплексной задачи предложены способы оптимального управления активным компенсационным выпрямителем с отдельным управлением группами вентиляей, а также оптимизации соотношения угла управления компенсационным выпрямителем и степенью широтно-импульсного регулирования выходных переменных автономного инвертора тока.

4. Для решения ряда задач анализа и планирования производственных процессов авторами предложена модель электрооборудования в виде его производительной функции. Применение балансовой модели позволяет осуществить оценку величины итоговых затрат на обеспечение технологического процесса по заданному количеству энергии, на основе данных о технологических возможностях, отраженных в коэффициентах прямых функциональных затрат, свойственных рассматриваемой технологии потребления электроэнергии.

Библиографический список

1. **Титов, В.Г.** Анализ использования синхронных двигателей в качестве компенсаторов реактивной мощности / В.Г. Титов, А.С. Плехов // Электрооборудование промышленных установок: труды Нижегородского государственного технического университета / НГТУ. – Нижний Новгород, 2005. С. 111–113.
2. **Охотников, М.Н.** Оптимизация электропотребления посредством управления возбуждением группы синхронных двигателей / А.С. Плехов, В.Г. Титов, М.Н. Охотников // V Международная (XVI Всероссийская) конференция по автоматизированному электроприводу АЭП-2007. – СПб., 2007. С. 47–51.
3. Электрооборудование грузоподъемных кранов: учеб. пособие / Е.М. Певзнер [и др.]; под ред. Г.Б. Онищенко. – М.: Россельхозакадемия, 2009. – 360 с.
4. **Плехов, А.С.** Средства компенсации реактивной мощности общепромышленных систем электроэнергетики / А.С. Плехов, А.И. Зайцев // Электротехнические комплексы и системы управления. 2008. № 3. С. 36–38.
5. **Плехов, А.С.** Техничко-экономические показатели применения энергосберегающих компенсационных выпрямителей для питания регулируемых электроприводов / А.И. Зайцев, А.С. Плехов // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2009. №4(16). С. 19–25.
6. **Титов, В.Г.** Комплексный подход к электропотреблению мощных электроприводов / А.С. Плехов, В.Г. Титов // Приводная техника. 2010. № 2. С. 10–16.
7. **Плехов, А.С.** Возможности применения компенсационных преобразователей в звене постоянного тока электроприводов на основе автономного инвертора тока / А.И. Зайцев, А.С. Плехов, В.Г. Титов // Изв. ТулГУ. Сер. Технические науки. Вып. 3: в 5 ч. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2010. Ч. 4. С. 23–35.

8. **Мелешин, В.И.** Транзисторная преобразовательная техника / В.И. Мелешин. – М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
9. **Плехов, А.С.** Силовая промышленная электроника: учеб. пособие / А.И. Зайцев, А.С. Плехов. – Воронеж: Научная книга, 2008. – 252 с.
10. Пат. Полупроводниковый компенсатор реактивной мощности / Зайцев А.И., Плехов А.С. № 78018; 2008, Бюл. № 31.
11. **Плехов, А.С.** Линейная модель энергетического баланса системы электрооборудования // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2007. С. 50–53.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

A.S. Plehov, M.N. Ohotnikov, V.G. Titov

TECHNOLOGY ECONOMY OF ELECTRIC POWER IN THE ELECTRIC DRIVE

On examples of use of the compensatory rectifier in a direct current link it is frequency the operated electric drive complex technical decisions for the industry and housing and communal services enterprises are discussed. For demonstration and an estimation of predicted results of innovations in the specified subject domain the information approach on the basis of descriptive modeling of processes of the manufacture using offered power economy up systems of an electric equipment is offered.

Key words: frequency the operated electric drive, a direct current link, the reactive power, indemnification of the reactive power, the compensatory rectifier, separate management of groups of gates, the independent inverter of a current, pulse-width management, productive function of an electric equipment, balance model of an electric equipment.

УДК 621.314.2.38

Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ
НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО КАСКАДНОГО ИНВЕРТОРА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен принцип построения компенсатора реактивной мощности и мощности искажений на базе многоуровневого каскадного инвертора с зонной ШИМ. Представлена имитационная модель в синхронных dq -координатах и результаты имитационного моделирования в программном комплексе Matlab/Simulink.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, СТАТКОМ, многозонная ШИМ, реактивная мощность, мощность искажений, активный фильтр.

С развитием производства все острее встает вопрос энергоэффективности. Задачи максимальной экономии энергетических ресурсов и повышения качества промышленной продукции являются одними из наиболее актуальных как в нашей стране, так и за рубежом. Было реализовано много проектов, направленных на улучшение параметров качества электроэнергии в электрических сетях регионов России. Важнейший законопроект N 261-ФЗ «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» принят ГД ФС РФ 11 ноября 2009 года.

Проблема повышения качества электроэнергии приобретает особую актуальность вследствие непрерывного роста мощных несимметричных, нелинейных и быстроизменяющихся потребителей электроэнергии, существенно ухудшающих показатели качества электроэнергии. К таким потребителям относятся мощные электрометаллургические установки, тяговые подстанции, предприятия металлообработки и др. [1, 2].

Для преобразования трёхфазного напряжения в постоянное широко используются управляемые и неуправляемые вентильные преобразовательные установки, построенные по мостовым схемам с числом фаз выпрямления от 6 до 24. Основным недостатком управляемых тиристорных преобразователей является снижение коэффициента мощности системы, особенно при глубоком регулировании, обусловленное фазовым сдвигом тока относительно напряжения питающей сети и, следовательно, значительным потреблением реактивной мощности.

Второй недостаток выпрямителей проявляется при рассмотрении вопроса их электромагнитной совместимости с питающей сетью. Вентильные преобразователи в значительной степени искажают синусоидальную форму тока питающей сети, генерируя гармонические составляющие высших порядков, что, помимо снижения коэффициента мощности, отрицательно сказывается на оборудовании, подключенном к той же питающей сети, и требует применения фильтрующих устройств. Это приводит к дополнительным затратам на оборудование и при использовании пассивных фильтров гармоник к возможности возникновения нежелательных резонансных явлений.

Обычные меры для улучшения качества напряжения (усиление питающей сети, установка фильтрокомпенсирующих емкостно-индуктивных элементов) зачастую оказываются дорогостоящими и неэффективными, особенно в области высоких напряжений и больших мощностей. Появление мощных быстродействующих преобразователей напряжения с полностью управляемыми вентилями позволяет реализовать их в узлах с мощными, нелинейными и резкоизменяющимися нагрузками.

Мощность электротехнологических установок может достигать десятков и даже сотен МВА. При этом из-за невысокого значения их коэффициента мощности величина потребляемой реактивной мощности и мощности искажений составляет значительную долю. При нагрузке с управляемым выпрямителем, например, дуговая печь постоянного тока (ДППТ), эффективно использование многоуровневого корректора коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ при напряжении питающей сети 10 кВ.

Для компенсации неактивной составляющей мощности на стороне высокого напряжения предлагается использовать четырехуровневый ККМ с зонной ШИМ на высокой частоте (рис. 1). Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно по сравнению с другими типами из-за экономичного использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формы выходного напряжения инвертора, а также идентичного их построения – однофазных мостовых инверторов, что упрощает не только конструкцию, но и математический анализ данного типа компенсатора [3, 4].

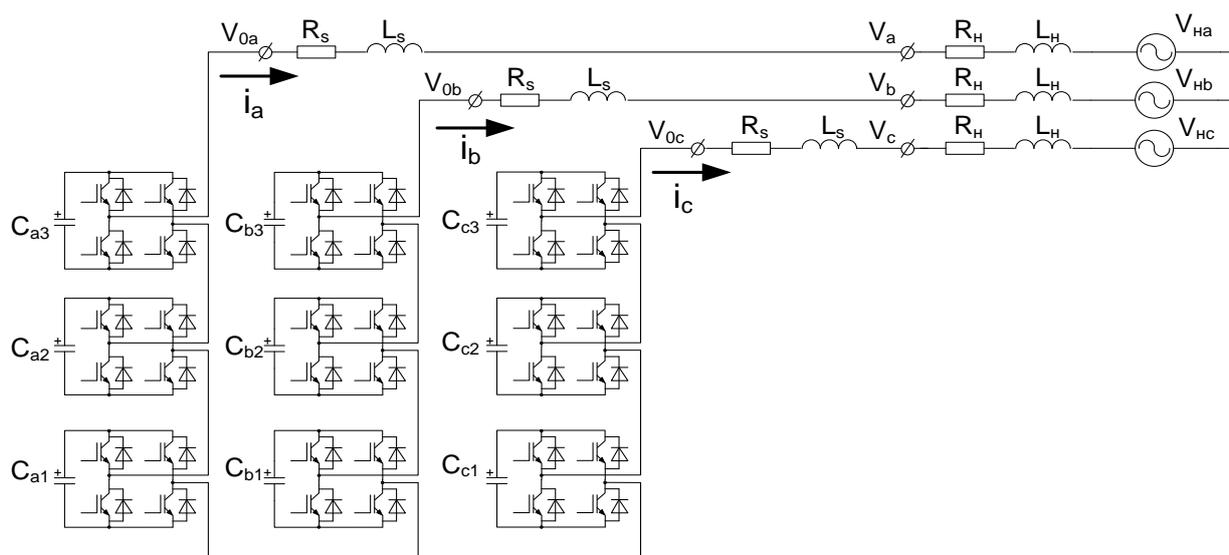


Рис. 1. Четырехуровневый компенсатор реактивной мощности и мощности искажений

Имитационная модель «сеть – ККМ – нагрузка», представленная на рис. 2, была реализована в пакете Matlab/Simulink [5]. В качестве модели источника сетевого напряжения и силовых модулей используются стандартные библиотечные блоки, корректно описывающие поведение реальных моделируемых узлов. Для задания параметров сетевого источника тока и ключевых элементов использованы *Three-phase sourc* и *Three-level bridge* соответственно из библиотеки *SimPowerSystems*. Источник переменного трехфазного напряжения учитывает индуктивное и активное сопротивление генератора (блок *Source*). В качестве нагрузки был взят управляемый мостовой выпрямитель (рис. 2) блок *Zn*.

Силовая часть модели ККМ состоит из девяти однофазных мостовых инверторов, по три в каждой фазе (*Sa1–Sa3*, *Sb1–Sb3*, *Sc1–Sc3*), рис. 3, а). Структурная схема системы управления ККМ – блок регулятора (*Control*) и блок ШИМ (*Faza*), представлены на рис. 3, б и рис. 3, в соответственно.

Блок расчета *Control* включает в себя преобразование Парка (прямое и обратное) и синхронизацию с сетью посредством ФАПЧ (PLL). ФАПЧ необходим для синхронизации dq-координат с сетью. Выходными данными блока являются синусная и косинусная функции, однозначно определяющие угол положения вектора трехфазного напряжения.

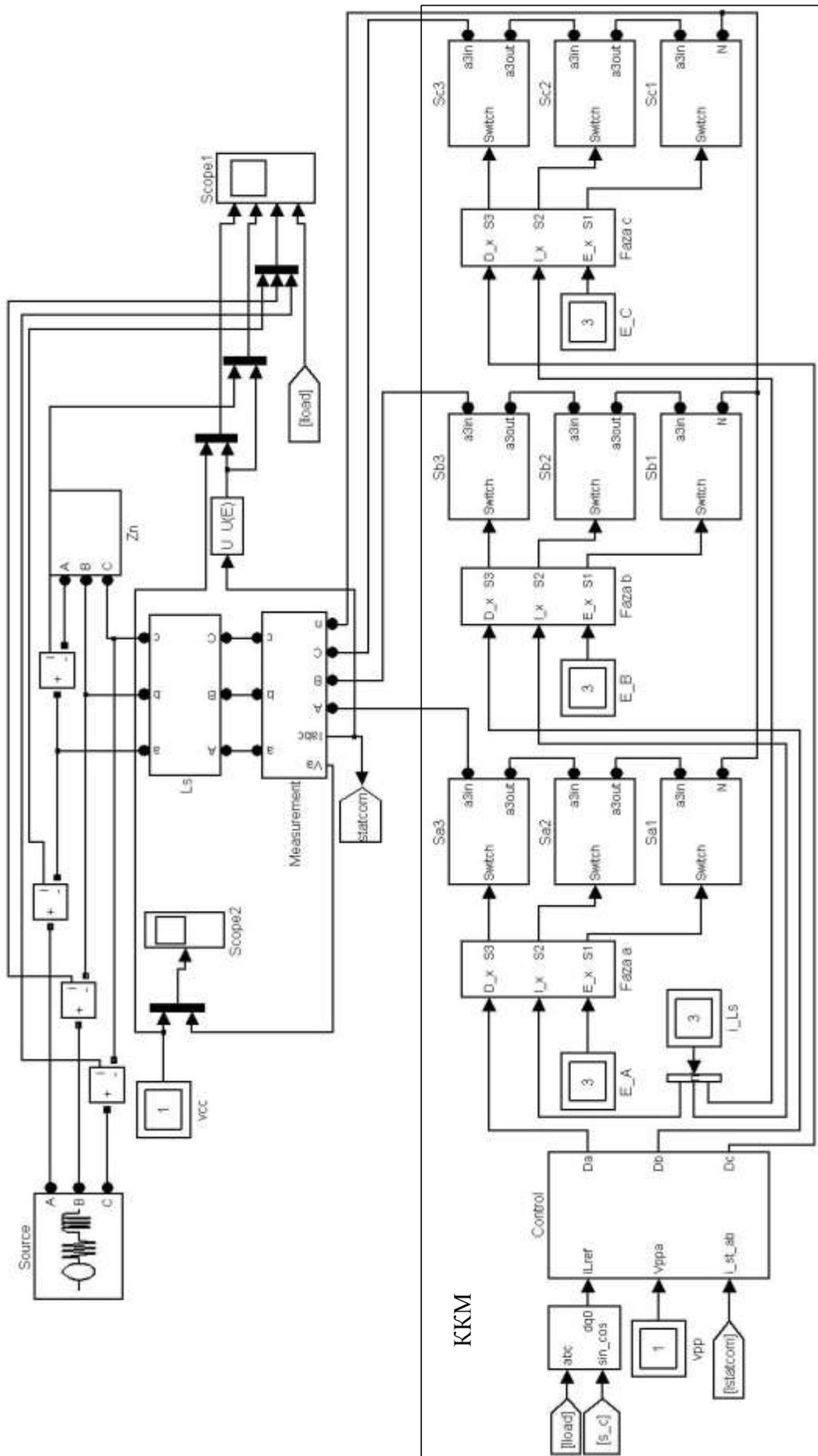


Рис. 2. Имитационная модель четырехуровневого корректора коэффициента мощности

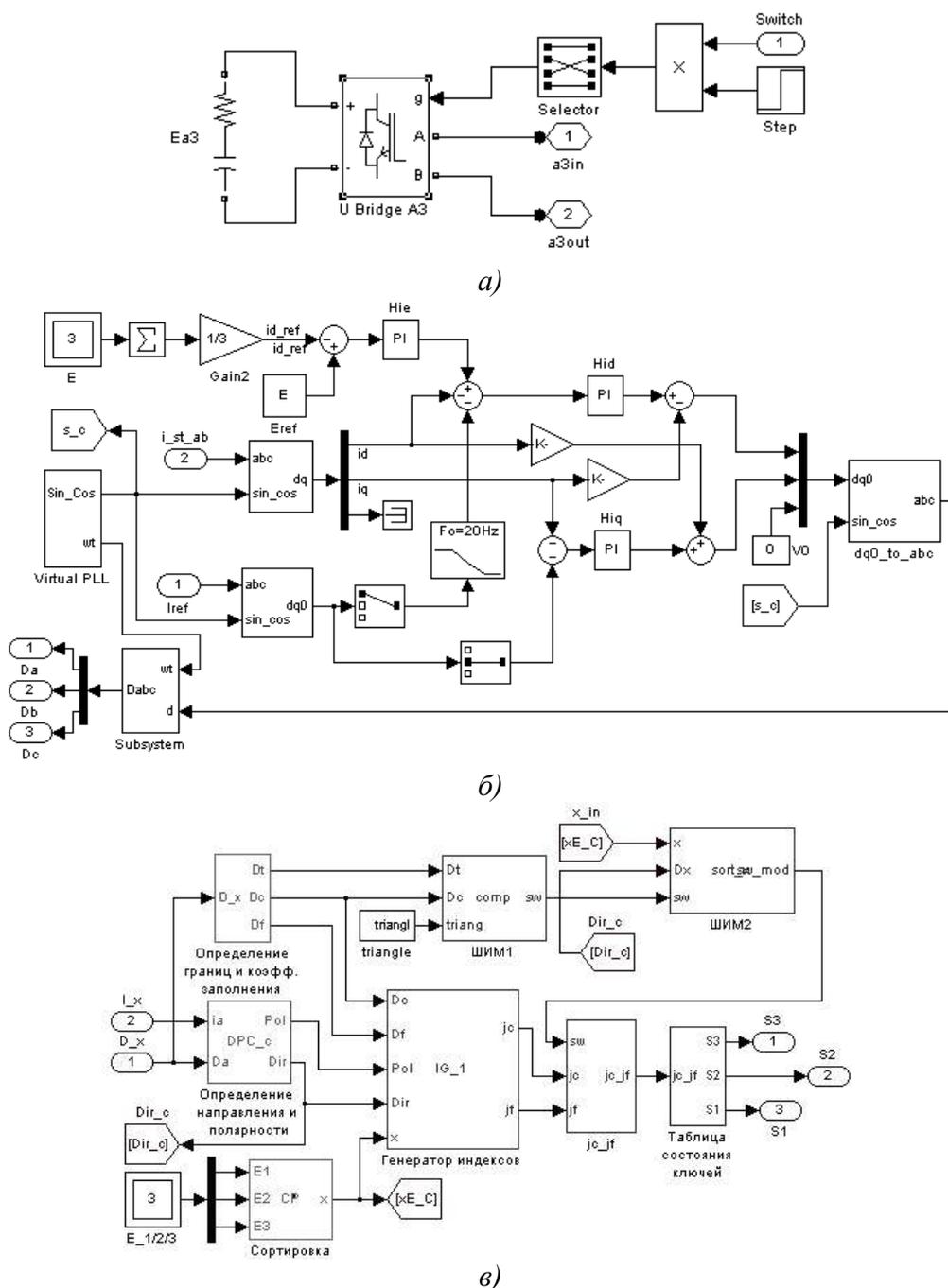


Рис. 3. Модели в Simulink:

а – мостовой инвертор; б – регулятор; в – блока ШИМ

Блок ШИМ определяет включенные полупроводниковые элементы. Алгоритм работы блоков «*Определение границ и коэффициента заполнения*», «*Определение направления и полярности*» и «*Сортировка*» реализованы на языке программирования С. «*Генератор индексов*» по текущим параметрам формирует выборку из «*Таблицы состояний включенных ключей*».

На имитационной модели были проведены исследования работы ККМ в полном диапазоне регулирования угла управления управляемого выпрямителя ДППТУ-12. На рис. 4 представлены графические зависимости высших гармонических составляющих сетевого тока без использования и с использованием ККМ при работе ДППТУ-12. Для сравнения на графиках добавлены теоретически полученные зависимости.

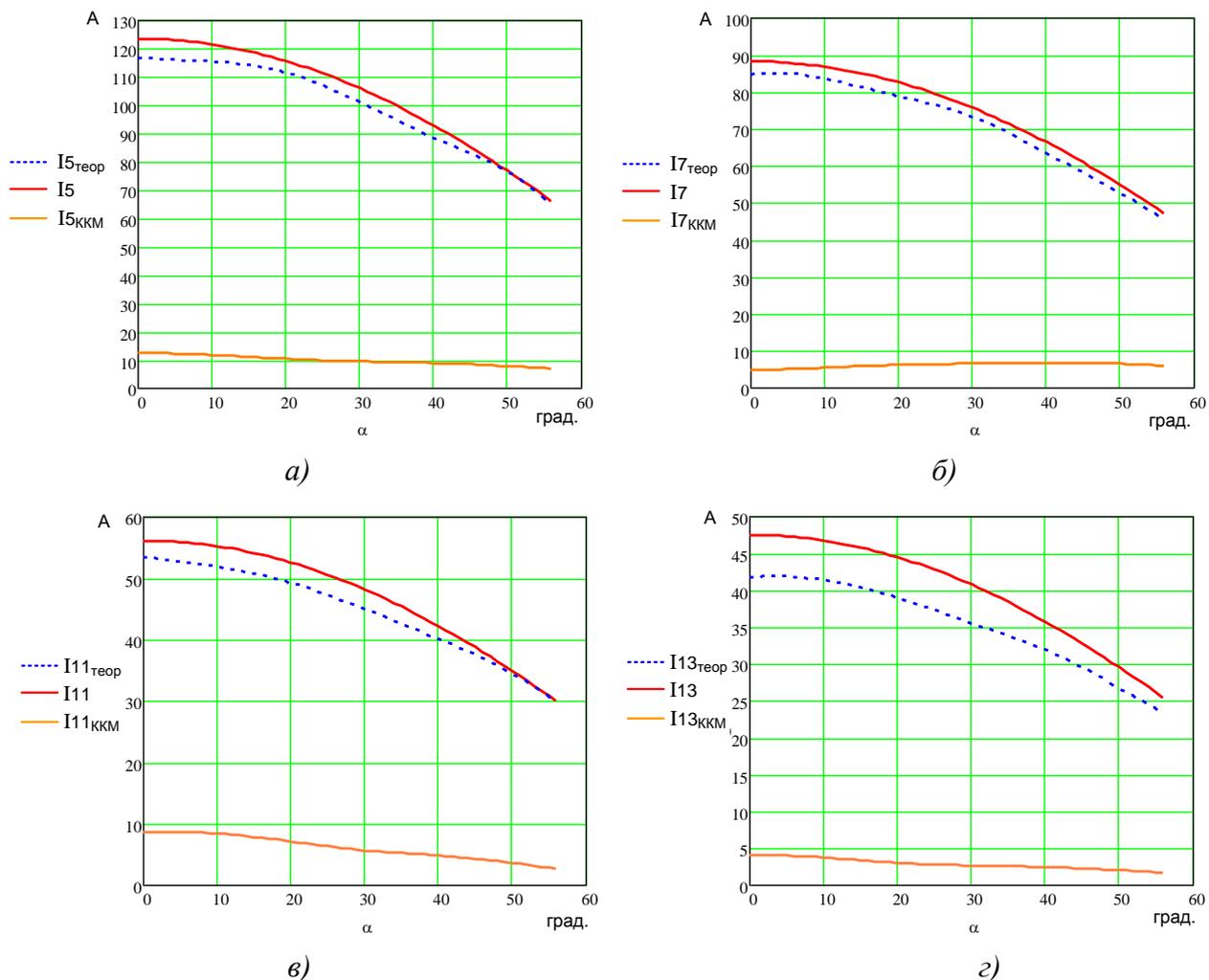


Рис. 4. Зависимости высших гармоник сетевого тока от угла управления:

а –пятая гармоника; *б* –седьмая гармоника; *в* –одиннадцатая гармоника; *г* –тринадцатая гармоника

Результаты моделирования показали, что при использовании ККМ сдвиг основной гармоники в сетевом токе практически равен нулю, рис. 5, *а*). Уменьшение угла сдвига и высших гармоник приводит к увеличению коэффициента мощности, рис. 5, *б*), и улучшению электромагнитной совместимости ДДПТУ-12.

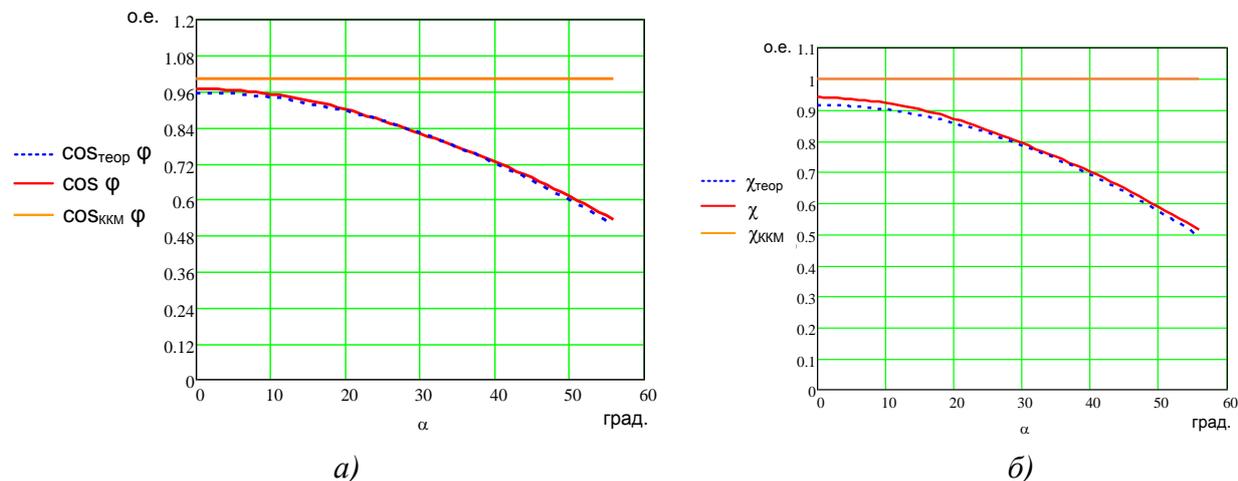


Рис. 5. Зависимости косинуса угла сдвига φ_1 первой гармоники тока сети (*а*) и коэффициента мощности от угла управления (*б*)

Выводы

1. Разработан алгоритм управления силовыми ключами. Данный алгоритм позволяет управлять N -уровневым инвертором с контролем потока мощности для регулирования заряда на накопительных конденсаторах.

2. Разработана система управления имитационной модели ККМ на базе трехуровневого инвертора в среде Matlab/Simulink, защищенная свидетельством о государственной регистрации для ЭВМ [6].

3. Сравнительный анализ высших гармоник, косинуса угла сдвига, коэффициента мощности, активной и реактивной мощностей на модели без использования ККМ и с его использованием дал результаты, подтверждающие данные теоретического расчета. Использование ККМ повышает косинус угла сдвига практически до 1, снижает содержание высших гармоник в сети в среднем в 10 раз, в результате чего улучшается ЭМС.

4. Эффективность использования ККМ подтверждается увеличением коэффициента мощности во всем диапазоне регулирования ДППТУ-12, особенно при глубоком регулировании.

Библиографический список

1. **Горюнов, И.Т.** Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалева, В.А. Богданов // Электрические станции. 2001. № 1. С. 32–37.
2. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской [и др.] // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 20–25.
4. **Алтунин, Б.Ю.** Корректор коэффициента мощности в высоковольтной распределительной электросети на базе многоуровневого каскадного преобразователя с ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, М.Н. Слепченко // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2008. №11(111). С. 77–79.
5. **Алтунин, Б.Ю.** Математическая модель компенсатора неактивной мощности на базе многоуровневого инвертора с зонной ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4. С. 219–225.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Имитационная модель корректора коэффициента мощности на базе многоуровневого инвертора / И.А. Карнавский № 2009613526 от 30.06.2009.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

B.U. Altunin, I.A. Karnavskiy

SYSTEM CONTROL MODEL OF COMPENSATOR REACTIVE AND DISTORTION POWERS BASED ON CASCADE MULTILEVEL INVERTER

This paper presents the principle of compensation for reactive power and power of distortions on the basis of the multilevel cascade inverter with band-PWM. Corrector is built on the base of multilevel cascade converter with the zonal PWM. Is represented mathematical model in the synchronous dq-coordinates and results of imitation model in the program Matlab/Simulink.

Key words: corrector of power coefficient, STATCOM, multilevel cascade inverter, reactive power, distortion power, active filter.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.74

Н.А. Кидалов, Н.А. Осипова, В.А. Закутаев, Ю.М. Ковязина

КОМПЛЕКСНАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ АДГЕЗИОННОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОМПОНЕНТОВ ФОРМОВОЧНЫХ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ С ПОВЕРХНОСТЬЮ МАТЕРИАЛА МОДЕЛЬНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ

Волгоградский государственный технический университет

Данная работа посвящена разработке комплексной методики, позволяющей оценивать адгезионное взаимодействие формовочных смесей с материалом модельно-технологической оснастки. Комплексная методика позволяет исследовать как взаимодействие компонентов формовочных смесей с материалом оснастки, так и количественно определить предел адгезионной прочности смеси к модели, а также изменение этих параметров при применении разделительных покрытий и различных составов смесей.

Ключевые слова: комплексная методика, адгезия, формовочные смеси, модельно-технологическая оснастка, предел адгезионной прочности.

Разовые песчано-глинистые формы получили наибольшее распространение при литье черных и цветных металлов. Качество получаемых отливок зависит также от отпечатка литейной формы. Для исследования рецептур смесей и разработки мер по борьбе с прилипаемостью смесей к оснастке необходимо определить величины адгезионного взаимодействия, а также учитывать процессы, протекающие в самой формовочной смеси. Для этого необходимы как общепринятые, так и специальные методы исследований, позволяющие прогнозировать возможность использования технологических добавок и вспомогательных материалов.

Первоначально исследуемые модельные материалы необходимо проверить на склонность к прилипаемости, оценивая их физико-химические характеристики: работу адгезии связующих материалов к материалу оснастки и поверхности кварца, и их поверхностные натяжения.

Исследование взаимодействия жидких связующих материалов с поверхностями модельно-технологической оснастки и кварцевыми зёрнами формовочной смеси является важной задачей, позволяющей объяснить возникновение и величину прилипаемости. Для этого необходимо определить краевой угол смачивания θ (рис. 1) при взаимодействии жидкости с твердой поверхностью и его поверхностное натяжение σ , а далее рассчитать работу адгезии связующего к материалу подложки.

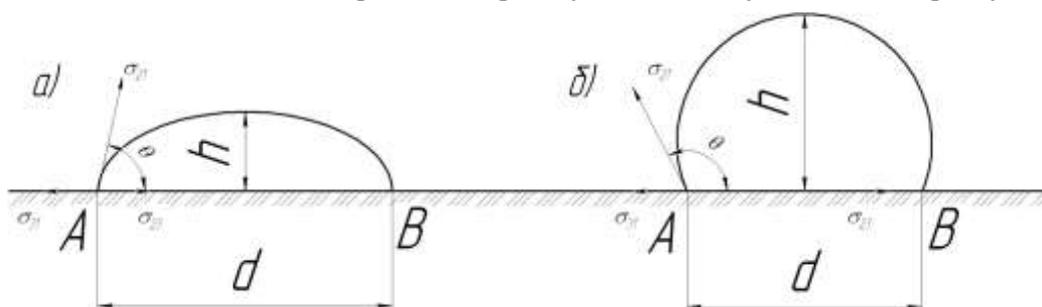


Рис. 1. Схема определения краевых углов при смачивании (а) и сухой (б) поверхности подложки

Расчет величины адгезии жидких компонентов смесей к поверхности оснастки определяется уравнением Дюпре-Юнга [1]:

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{21}(1 + \cos\theta), \quad (1)$$

где $A_{\text{адг}}$ - работа сил адгезии жидкости к твердой поверхности (мДж/м²); θ - краевой угол смачивания твердого тела жидкостью; $\cos\theta$ - смачиваемость; σ_{21} - поверхностное натяжение жидкой фазы на границе с газом (мДж/м²).

$$\cos\theta = \frac{r^2 - h^2}{r^2 + h^2}, \quad (2)$$

где $r = d/2$.

Геометрические параметры капель находили с помощью установки, схема которой приведена на рис. 2.

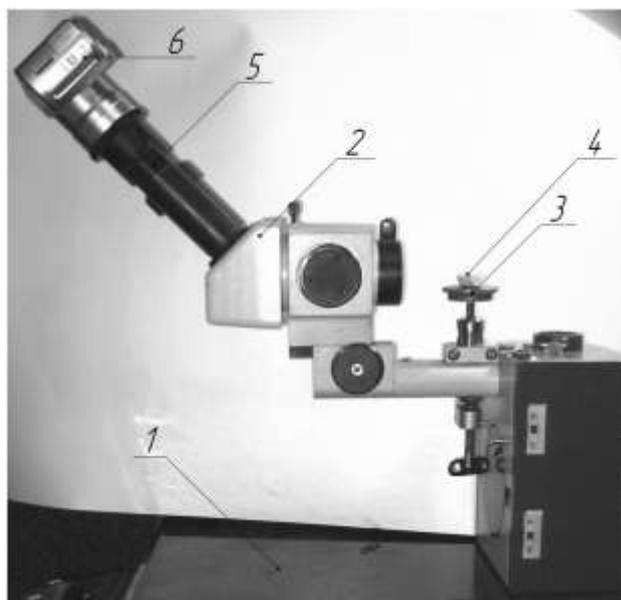


Рис. 2. Схема установки для определения краевых углов смачивания жидких материалов к твердой поверхности:

1 - стол; 2 - биологический микроскоп МБС-9; 3 - предметный столик (регулируемый по высоте); 4 - изучаемое твердое тело, на которое наносятся капли жидкости; 5 - переходник для подключения цифрового фотоаппарата; 6 - цифровой фотоаппарат Canon A62

Для определения краевых углов смачивания был модифицирован биологический микроскопа МБС-9, с помощью которого капли связующей жидкости, нанесенные на поверхность модельного материала, фотографировались при 70-кратном увеличении цифровым фотоаппаратом Canon Power Shot A620 (рис. 2). Для получения тождественных результатов необходимо наносить 3 капли жидкости, примерно одинаковых размеров (2-3 мм в диаметре) и обычно одинаковой массы. При исследовании смачивания измерения следует проводить сразу и через 15–30 с после нанесения жидкости на исследуемую подложку.

Методика проведения исследования: поверхность твердого тела перед измерением тщательно обезжиривают с помощью ваты, смоченной ацетоном; твердую подложку 4 устанавливают на регулируемый предметный столик 3 (рис. 2); наносят каплю исследуемой жидкости и для получения резкого изображения ее контуров используют регулировочный винт, расположенный на штанге микроскопа. Контрастность изображения зависит также и от освещения (целесообразно работать при небольшом накале осветителя); в заключение делается фотография капли на цифровой фотоаппарат 6, который соединен с микроскопом через специальный переходник 5.

Затем фотографии вносятся в компьютерную программу твердотельного моделирования, где замеряются размеры (диаметр d и высота h капли) и краевые углы капель жидкости на подложке. Абсолютных значений величин d и h не требуется, так как при расчете $\cos\theta$ используется отношение этих величин. Расчет адгезии проводили по формуле (1) (рис. 1).

Для исследования действия разделительных покрытий предварительно очищенную твердую подложку, состоящую из материала модели, покрывали исследуемым составом, а каплю связующего, входящего в состав исследуемой смеси, наносили сверху. Таким образом определялись краевые углы смачивания и работы адгезии связующим материалом разделительного покрытия.

Для определения величин поверхностных натяжений связующих материалов, а также жидких разделительных покрытий пользовались методом П.А. Ребиндера [2], основанного на принципе наибольшего давления пузырька.

Этой методикой можно определить меру смачивания поверхности кварца и модели жидким связующим, рассчитать удельную работу адгезии связующего материала к модельной оснастке (без покрытия и с нанесенным разделительным составом), а также выявить уровень адгезионного взаимодействия.

Таким образом, на первой стадии определяется физико-химическое взаимодействие компонентов формовочных смесей к поверхности модельно-технологической оснастки величиной работы адгезии. После этого исследуемые контактные пары необходимо исследовать с позиции определения адгезии между уплотненным составом смеси и модельной оснасткой. Для этого методика определения прилипаемости включает следующие этапы:

1. На разрывной машине РМ-50 с использованием специальной оснастки моделируется процесс взаимодействия с вертикальной стенкой модели 1 уплотненной формовочной смеси (рис. 3). При протяжке модели из уплотненного с помощью бойка 3 образца формовочной смеси, находящегося в испытательном цилиндре 2, определяется предел адгезионной прочности. Суть этого метода заключается в определении максимального сдвигового усилия, требуемого для разрушения адгезионного соединения адгезив – субстрат. Далее производят расчет предела прочности адгезионного контакта, зная площадь вертикальной поверхности контактирующей с материалом извлекаемой модели.

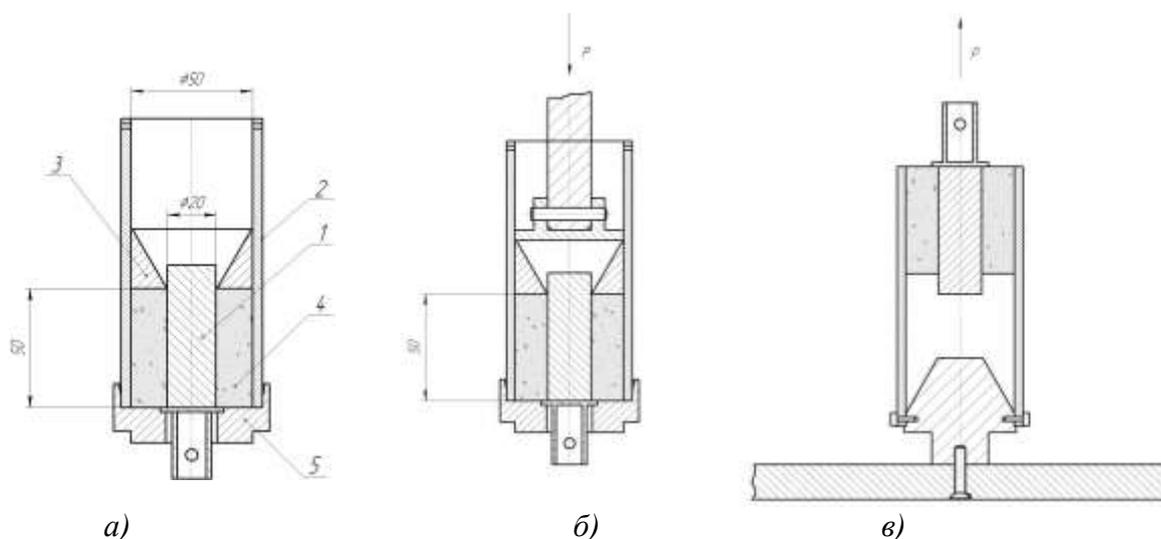


Рис. 3. Схема оснастки и последовательность проведения эксперимента, позволяющая определить предел прочности адгезионного контакта между вертикальной поверхностью модели и образца уплотненной формовочной смеси:

1 - модель с вертикальным участком; 2 - испытательный цилиндр; 3 - боек; 4 - образец из формовочной смеси; 5 – поддон;

а - сборка оснастки и засыпка навески формовочной смеси;

б - уплотнение формовочной смеси на копке с использованием бойка-переходника;

в - испытание закрепленной оснастки методом pull-out на разрывной машине РМ-50

Данный метод позволяет изменять материал модельно-технологической оснастки и составы формовочных смесей, а также оценивать эффективность применения разделительных покрытий. В химической физике при исследовании адгезии полимеров к волокнам используют похожую методику под названием «pull-out» [3].

2. На установке для определения физико-механических свойств смесей LRuTS, используя специальную оснастку (рис. 4), определяли усилия смещения заформованного в цилиндре образца, которые являлись мерой взаимодействия формовочной смеси с модельной оснасткой. Данный метод позволяет количественно оценить адгезию формовочной смеси к вертикальным стенкам модели, имеющей различную шероховатость поверхности.

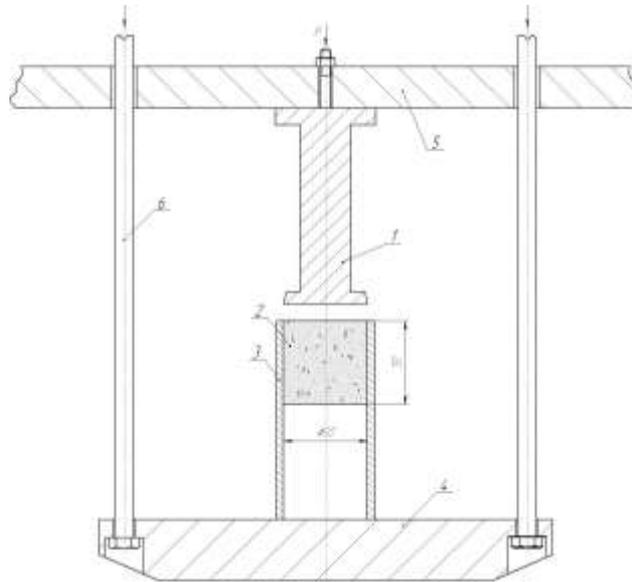


Рис. 4. Схема определения усилия извлечения стандартного цилиндрического образца из испытательного цилиндра:

1 - пуансон; 2 - стандартный цилиндрический образец из формовочной смеси; 3 - испытательная гильза; 4 - траверса противодавления, соединенная с индуктивным датчиком измерения нагружения; 5 - траверса нагружения; 6 - штоки, передающие усилие на индуктивный датчик растяжения

В начале эксперимента выбирается испытательный цилиндр d 50 мм, изготовленный из исследуемого модельного материала и имеющий заданную шероховатость внутренней рабочей поверхности. В зависимости от задачи исследований на эту поверхность наносится исследуемое разделительное покрытие, либо испытания проводятся без покрытия. Оно уплотняется тремя ударами копра, формируя стандартный цилиндрический образец из смеси. Готовый к испытанию образец с гильзой устанавливается на траверсу противодавления 4 и с помощью установки LRuTS производится перемещение траверсы нагружения 5 с закрепленным на ней пуансоном 1 до соприкосновения с поверхностью образца, находящегося в испытательной гильзе. Далее производится испытание, при котором траверса нагружения 5 медленно воздействует на образец 2 с помощью пуансона, а индуктивный датчик регистрирует усилие, передаваемое ему траверсой противодавления 4 и штоков 6. Полученные изменения индуктивности регистратор преобразует в предельную нагрузку, т.е. в силу, требуемую для преодоления адгезионного контакта (формовочная смесь – материал модели). Отношение данной силы к площади контакта характеризует предел прочности адгезионного контакта.

Когезионная прочность исследуемых смесей оценивалась пределом прочности на разрыв стандартного цилиндрического образца во влажном состоянии [4]. Для этого использовалась приставка к универсальному аппарату типа LRu для исследования прочностных свойств формовочных и стержневых масс. Данное устройство работает по

принципу рычага первого рода. Оборота рычага вокруг точки под влиянием силы, созданной плечом 3 универсального аппарата, ведет к растягиванию цилиндрической пробы, заформованной в разрезной втулке. Верхняя втулка имеет две цапфы в виде призм, служащих для ее подвески на рычаге устройства. Нижняя втулка 5 имеет также две цилиндрические призмы, определяющие ее положение в яме 6. На втором конце рычага 1 подвешен противовес 7. Кронштейн 8 рычага и ядро прикреплены к основанию 9. В основание вдавлены два штифта 10 с отверстиями, предназначенными для закладки клиньев 11. Нажим на рычаг устройства происходит через конус 12, закладываемый в плечо универсального аппарата. Между рычагом и основанием прикреплен амортизатор 13, заполненный амортизаторным маслом (рис. 5).

Определение прочности на разрыв во влажном состоянии ведется на стандартных образцах, выполненных из исследуемых смесей $d = 50$ мм и $h = 50$. Предел измерений от 0 до 0,033 МПа.

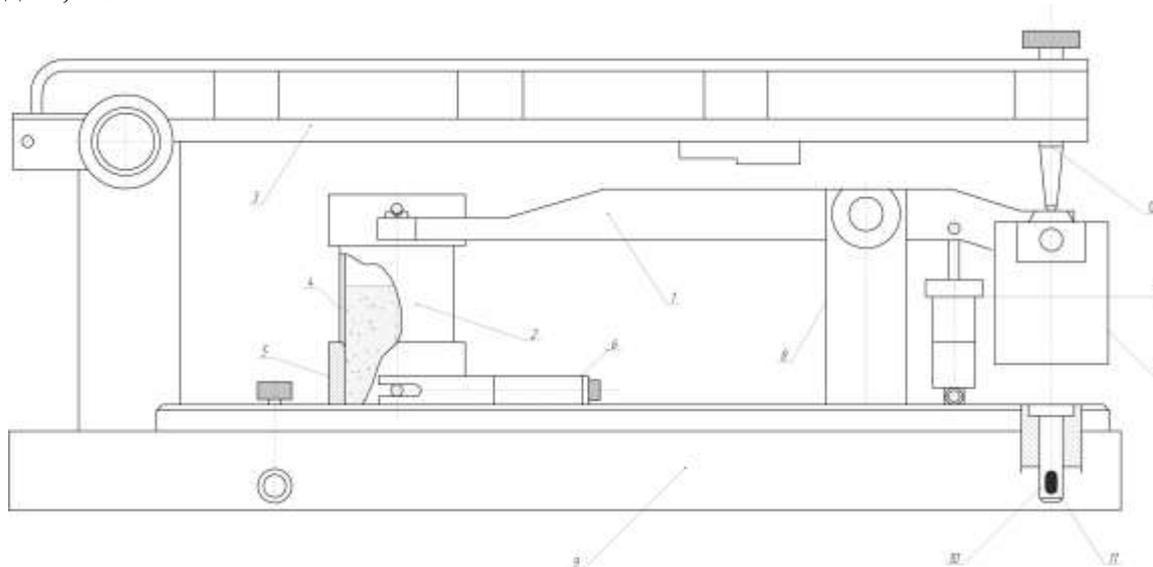


Рис. 5. Схема прибора для определения предела прочности на разрыв цилиндрических образцов во влажном состоянии:

1 - рычаг приставки; 2 - разъемный испытательный цилиндр; 4 - верхняя часть, 5 - нижняя часть; 3 - плечо универсального аппарата LRu; 6 - ядро; 7 - противовес; 8 - кронштейн; 9 - основание прибора LRu; 10 - штифт; 11 - клин; 12 - конус; 13 - масляный амортизатор

Данная методика позволяет оценивать предел когезионной прочности формовочных смесей во влажном состоянии, при этом возможно зарегистрировать изменение данной характеристики в зависимости от составов и свойств, применяемых формовочных материалов и смесей.

3. Физико-механические, гидравлические и технологические свойства формовочных смесей и связующих материалов определялись по стандартным методикам [5].

Данная комплексная методика, состоящая из перечисленных методов исследования, заключается в определении: способности материалов формовочной смеси и модельной оснастки к взаимодействию, сил прилипания к вертикальным поверхностям моделей и когезионной прочности. При этом в качестве моделей использовались «штыри» и «гильзы», выполненные из разных материалов и обработанные с различной шероховатостью поверхности.

Комплексная методика позволяет исследовать взаимодействие компонентов формовочных смесей с материалом оснастки, количественно определить предел адгезионной прочности смеси к модели, а также определить изменение этих параметров при применении разделительных покрытий и различных составов смесей.

Библиографический список

1. **Зимон, А. Д.** Коллоидная химия / А. Д. Зимон. – М.: АГАР, 2003. – 320 с.
2. **Малышева, Ж. Н.** Теоретическое и практическое руководство по дисциплине «Поверхностные явления и дисперсные системы»: учеб. пособие / Ж. Н. Малышева, И. А. Новаков // ВолГТУ. Волгоград. 2007. – 344 с.
3. **Горбаткина, Ю. А.** Адгезия полимеров к волокнам. Дальнейшее развитие метода pull-out / Ю.А. Горбаткина, В.Г. Иванова-Мумжиева // Клеи. Герметики. Технологии. 2009. №3. С. 28–30.
4. **Валисовский, И. В.** Технологические испытания формовочных материалов / И. В. Валисовский, Я. И. Медведев. – М.: Машгиз, 1963. – 213 с.
5. Технология литейного производства. Литье в песчаные формы / под ред. А. П. Трухова. – М.: Академия, 2005. – 352 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2010*

N.A. Kidalov, N.A. Osipova, V.A. Zakutaev, U.M. Kovyazina

**THE COMPLEX EVALUATION METHODOLOGY OF ADHESIVE INTERACTION
OF COMPONENT MOLDING SAND MIXTURE WITH THE SURFACE
OF THE MATERIAL OF MODELING-TECHNICAL SNAP**

This work is devoted to developing a complex methodology that allows to evaluate an adhesive interaction of molding mixtures with the material of modeling-technical snap. The complex methodology enables study the interaction of the molding mixture components with the material of snap, and to quantify determine the limit of adhesion strength of the mixture to a model, as well as to determine the change of these parameters when applying of the separation coatings and different compositions of the mixtures.

Key words: molding mixture, modeling-technical snap, adhesion, antisticking.

УДК 620.179.16

В.А. Ключников, В.В. Мишакин, Н.В. Данилова

**ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ СТАЛИ 08X18N10T
НА РАННИХ СТАДИЯХ УСТАЛОСТНОГО НАГРУЖЕНИЯ
С ПОМОЩЬЮ НЕРАЗРУШАЮЩИХ МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ**

Нижегородский филиал Института машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

Представлены результаты исследования акустическим и оптическим методами контроля стали 08X18N10T, подвергаемой усталостному разрушению. По результатам испытаний установлены корреляционные связи уровня поврежденности с акустическими характеристиками и параметрами микропластических деформаций, определяемыми оптическим методом. Предложены алгоритмы оценки поврежденности исследуемого материала на основании данных акустических и оптических измерений на ранних стадиях усталостного разрушения.

Ключевые слова: поврежденность, неразрушающий контроль, акустические параметры, оптический метод, характеристики микропластичности, многоцикловая и малоцикловая усталость.

Введение

Оценка состояния материалов без их разрушения непосредственно на конструкции, учитывая существенную выработку ресурса значительного количества отечественных предприятий машиностроительного комплекса, является актуальной задачей.

Среди методов НК, достаточно чувствительных к структурному состоянию и поврежденности, можно выделить относительно дешевый и безопасный акустический метод. Как правило, данный метод используют для выявления макродефектов (в том числе усталостных трещин) материалов конструкций различного назначения. Проведенные ранее исследования [1, 2] показали, что структурно-чувствительные акустические параметры позволяют обнаруживать деградацию структуры материала на ранних стадиях разрушения, задолго до образования макротрещины.

Другим методом, позволяющим непосредственно контролировать структурные изменения, является оптический, позволяющий измерять не только характеристики структуры, но и величину микропластических деформаций, которые играют важную роль в разрушении металлов и сплавов при статическом и усталостном разрушении [3, 4].

Следует отметить особенности усталостного разрушения. Область многоцикловой усталости (МнЦУ) в сравнении с областью малоцикловой усталости (МЦУ) характеризуется небольшими упругопластическими деформациями. Пластическое деформирование происходит только в некоторых областях материала, сравнимых с размерами зерен. Микропластические деформации в начале процесса разрушения, как и поврежденность, локализуются в так называемых «слабых» зонах [4]. Имеется закономерность локализации, заключающаяся в постоянстве и закреплении микроочагов повышенной и пониженной деформации, и соответственно в формировании микропор, микротрещин и других дефектов внутри «слабых» зон [4].

Область МЦУ характеризуется большими пластическими деформациями, накоплением односторонней деформации в случае мягкого режима нагружения, интенсивным накоплением микроповреждений во всем объеме материала, изменением кристаллографической текстуры. Изменение структурных характеристик приводит к изменению акустических параметров.

Целью работы было исследование влияния усталостного разрушения на акустические параметры и характеристики микропластичности коррозионно-стойкой стали аустенитного класса 08X18N10T и разработка алгоритма оценки поврежденности на основе акустических и оптических измерений.

В качестве основных акустических параметров для проведения исследований были выбраны скорости объемных упругих волн (УВ) (поперечные и продольные), а также соотношение этих скоростей или времени их распространения. Для элементов конструкций, имеющих односторонний доступ, целесообразно использовать параметры, выражающиеся через соотношение времени распространения, так как в этом случае не надо измерять длину акустического пути (толщину элемента). В качестве таких параметров можно выбрать коэффициенты Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} (измеренные вдоль и поперек направления проката соответственно), которые определяются выражениями:

$$\nu_{zx} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zx}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zx}^2)} = \frac{\tau_{zx}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zx}^2 - \tau_{zz}^2)}; \quad \nu_{zy} = \frac{V_{zz}^2 - 2V_{zy}^2}{2(V_{zz}^2 - V_{zy}^2)} = \frac{\tau_{zy}^2 - 2\tau_{zz}^2}{2(\tau_{zy}^2 - \tau_{zz}^2)}, \quad (1)$$

где V_{zi} и τ_{zi} – скорость и время распространения поперечных УВ, поляризованных вдоль ($i = x$) или поперек ($i = y$) оси симметрии ортотропного материала; V_{zz} и τ_{zz} – скорость и время распространения продольных УВ соответственно.

Учитывая, что разрыхление материала за счет образования микропор, микротрещин влияет на модуль объемного сжатия K и модуль сдвига μ [5, 6]:

$$K = K_0 + k_{1\psi}\psi, \quad \mu = \mu_0 + k_{2\psi}\psi, \quad (2)$$

где $k_{1\psi}$ и $k_{2\psi}$ – параметры; ψ – структурная поврежденность, связанная с разуплотнением материала: $\psi = (\rho_0 - \rho) / \rho_0$ (ρ_0 и ρ – плотности материала до и после образования микропор, микротрещин); K_0 и μ_0 – начальные значения модуля всестороннего сжатия и модуля сдвига соответственно, и также учитывая связь скоростей объемных УВ с коэффициентами функции распределения ориентировок (ФРО) [7] для ортотропного материала, можно записать:

$$V_{zx}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} - \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (3)$$

$$V_{zy}^2 = \mu(\psi) / \rho(\psi) - c(\psi) \frac{16}{35} \sqrt{2} \pi^2 \left(W_4^{00} + \sqrt{\frac{5}{2}} W_4^{20} \right) \frac{1}{\rho(\psi)}; \quad (4)$$

$$V_{zz}^2 = \left(K(\psi) + \frac{4\mu(\psi)}{3} \right) / \rho(\psi) + \frac{32}{35} \sqrt{2} \pi^2 W_4^{00} c(\psi) / \rho(\psi); \quad (5)$$

Здесь W_4^{20} , W_4^{00} коэффициенты ФРО; $c = c_{11} - c_{12} - 2c_{44}$, c_{ij} – упругие константы кубической кристаллической решетки поликристаллического материала.

Коэффициенты Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} с учетом уравнений (3)-(5) приобретают вид:

$$\nu_{zx} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi) / 3 + (32/35)\pi^2 c(\psi) (2\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20})}{2 \left[K(\psi) + \mu(\psi) / 3 + (16/35)\pi^2 c(\psi) (3\sqrt{2}W_4^{00} - \sqrt{5}W_4^{20}) \right]}; \quad (6)$$

$$\nu_{zy} = \frac{K(\psi) - 2\mu(\psi) / 3 + (32/35)\pi^2 c(\psi) (2\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20})}{2 \left[K(\psi) + \mu(\psi) / 3 + (16/35)\pi^2 c(\psi) (3\sqrt{2}W_4^{00} + \sqrt{5}W_4^{20}) \right]}$$

Другой параметр, величина которого определяется с помощью объемных УВ при одностороннем доступе к плоским элементам конструкции или близким к ним, – это параметр акустической анизотропии A [8]:

$$A_2 = (V_1^2 - V_2^2) / \sum V_i^2, \quad (7)$$

где k – коэффициент.

Параметр акустической анизотропии в первую очередь зависит от изменения кристаллографической текстуры, в гораздо меньшей степени – от изменения модулей упругости в результате накопления структурных повреждений в материале. Коэффициенты Пуассона зависят как от накопленной микроповрежденности, так и от текстуры материала.

Выражения (3)-(5) записаны для однофазных материалов или материалов с малым со-

держанием дополнительных фаз. Исследуемый материал имеет сложный химический и фазовый состав. Кроме того, при циклическом упругопластическом нагружении этой стали наблюдаются аллотропические изменения [9]. Они вносят дополнительный вклад в изменение акустических характеристик.

Можно указать основные процессы, влияющие на изменение акустических параметров стали 08X18H10T при усталостном разрушении (длинноволновое приближение):

- 1) накопление микрповреждений (вакансий, дислокаций, микропор, микротрещин);
- 2) формирование кристаллографической текстуры;
- 3) аллотропические изменения (мартенситное превращение $\gamma \rightarrow \epsilon$). Гамма железо (γ -железо) превращается в мартенсит ϵ (пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе).

Экспериментальная часть

Для проведения исследований использовались образцы круглого сечения из стали 08X18H10T (химический состав: С не более 0,08%, Si не более 0,8%, Mn не более 2%, Cr 17-19%, Ni 9-11%, Ti $5 \cdot C - 0,7$, S не более 0,02%, P не более 0,035%, Cu не более 0,3%, основа – железо), которая широко применяется в машиностроении при изготовлении сварной аппаратуры, работающей в средах повышенной агрессивности (растворах кислот, щелочей и солей), теплообменников, труб, деталей печной арматуры и других элементов. На образцах круглого сечения (с диаметром рабочей зоны 12 мм) в центре были вырезаны площадки 3×30 мм для установки пьезоэлектрических преобразователей (рис.1), каждая из которых была разбита на несколько зон.

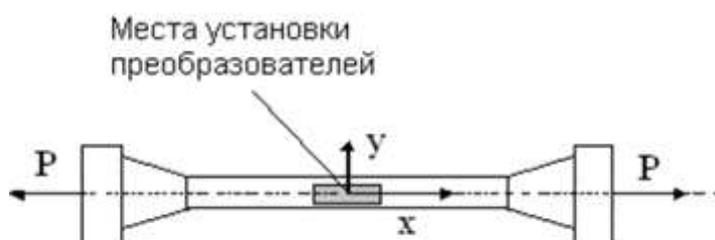


Рис.1. Схема нагружения образцов

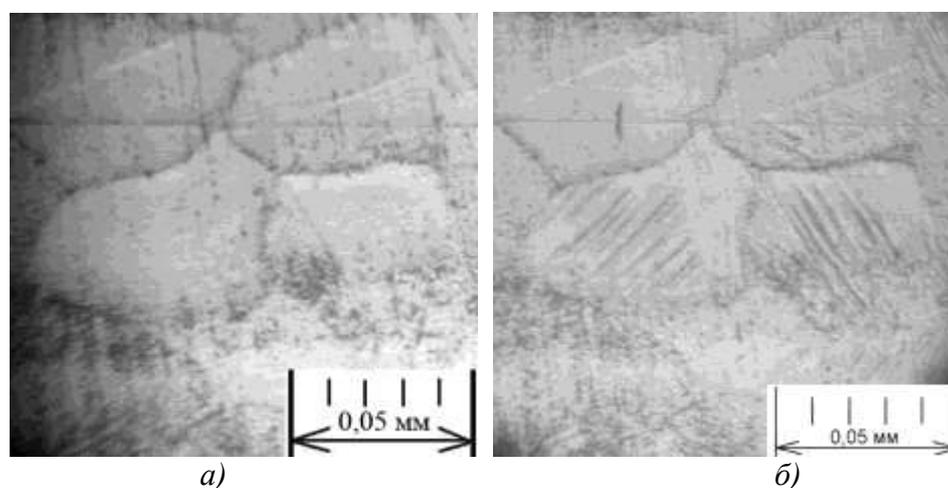
Шесть образцов подвергалась циклическому деформированию, при котором задавалась амплитуда деформации $\Delta \epsilon'$, включающая пластическую и упругую составляющие. Частота нагружения – около 3 Гц. Ещё один образец был исследован при статическом нагружении.

Для измерения акустических параметров использовалась переносная акустическая установка, состоящая из генератора зондирующих сигналов, высокочастотного усилителя, цифрового осциллографа PC SCOPE 1000VS и ПК. Используемый метод – эхоимпульсный. Центральная частота пьезоэлектрических преобразователей ~ 5 МГц. Диаметр преобразователей для возбуждения продольных и поперечных волн составлял 8 мм. Точность измерения времени распространения УВ – около 2-3 нс, точность измерения скорости – 5 м/с. Испытания проводились при комнатной температуре. Погрешность измерения коэффициента Пуассона с помощью акустических измерений составляет $7 \cdot 10^{-4}$, погрешность измерения величины акустической анизотропии $5 \cdot 10^{-4}$.

Микропластические деформации образцов определялись путем измерения расстояний между точками пересечения условной опорной линии с границами зерен материала (средний диаметр зерна материала $\bar{d} \approx 24$ мкм, наблюдалась высокая разнобалльность) до и после усталостного нагружения. Микропластические деформации E измерялись как вдоль (E_x), так и поперек (E_y) направления нагружения материала. Погрешность измерения микропластических деформаций составляла 0,15%.

Результаты и их обсуждение

В общем случае процесс усталости связан с постепенным накоплением и взаимодействием дефектов кристаллической решетки (вакансий, междоузельных атомов, дислокаций и дисклинаций, двойников, границ блоков и зерен и т.д.) и, как следствие этого, с развитием усталостных повреждений в виде образования и распространения микро- и макроскопических трещин. В процессе циклического нагружения происходит образование устойчивых полос скольжения, в которых, как правило, формируются микротрещины [10], и двойников, в вершинах и на границах которых происходит зарождение микротрещин [11].



**Рис. 2. Фотографии микрошлифа образца, испытанного при амплитуде деформации $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$:
а – до нагружения; б – после 1500 циклов нагружения (увеличение $200\times$)**

На рис. 2 приведены фотографии микрошлифа образца, испытанного при амплитуде деформации $\Delta\varepsilon' = 0,33\%$, до нагружения (рис. 2, а) и после количества циклов нагружения, равного 1500 (рис. 2, б), всего количество циклов до появления макротрещины 15000. На рис. 2, б можно отчетливо наблюдать полосы скольжения.

Связь упругопластической циклической деформации с изменением упругих свойств материала

В результате эксперимента были получены зависимости коэффициентов Пуассона ν_{zx} , ν_{zy} , величины акустической анизотропии A , измеренных с помощью акустических параметров, а также зависимости значений микропластических деформаций от количества циклов нагружения N .

На рис. 3, а, б представлены изменения коэффициентов Пуассона $\Delta\nu_{zx}$ и $\Delta\nu_{zy}$ соответственно, а на рис. 3, в, г – изменение параметра акустической анизотропии и абсолютное значение микропластических деформаций E_y , измеренных поперёк оси нагружения, в зависимости от накопленной пластической деформации $\varepsilon_{pl} = \sum_{i=1}^N \varepsilon_{pl}^i$, где N – количество циклов нагружения; ε_{pl}^i – амплитуда пластической деформации i -го цикла.

Из рис. 3 видно, что при наибольшей амплитуде деформации происходят наиболее интенсивные изменения, как параметра акустической анизотропии (рис. 3, в), так и коэффициентов Пуассона (рис. 3, а, б), что объясняется активным изменением кристаллографической текстуры при больших амплитудах упругопластической деформации. При максимальной амплитуде деформации ($\Delta\varepsilon' = 0,77\%$) наблюдается минимальное изменение коэффициен-

та Пуассона $\Delta\nu_{zx}$, (рис. 3, а). По-видимому, это связано с тем, что в данном случае влияние текстуры на коэффициент Пуассона компенсируется изменением поврежденности. Абсолютное значение микропластических деформаций, измеренных поперёк оси нагружения, при исчерпании ресурса материала выходит на некоторое постоянное значение для всех образцов, испытанных на усталость.

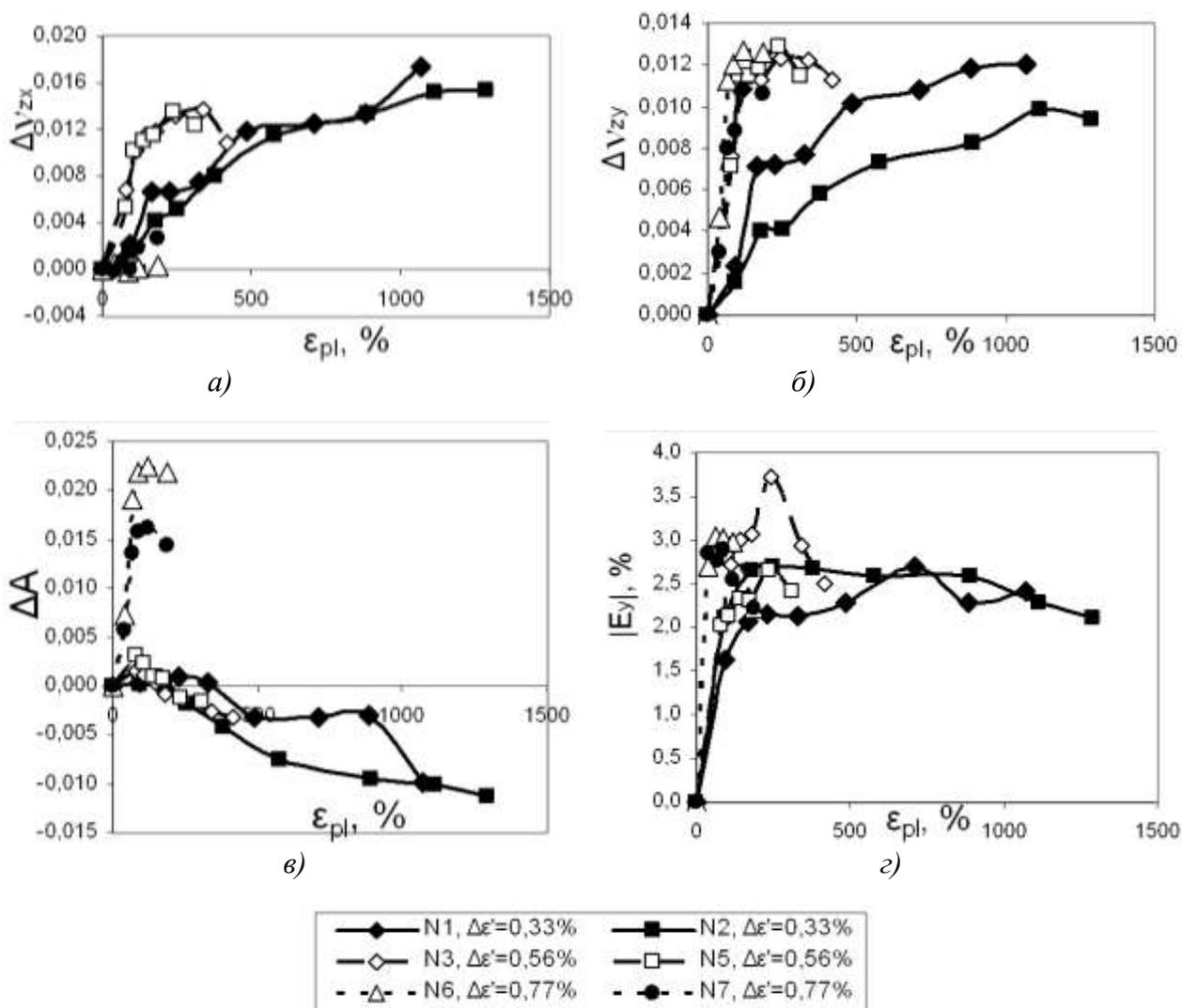


Рис. 3. Зависимости от величины накопленной пластической деформации:
 а – изменение коэффициента Пуассона $\Delta\nu_{zx}$; б – изменение коэффициента Пуассона $\Delta\nu_{zy}$;
 в – изменение параметра акустической анизотропии; г – абсолютное значение микропластической деформации, измеренной поперёк оси нагружения

Определение состояния материала по данным акустических измерений

На рис. 4 приведены зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона ν_{zx} и ν_{zy} , полученные с помощью акустического метода для образцов, подвергнутых циклическому нагружению.

Как видно из рис. 4, связь $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$, хорошо аппроксимируется линейной зависимостью. Угол наклона кривой $\Delta\nu_{zx}(\Delta\nu_{zy})$ определяется амплитудой деформации $\Delta\epsilon'$. Для максимальной амплитуды он минимален.

Эксперимент показал, что длина L кривой $\nu_{zx}(\nu_{zy})$ в момент появления макротрещины остается приблизительно постоянной для разных амплитуд циклической деформации. По мере исчерпания ресурса материала длина кривой растет, достигая критического значения L^* .

Кривую $v_{zx}(v_{zy})$ предлагается использовать для оценки степени деградации материала акустическим методом на ранних стадиях разрушения до появления макротрещины. Введем параметр Π для оценки состояния материала, который определяется как

$$\Pi = \frac{\bar{L}_0}{\bar{L}^* + f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})},$$

где \bar{L}_0 – средняя длина кривой $v_{zx}(v_{zy})$, в момент появления макротрещины $L = (\Delta v_{zx}^2 + \Delta v_{zy}^2)^2$; \bar{L}^* – среднее значение длины кривой для критических величин Δv_{zx}^* и Δv_{zy}^* , $\bar{L}^* = 0,016$; $f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})$ – некоторая корректирующая длину кривой функция, которая зависит от угла наклона кривой, характеризуемого соотношением $(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})$:

$$f(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}) = k_0 + k_1(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}) + k_2(\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy})^2,$$

k_0, k_1, k_2 – коэффициенты (в ходе эксперимента были получены следующие значения коэффициентов $k_0 = -0,0045$; $k_1 = 0,0047$, $k_2 = 0,0002$).

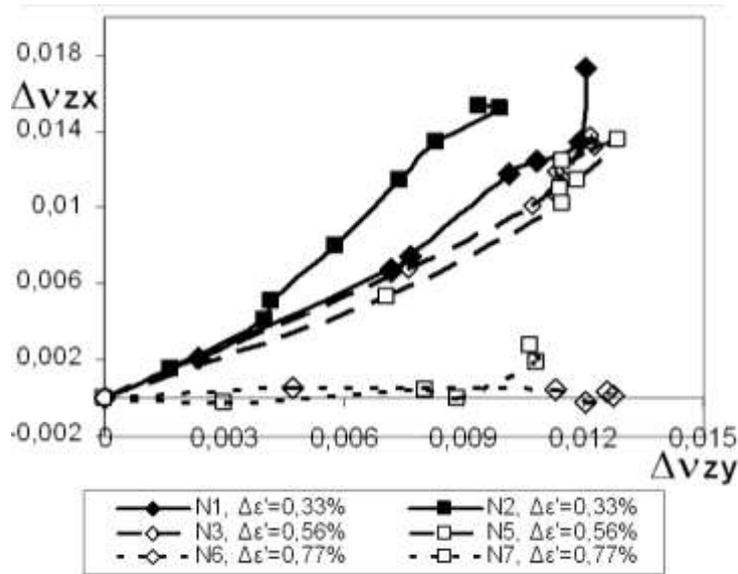


Рис. 4. Зависимости между изменениями коэффициентов Пуассона v_{zx} и v_{zy}

Зависимости параметра Π от количества циклов нагружения для образцов, испытанных при различных амплитудах деформации $\Delta \epsilon'$, приведены на рис. 5.

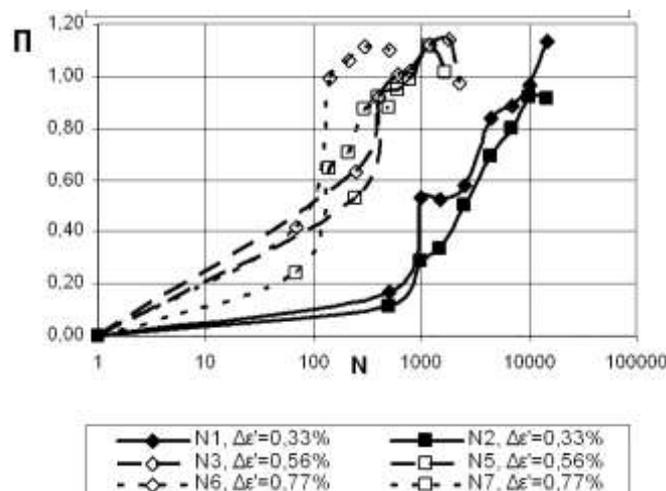


Рис. 5. Параметр Π в зависимости от количества циклов нагружения

Момент достижения значения параметра Π , близкого к единице, характеризуется появлением макродефекта.

Оценка поврежденности с помощью оптического и акустического методов

Особенностью разрушения при упругопластическом циклическом деформировании является то, что накопление микрповреждений происходит в областях материала с повышенной микропластической деформацией [4]. Плотность участков S , в которых происходит локализация микропластических деформаций, будем определять как отношение количества микроочагов (зерен) с повышенной деформацией (абсолютные значения деформации E зерна выше 0,3%) к общему количеству наблюдаемых зон N_z , $S = \frac{n}{N_z}$.

Следует отметить, что величина S зависит не только от степени повреждения материала, но и точности измерения микропластических деформаций. При достаточной точности измерения микропластических деформаций и устойчивой регистрации этих изменений, S можно использовать для оценки ресурса материала. Отношение $\Delta v_{zy}/S$ показывает интенсивность структурных изменений в “слабых зонах”, то есть в микрizonaх, подверженных накоплению микрповреждений. Отношение изменения коэффициента Пуассона Δv_{zy} к параметру S в зависимости от количества циклов для образцов, подвергнутых циклическому нагружению, приведено на рис. 6.



Рис. 6. Отношение изменения коэффициента Пуассона к параметру S в зависимости от количества циклов нагружения

Как видно из рис. 6, при снижении амплитуды деформации до 0,33%, количество циклов нагружения до появления макротрещины увеличивается до 10^4 и более циклов, то есть происходит переход из области малоциклового усталости (МЦУ) в область многоциклового усталости (МнЦУ). Экспериментальные исследования показали, что измерение отношения продольного и поперечного коэффициентов Пуассона $\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}$ и среднего абсолютного значения микропластических деформаций $\overline{E_x}$ позволяет определить, в какой области материал подвергался нагружению. На рис. 7 дана связь отношения $\Delta v_{zx}/\Delta v_{zy}$ и среднего абсолютного значения микропластических деформаций $\overline{E_x}$.

Как видно из рис. 7, соотношение этих величин дает четкое разделение данных для образцов, испытанных при МЦУ и МнЦУ.

Из рис. 6 следует, что область накопления рассеянной поврежденности отделяется от области появления макротрещины прямой линией. Значение $\Delta v_{zy}/S$ в момент образования

трещины выражается через отношение изменения коэффициентов Пуассона следующим образом:

$$\left(\frac{\Delta \nu_{zy}}{S}\right)^* = k_{S0} + k_{S1} \left(\frac{\Delta \nu_{zx}}{\Delta \nu_{zy}}\right)^* \tag{8}$$

где $(\Delta \nu_{zy}/S)^*$ и $(\Delta \nu_{zx}/\Delta \nu_{zy})^*$ определяются при критических значениях величин S ; $\Delta \nu_{zx}$ и $\Delta \nu_{zy}$, k_{S0} , k_{S1} – коэффициенты ($k_{S0} = 0,02$; $k_{S1} = -0,004$).

Поврежденность, рассчитанную по данным акустических и оптических измерений, можно представить в виде

$$\psi = \frac{\Delta \nu_{zx}/S}{(\Delta \nu_{zx}/S)^*} \tag{9}$$

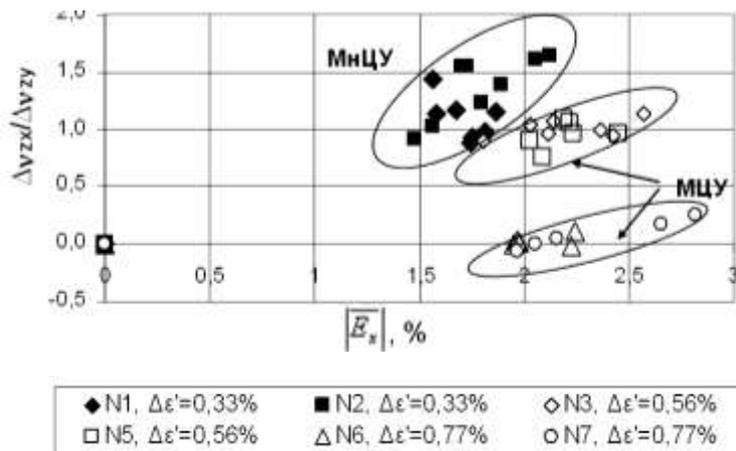


Рис. 7. Зависимость отношения продольного и поперечного коэффициентов Пуассона $\Delta \nu_{zx}/\Delta \nu_{zy}$ от среднего абсолютного значения микропластических деформаций

График поврежденности, рассчитанной по формуле (9), в зависимости от количества циклов нагружения, показан на рис. 8.

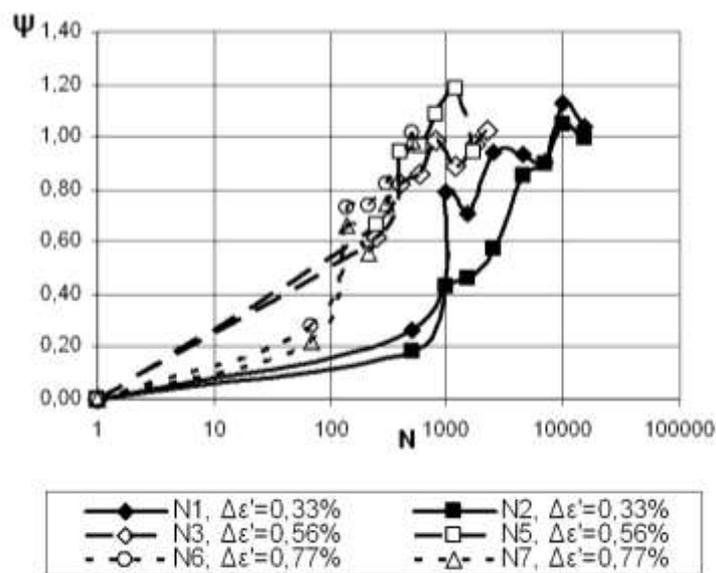


Рис. 8. График поврежденности, рассчитанной по формуле (9), в зависимости от количества циклов нагружения

Определение поврежденности с привлечением измерения параметров микропластических деформаций в целом подтверждается оценкой состояния материала с помощью акустических измерений (рис. 5).

Алгоритм оценки поврежденности по данным статических испытаний и акустических измерений

Экспериментальные исследования показали, что кривые $\Delta v_{zy}(\varepsilon_{plrel})$ (где ε_{plrel} – величина накопленной относительной деформации $\varepsilon_{plrel} = \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{pl}^*$, ε_{pl}^* – критическое значение ε_{pl} , соответствующее деформации, при которой образуется шейка) для статических испытаний и испытаний в области усталости близки при указанных выше условиях нагружения (рис. 9). Исходя из этого, можно грубо оценить величину поврежденности в области МЦУ, используя данные статических испытаний. Для этого при проведении статических испытаний определяются параметр v_{zy} и величина накопленной относительной деформации ε_{plrel} . Затем проводится аппроксимация $\varepsilon_{plrel}(\Delta v_{zy})$ с помощью выражения $\varepsilon_{plrel} = k_{1\varepsilon} + k_{2\varepsilon} \Delta v_{zy} + k_{3\varepsilon} (\Delta v_{zy})^2$, определяются коэффициенты $k_{1\varepsilon} = 0,1$; $k_{2\varepsilon} = 67,5$; $k_{3\varepsilon} = -788,2$; которые далее используются для расчёта поврежденности образцов, испытанных на усталость.

Исходя из деформационных критериев поврежденности [12], формулу для ее определения можно записать как: $\psi_\varepsilon = \varepsilon_{pl} / \varepsilon_{pl}^*$.

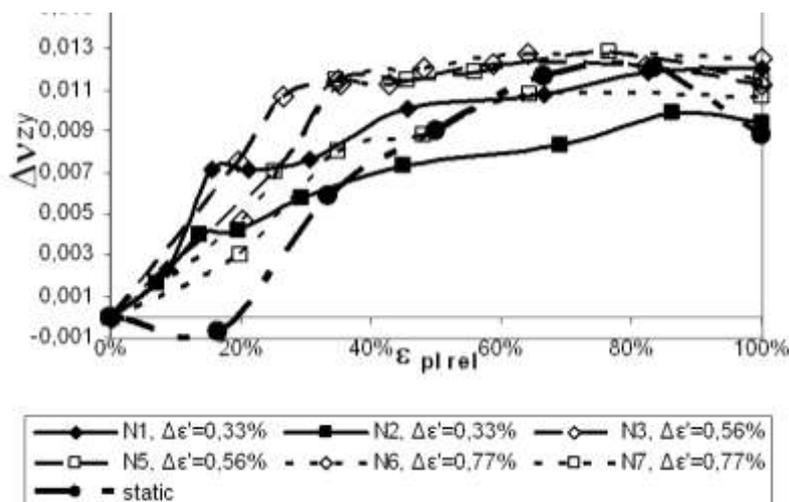


Рис. 9. Изменение значения коэффициента Пуассона Δv_{zy} в зависимости величины относительной накопленной деформации

Определение поврежденности ψ_ε производится по алгоритму, включающему данные статических испытаний:

$$\psi_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{pl}}{\varepsilon_{pl}^*} = k_{1\varepsilon} + k_{2\varepsilon} \Delta v_{zy} + k_{3\varepsilon} (\Delta v_{zy})^2 \quad (10)$$

где $0 \leq \psi_\varepsilon \leq 1$.

На рис. 10 представлены графики зависимости поврежденности, рассчитанной с использованием формулы (10), от количества циклов нагружения N .

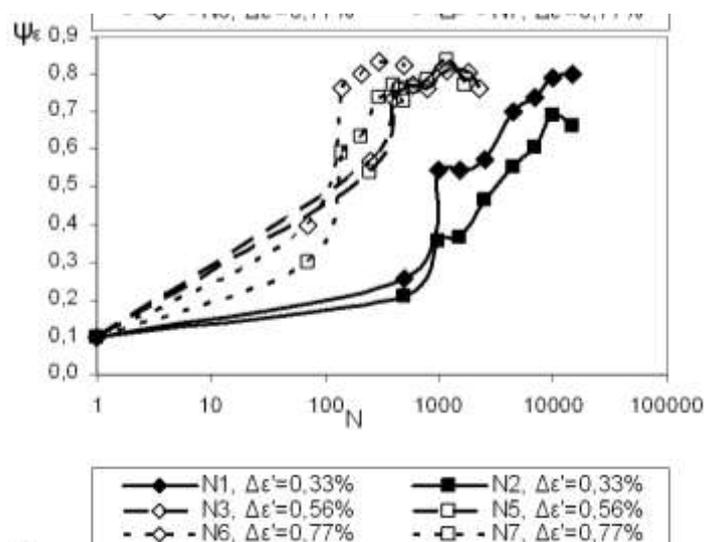


Рис. 10. Графики зависимости поврежденности, рассчитанной с использованием формулы (10), от количества циклов нагружения

Погрешность определения поврежденности составляет 20–30%

Использование данных статических испытаний существенно могут сократить время для определения величины поврежденности материала.

Выводы

Проведенные исследования показали существенное изменение акустических параметров стали 08X18H10T в процессе усталостного нагружения на ранней стадии разрушения до образования макротрещины. Получено, что в процессе исчерпания ресурса материала происходит изменение анизотропии упругих свойств исследуемого сплава, что можно объяснить активным формированием кристаллографической текстуры в процессе упругопластического циклического нагружения. Исследования также показали чувствительность коэффициентов Пуассона, измеренных с помощью акустического метода, к структурному состоянию материала и накоплению микроповреждений. Предложен алгоритм оценки степени деградации материала с помощью акустических измерений.

Также на базе оптических и акустических измерений предложен алгоритм определения поврежденности по данным величины микропластических деформаций и изменению коэффициента Пуассона.

Исходя из того, что кривые изменения коэффициента Пуассона в зависимости от относительной накопленной пластической деформации близки при нагружении в области малоциклового усталости и при статических испытаниях, предложен алгоритм оценки поврежденности материала с использованием данных статических испытаний. Такой подход существенно сокращает время для определения величины поврежденности материала методами НК.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант 09-08-00892).

Авторы выражают благодарность за проведение механических испытаний образцов из стали 08X18H10T Д.Н. Шишулину и Д.А. Захарову.

Библиографический список

1. Митенков, Ф.М. Использование оптического и акустического методов контроля для оценки поврежденности сталей на ранних стадиях усталостного разрушения / Ф.М. Митенков [и др.] // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2009. № 12. С. 40–45.

2. **Mishakin, V.V.** The use of wide band ultrasonic signals to estimate the stress condition of materials / V.V. Mishakin, S. Dixon, M.G.D. Potter // J. Phys. D., 2006. V. 39. P. 4681–4687.
3. **Стрельников, В.П.** Приложение теории марковских процессов к исследованию усталостной долговечности // Проблемы прочности. 1986. №2. С. 13–17.
4. **Гурьев, А.В.** Роль микропластических деформаций в формировании частотной зависимости / А.В. Гурьев, А.П. Карпов // Проблемы прочности. 1986. №4. С. 24–27.
5. **Салганик, Р.Л.** Механика тел с большим числом трещин // Механика твердого тела. 1973. № 4. С. 149–158.
6. **Вавакин, А.С.** Об эффективных характеристиках неоднородных сред с изолированными неоднородностями / А.С. Вавакин, Р.Л. Салганик // Механика твердого тела. 1975. № 3. С. 65–76.
7. **Sayers, C. M.** Ultrasonic velocities in anisotropic polycrystalline aggregates // Appl. Phys. 1982. V. 15. P. 2157–2167.
8. **Мишакин, В.В.** Разработка акустического метода оценки поврежденности металлических сплавов до образования макротрещины / В.В. Мишакин [и др.] // Дефектоскопия. 2007. №10. С. 49–57.
9. Закономерности формирования и эволюции дислокационных субструктур в углеродистой стали при усталости в отожженном и закаленном состояниях / О.В. Соснин [и др.] // Изв. вузов. Сер. Физика. 2004. Т. 47. С. 32–37.
10. **Терентьев, В.Ф.** Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев; отв. ред. Н.П. Лякишев. – М.: Наука, 2003. – 254 с.
11. Аналитическая оценка зарождения микротрещин в вершинах и на границах двойников в ОЦК и ГЦК металлах / В.А. Куранова [и др.] // Вестник Тамбовского ун-та. Сер. Естеств. и техн. науки/ ТГУ. 2002. Т. 7. Вып. 1. С. 99.
12. **Кононов, К.М.** Критерии разрушения материалов при циклическом нагружении / К.М. Кононов, Л.Б. Гецов // Проблемы прочности. 1984. № 2. С. 81–85.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.A. Klyushnikov, V.V. Mishakin, N.V. Danilova

THE DAMAGE ESTIMATING OF 08CR18Ni10Ti STEEL IN THE EARLY STAGES OF FATIGUE LOADING USING NONDESTRUCTIVE METHODS

The results of the study of 08Cr18Ni10Ti steel subjected to fatigue failure by acoustic and optical control methods are presented. According to test results the correlations between the damage degree and both the acoustic characteristics and microplastic deformations' parameters defined by an optical method were obtained. The algorithm for damage estimating of the material in the early stages of fatigue failure was proposed on the base of acoustic and optical measurements data.

Key words: fatigue damage, nondestructive testing, acoustic parameters, optical method, microplastic characteristics, high-cycle and low cycle fatigue.

УДК 621.9.025.7

В.В. Мыльников¹, А.И. Пронин², Е.А. Чернышов¹**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ
НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет²

Изложены результаты исследований работоспособности резцов из различных инструментальных материалов при прерывистой и непрерывной обработке труднообрабатываемых материалов. Выявлен механизм их разрушения и изнашивания, указаны пути повышения работоспособности инструмента, оснащенного режущей керамикой и сверхтвердыми материалами.

Ключевые слова: режущая керамика, сверхтвердые материалы, жесткость, технологическая система, упрочнение инструмента, износ, кубический нитрид бора, устойчивость, закаленная сталь, оптимальная скорость резания, резец.

Повышение производительности труда и качества изготавливаемых изделий остается нерешенной национальной и международной научно-технической проблемой. Большая роль в решении этой проблемы отводится машиностроению и металлообработке. В настоящее время отмечается наступление третьей научно-технической революции в машиностроении и металлообработке. Этот этап характеризуется заменой твердых сплавов минералокерамикой и поликристаллическими сверхтвердыми материалами (ПСТМ) на основе кубического нитрида бора. Данный этап не отменяет полностью достижения предыдущих, но благодаря улучшенным физико-механическим свойствам новых материалов позволяет поднять скорость обработки в 2,5-5 раз, что позволяет повысить эффективность токарных станков в 2-3 раза и в значительной степени повышать эффективность всего народного хозяйства.

Режущая керамика и сверхтвердые материалы - это относительно новые инструментальные материалы. Таким инструментом можно обрабатывать детали из материалов с повышенными прочностными характеристиками и специальными свойствами, в том числе из закаленных сталей, жаропрочных сплавов, труднообрабатываемых чугунов, цветных металлов и абразивных неметаллических материалов.

Производители инструмента предлагают марки ПСТМ и режущей керамики с более высокой теплостойкостью и прочностными показателями, что существенно повышает износостойкость этих материалов, особенно в условиях переменных нагрузок и высоких скоростей резания. Однако ограничения по применению такого инструмента существуют и связаны они с низкой сопротивляемостью знакопеременному циклическому нагружению. Обработка прерывистых и, особенно, комбинированных поверхностей до сих пор остается малоизученной областью исследований.

Испытания работоспособности инструмента проводили на токарном станке модели 16K20ФЗС32. Заготовкой являлся цилиндр диаметром 90 мм, длиной 420 мм с продольным пазом шириной 8 мм и глубиной паза 20 мм. Материал заготовки – закаленная сталь марки ХВГ (HRC 62-65). Заготовка на станке устанавливалась в трехкулачковом патроне и поджималась задним центром. Режим резания: глубина 0,5 мм, подача 0,11 мм/об, скорость резания варьировали, наружное прерывистое точение. Режущие пластины (режущая керамика марки ВОК 60 и сверхтвёрдые материалы на основе кубического нитрида бора марок томал и киборит) механически закрепляли в державке сечением 25x25 мм, обеспечивая геометрию режущей части $\alpha=7^\circ$; $\gamma=-11^\circ$.

Пластина киборита использовалась круглой формы диаметром 7 мм и толщиной 5 мм; пластина томала - квадратной формы с радиусом и размерами 7 x 7 x 4 мм; пластина ВОК-60 - треугольной формы с радиусом и размером стороны (16 мм и высотой 5 мм). Регистрировали путь, пройденный до скола, или величину износа по задней поверхности, предельным считали износ 0,4 мм. Результаты исследования на определение величины оптимальной скорости резания для таких условий обработки типовым инструментом приведены на рис. 1.

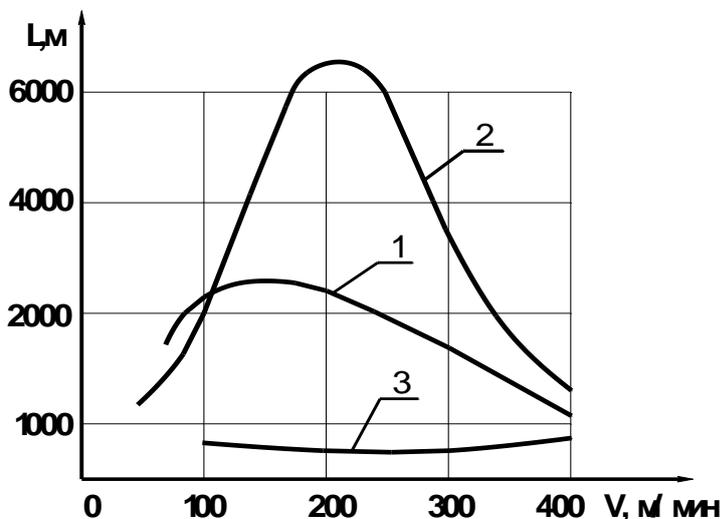


Рис. 1. Зависимость пути L , проходимого режущим лезвием до скола, от скорости V резания:

1 – томал; 2 – киборит; 3 – ВОК-60

Из рис. 1 следует, что работоспособность томала в два (и более) раза выше, чем у керамики, но существенно ниже, чем у киборита. Оптимальные скорости резания этих материалов различны, и экстремум стойкости у томала смещен по отношению к кибориту в область меньших скоростей резания. Зависимость $L = L(V)$ для пластины киборит носит экстремальный характер, эффективная скорость резания находится в интервале $V = 180 - 250$ м/мин.

Рядом дополнительных исследований установлено [1, 2, 3]:

1. На величину рекомендуемых режимов резания влияет жесткость технологической системы.

2. Отклонение скорости резания от оптимальной приводит к росту шероховатости обработанной поверхности. Оптимальным считался параметр шероховатости $Ra_{0,8}$. Такой характер зависимости шероховатости от изменения скорости резания объясняется появлением вибраций. Увеличение подачи и глубины резания приводит к росту шероховатости обработанной поверхности из-за недостаточной жесткости технологической системы.

3. Применение смазывающе-охлаждающих технологических сред позволяет повысить скорость резания на 50–70% без ущерба стойкости инструмента и качеству обработанной поверхности.

4. Низкая работоспособность керамических пластин в условиях прерывистого точения в основном вызвана скалыванием режущей кромки из-за образования микротрещин на межзеренных границах и, как следствие, межзеренный вырыв и скол зерен Al_2O_3 .

Приведем отдельные результаты повышения работоспособности инструментов из режущей керамики и ПСТМ за счёт применения их упрочнения, в частности за счёт применения релаксационной термообработки при отжиге и нанесении покрытий.

Для повышения хрупкой прочности и снижения окислительного характера износа [2, 3] применяли упрочнение инструмента. Это оказалось существенным для режущей керамики. Фактор температурного воздействия при отжиге благоприятно сказывался на процессе релаксации внутренних напряжений, сформировавшихся в керамике при размерной обработ-

ке пластин у производителя в ходе алмазного шлифования. Это способствует повышению объемной прочности пластины. Установлено [1, 3], что термообработка на воздухе не дает существенного повышения работоспособности в силу того, что связка и зерна упрочняющей фазы, активно взаимодействуя с воздухом при нагреве, образуют на поверхности соединения с низкой энергоемкостью, кислород проникает в поры поверхностного слоя и образует окислы, выполняющие функцию расклинивания в порах и вызывающие коробление и вспучивание поверхности. В силу этого термообработку целесообразно проводить в защитной среде либо в вакууме. Химико-термическую обработку осуществляли азотированием как заключительный этап термообработки. Роль ионного азотирования состоит в легировании связки и инициировании выкрашивания наиболее разрушенных при заточке зерен. Механизм выкрашивания состоит в том, что внедрение азота наиболее интенсивно происходит в предварительно разрушенные при заточке микрообъемы (расколотые зерна, границы зерен). Это ведет к разрушению границ зерен и снижению сил их сцепления. Трансформация напряженного состояния таких зерен ведет к их короблению, размельчению, выкрашиванию с поверхности, т.е. часть разрушенных зерен заранее удаляется с поверхности пластины. В результате такого "залечивания" дефектов повышается сдвиговая устойчивость и, соответственно, трещиностойкость керамики.

В частности низкопрочную режущую керамику ВО-13 после термообработки подвергли "залечиванию" дефектов путем нанесения покрытия. Покрытие выполняли металлическим из тугоплавких металлов (цирконий, ниобий). При его нанесении реализуется микролегирование связки и ликвидация трещин и пор в поверхностном слое. Толщины слоев чистых металлов незначительны, а именно: ниобий 0,2 - 0,5 мкм, цирконий 0,5 - 0,8 мкм. Испытания работоспособности инструмента проводили на токарном станке модели 16К20Ф3С32. Материал заготовки – закаленная сталь марки 45 (HRC₃₀-45). Режущие пластины механически закрепляли в державке сечением 25x25 мм, обеспечивая геометрию режущей части $\alpha=7^\circ$; $\gamma=-11^\circ$. Режим резания: глубина 0,5 мм, подача 0,21 мм/об, скорость резания 250 м/мин, наружное точение. Регистрировали время работы режущих пластин до скола или величину износа по задней поверхности, предельным считали износ 0,4 мм. Сравнительные результаты стойкости инструмента приведены на рис. 2.

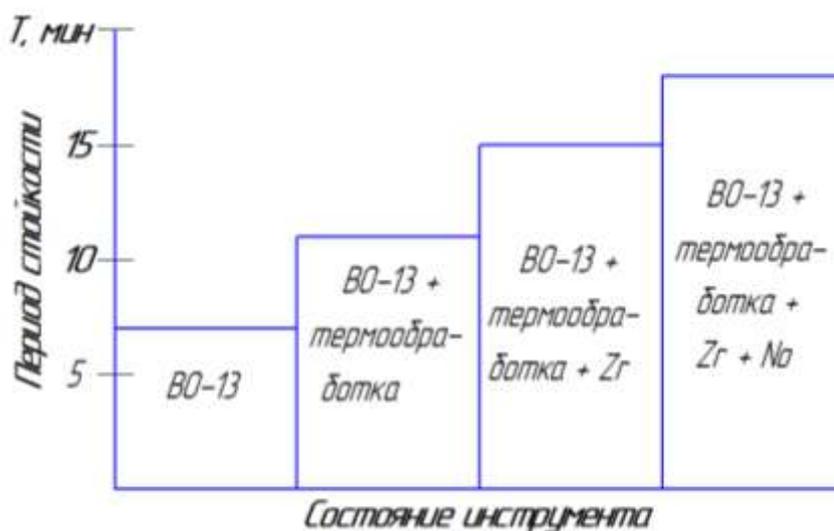


Рис. 2. Сравнительная стойкость режущей пластины ВО-13 до и после различных этапов упрочнения пластины

В развитие указанных решений после осаждения металлического или нитридного покрытия предложено проводить дополнительную термообработку. До нанесения покрытия термообработанную основу можно подвергать науглероживанию и ионной очистке, т.е. эффективная технологическая последовательность упрочнения керамики представляет собой

следующее: керамика + науглероживание + термообработка + ионная очистка + слой металла + нитридное покрытие + термообработка. Дополнительная термообработка после нанесения покрытия позволяет снять напряжения на границе раздела основа-покрытие и инициировать диффузионные процессы между основой и покрытием. Результаты испытания такого инструмента из режущей керамики при точении стали ШХ15 (HRC 52-56) со скоростью резания 120 м/мин, подачей 0,1 мм/об, глубиной 1 мм приведены на рис. 3.

Инструменту из сверхтвердых материалов свойственна дефектность поверхностного слоя, связанная с алмазноабразивной размерной обработкой. В силу этого предлагаемые решения по повышению работоспособности инструмента из сверхтвердых материалов носят технологический характер и связаны с термообработкой (для перераспределения напряжений и дислокационной структуры) и с "залечиванием" поверхностного дефектного слоя (путем осаждения металлических слоев). Так, после термообработки инструмент из кубического нитрида бора подвергали "залечиванию" путем металлизации, которое реализуется за счет осаждения металла (хрома), либо за счет никелирования и осаждения слоя циркония. Оценка работоспособности упрочненных термообработкой и "залечиванием" сверхтвердых материалов проводилась в основном на инструментальном материале с торговой маркой "киборит".

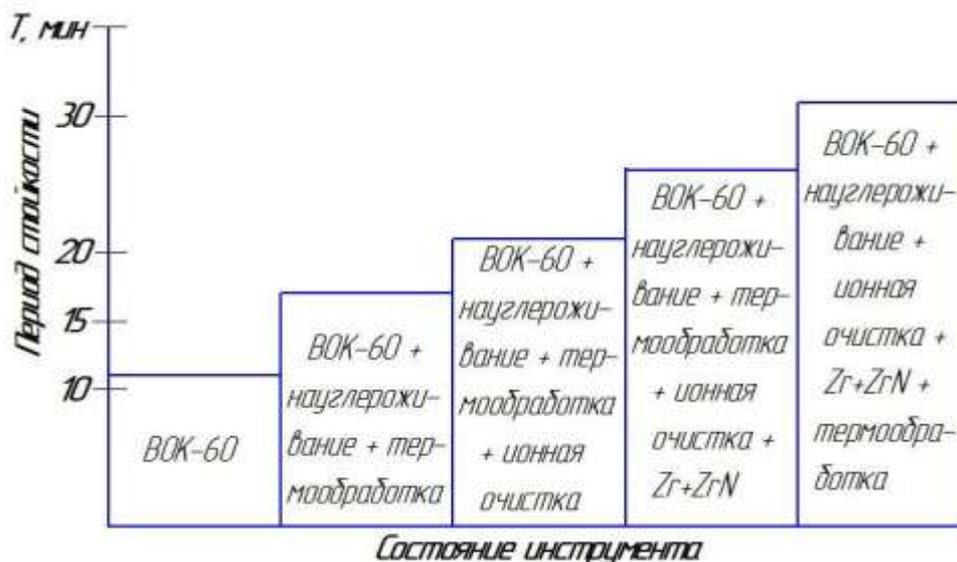


Рис. 3. Сравнительная стойкость пластины ВОК-60 до и после различных этапов упрочнения пластины

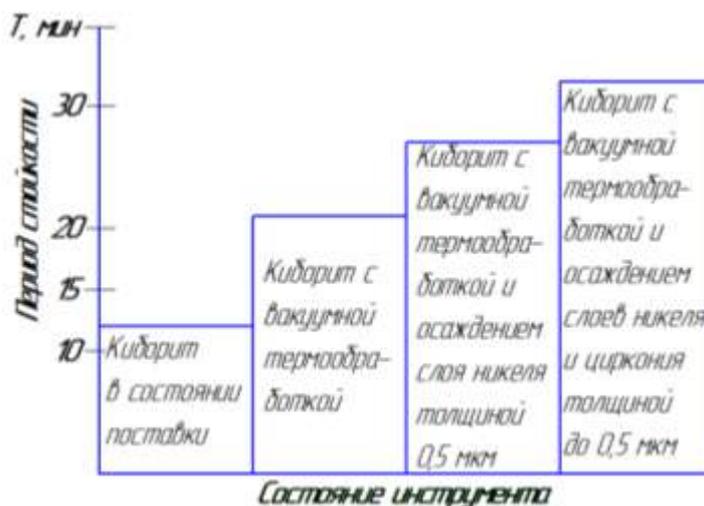


Рис. 4. Сравнительная стойкость пластины киборит в состоянии поставки и после различных этапов упрочнения пластины

Испытания проводились при различных условиях резания. Так, на рис. 4 приведены результаты испытания киборита при токарной обработке по литевой корке чугуна СЧ-21 (НВ-230) при скорости резания 300 м/мин, подаче 0,1 мм/об, глубине 0,7 мм. Обработка велась до скола или затупления по задней грани до 0,4 мм. Лунка износа по передней грани отмечалась, но имела незначительные размеры.

Результаты сравнительных стойкостных испытаний упрочненных инструментов из киборита при циклическом нагружении и жестко заданных условиях резания (сталь 45 закаленная, скорость резания 240 м/мин, подача 0,1 мм/об, глубина $0,5 \pm 0,8$ мм, наружное точение "на удар" цилиндрической заготовки с двумя продольными пазами) приведены на рис. 5. Из данных рисунка видно не только повышение работоспособности упрочненного инструмента, но также изменение интенсивности износа на различных этапах работы инструмента.

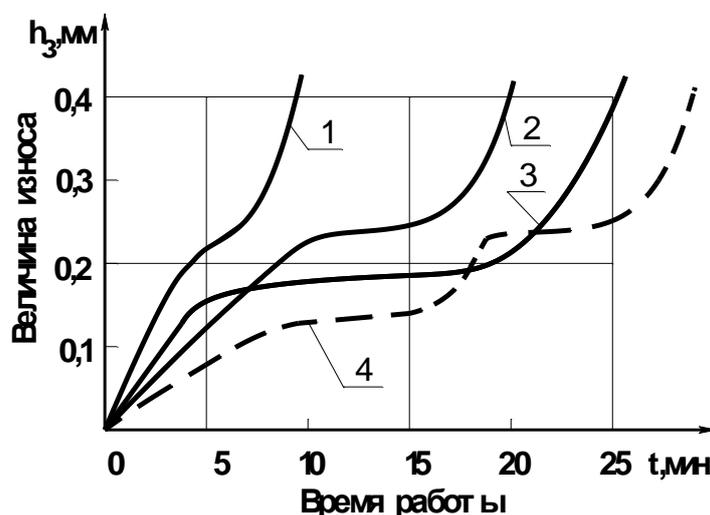


Рис. 5. Период стойкости инструмента из ПСТМ:

- 1 - киборит в состоянии поставки; 2 - киборит с вакуумной термообработкой;
3 - киборит с вакуумной термообработкой и металлическим слоем циркония;
4 - киборит с ионным азотированием + (Ti, Zr)+ZrN

Выводы

1. Режущие пластины из ПСТМ в условиях прерывистого резания проявляют большую сопротивляемость хрупкому разрушению по сравнению с режущей керамикой. Хрупкое разрушение режущей керамики и ПСТМ реализуется сколом и межзерненным разрушением. Зарождению трещин способствуют дефекты их структуры и алмазной заточки.

2. Работоспособность инструмента из ПСТМ и режущей керамики можно существенно повысить за счет оптимизации режима алмазной обработки, устраняющей образование микротрещин в поверхностных слоях пластин, а также упрочнения релаксационной термообработкой и путем «залечивания» дефектов нанесением покрытий. Это позволяет существенно расширить область применения инструмента и режимов резания.

3. Эффективное использование инструментов из ПСТМ и режущей керамики достигается на высокоточных станках, обладающих жесткостью и виброустойчивостью, при тщательном контроле технологических параметров.

Библиографический список

1. Кабалдин, Ю. Г. Принципы конструирования композиционных и инструментальных материалов с повышенной работоспособностью / Ю. Г. Кабалдин. – Владивосток.: Изд. ин-та машиноведения и металлургии, 1990. – 58 с.

2. **Кабалдин, Ю.Г.** Стойкость режущего инструмента, оснащенного керамикой и сверхтвердыми материалами / Ю.Г. Кабалдин, Б.Я. Мокрицкий, А.И. Пронин // Станки и инструмент. 1991. № 12. С. 19–21.
3. Работоспособность резцов из различных инструментальных материалов при обработке высокопрочного чугуна / Ю.Г. Кабалдини [и др.] // Сверхтвердые материалы. 1991. №6. С. 29–33.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

V.V. Mylnikov, A.I. Pronin, E.A. Chernyshov

THE RESEARTCH OF CERAMIC MATERIALS' INFLUENCE ON FUNCTIONALITY OF CUTTING INSTRUMENT

In work results of researches of serviceability of cutters from various tool materials are stated at faltering and continuous processing of hard of materials. The mechanism of their destruction and wear process is revealed, ways of increase of serviceability of the tool equipped with cutting ceramics and superfirm materials are specified.

Key words: cutting ceramics, superfirm materials, rigidity, technological system, hardening of the tool, deterioration, cubic nitride of a pine forest, stability, hardened steel, optimum speed of cutting, cutting tool.

УДК 621.742.4

И.Е. Илларионов

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ФОРМИРОВАНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ СМЕСЕЙ**Чебоксарский политехнический институт (филиал) ГОУ ВПО МГОУ**

Рассмотрены теоретические основы формирования физико-механических свойств песчаных смесей, энергия взаимодействия минеральных частиц с водой; пьезо- и трибоэлектрический эффекты и поверхностные явления в системе минеральная частица – вода – воздух.

Ключевые слова: песчано-глинистые смеси; энергия взаимодействия; вода; полярная жидкость; огнеупорная глина; кварцевые пески; трибоэлектрический и пьезоэлектрический эффекты; коллоидная частица; заряд мицеллы.

Введение

Песчано-глинистые формовочные смеси представляют сложную многокомпонентную капиллярно-пористую систему, минеральные частицы которой окружены водной оболочкой. На свойства смесей оказывают влияние многие факторы, среди которых существенное значение имеют влажность, количество и состав связующих материалов, степень перемешивания в бегунах, зерновой состав песка и т.д.[1-8].

Механизм формирования свойств песчано-глинистых смесей весьма сложен и недостаточно изучен, поэтому в исследованиях, как правило, преобладает эмпирический путь подбора формовочных смесей с необходимыми свойствами.

В настоящее время, характеризуемое бурным техническим прогрессом, разработка теоретических основ получения высококачественных отливок может быть осуществлена на основе глубокого изучения сложных физико-химических процессов, протекающих на границе металла с формой. Свойства самой формы, придающей отливке необходимые качества, могут быть познаны на основе глубокого изучения процессов, протекающих на границах контактирующих фаз, составляющих формовочную смесь.

1. Энергия взаимодействия между минеральной частицей и водой

Фундаментальными работами школы академика Б.В. Дерягина установлены основные закономерности взаимодействия воды с поверхностями минеральных частиц. В частности, показано активное взаимодействие ионов, входящих в кристаллическую решетку глинистых минералов с диполями воды.

Согласно взглядам современной физической химии, межмолекулярные, или Ван-дер-Ваальсовы силы, характеризующие взаимодействие между молекулами, складываются из ориентационного, индукционного и дисперсионного взаимодействий.

Ориентационное взаимодействие характерно для полярных молекул. Противоположная взаимная ориентация молекул приводит к притяжению между молекулами воды и поверхностью минеральных частичек, обладающих ионной или ковалентной (полярной) структурой. Энергия взаимодействия может быть определена с помощью закона Кулона, и для молекул, обладающих дипольными моментами, равна

$$E_0 = -\frac{2}{3} \frac{\mu_1^2 \mu_2^2}{KT} \frac{1}{r^6};$$

где, μ_1 и μ_2 - дипольные моменты молекул; r - межмолекулярное расстояние. Знак минус оз-

начает, что при сближении молекул энергия понижается и, следовательно, молекулы взаимно притягиваются.

Индукционное взаимодействие связано с поляризацией поверхности минеральной частицы диполями воды (адсорбированная дипольная молекула воды индуцирует заряженным концом на поверхности частицы диполь противоположного знака и притягивается к ней).

Энергия индукционного взаимодействия определяется по формуле [1, 2]

$$E_0 = -(\mu_1^2 \alpha_2 + \mu_2^2 \alpha_1) \frac{1}{r^6},$$

где α_1 и α_2 - поляризуемость, представляющая собой способность электронных оболочек атомов, молекул и ионов деформироваться под действием электрического поля E_1 , в результате чего молекулы минеральной частицы приобретают индуцированный дипольный момент.

Дисперсионное взаимодействие является результатом возникновения «мгновенных» диполей в атомах и молекулах при вращении электронов, т.е. смещением в любой отдельно взятый момент времени центров тяжести положительных и отрицательных зарядов, энергия дисперсионного взаимодействия определяется по А.В. Думанскому:

$$E_\alpha = -\frac{3h}{2} \alpha_1 \alpha_2 \frac{\nu_1 \nu_2}{\nu_1 + \nu_2} \frac{1}{r^6},$$

где ν_1 и ν_2 - собственные частоты молекул; h - постоянная Планка.

Следовательно, суммарная энергия взаимодействия между двумя молекулами составит

$$E = -\frac{1}{r^6} \left(\frac{2}{3} \frac{\mu_1^2 \mu_2^2}{KT} + \mu_1^2 \alpha_2 + \mu_2^2 \alpha_1 + \frac{3h}{2} \alpha_1 \alpha_2 \frac{\nu_1 \nu_2}{\nu_1 + \nu_2} \right).$$

При условии взаимодействия одинаковых молекул уравнение примет вид

$$E = -\frac{1}{r^6} \left[\frac{2}{3} \frac{\mu^4}{KT} + 2\mu^2 \alpha + \frac{3}{4} h \alpha^2 \nu \right].$$

Взаимодействие в системе минеральная частица – вода будет определяться свойствами как минералов, так и воды, применяемых для приготовления формовочных смесей.

Радиус действия Ван-дер-Ваальсовых сил значительно превышает размеры молекул и достигает до 0,1-1,2 мк. Б.В. Ильин приводит следующие значения величин энергий, взаимодействий поверхности кристалла, имеющего ионную решетку с полярными молекулами (кДж/моль): ориентационное взаимодействие 9,9, индукционное 0,27, дисперсионное 1,8.

2. Характеристика воды как полярной жидкости

Полярный характер связей между атомами водорода и кислорода в молекулах воды (рис. 1) усиливает влияние поверхностных сил минеральных частиц.

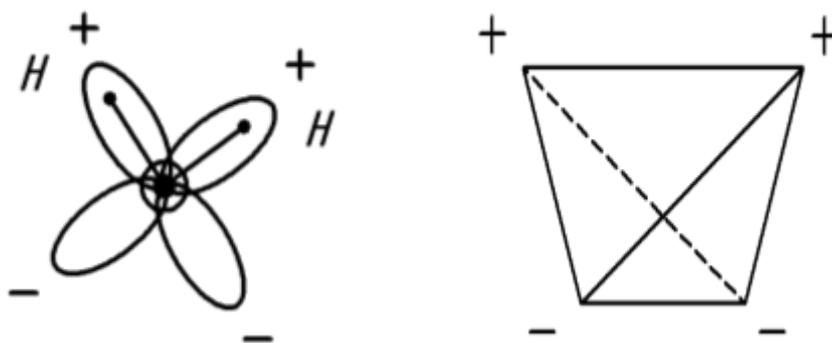
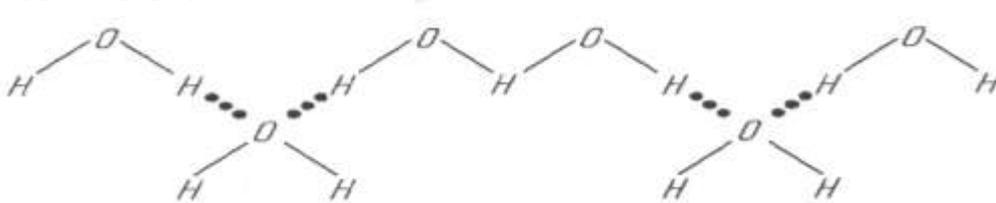


Рис. 1. Распределение элетронов в молекуле воды

Как известно, молекула воды состоит из трех атомных ядер и десяти электронов. Первая пара электронов атома кислорода (показана кружком) расположена на небольшом расстоянии от ядра, остальные образуют электронные облака, вытянутые в направлении четырех вершин тетраэдра.

В результате подобного расположения двум вершинам тетраэдра с ядрами водорода и связанными с ними двумя парами электронов придается положительный заряд, а две остальные пары электронов придают другим вершинам отрицательный заряд.

В воде атомы водорода одних молекул могут взаимодействовать с атомами кислорода других молекул посредством водородной связи. Это взаимодействие может быть представлено структурной формулой



Водородная связь обозначена точками. Энергия водородной связи составляет 5-8 ккал/моль. Дипольные строения молекул воды обуславливает ориентацию молекул (рис. 2), отвечающую их наиболее устойчивому состоянию.

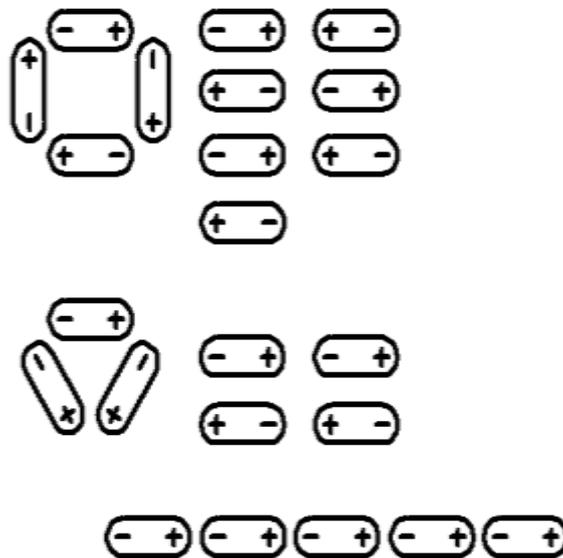


Рис. 2. Схема взаимодействия между полярными молекулами воды

Приведенные схемы взаимодействия представляют дополнительную возможность в объяснении поведения воды при соприкосновении с минеральными частицами.

3. Структурная характеристика огнеупорных глин

В большинстве случаев для приготовления формовочных смесей применяются, главным образом, кварцевые пески различных месторождений, огнеупорные глины и промышленная или хозяйственная вода.

Содержание отдельных составляющих смеси в зависимости от получения форм колеблется в значительных пределах (глина от 2 до 25%, бентонит от 2 до 10%, вода от 2 до 8%).

Изучение свойств формовочной смеси и изменение их в нужном направлении возможно на основе глубокого теоретического анализа явлений, протекающих на границах контактирующих фаз.

Глинистые минералы имеют весьма малые размеры кристаллов пластинчатой формы. Применяемые для формовочных смесей глины относятся к каолиновой (рис. 3, а) и монтмориллонитовой (рис. 3, б) группам, химический состав которых выражается соответственно формулами:



Как видно из рис. 3, кристаллические решетки обоих минералов имеют пакетное строение. Заряды структурных элементов сбалансированы и, например, для каолинита распределяются следующим образом [1, 2]: $6\text{O}^{2-}-12^-$; $4\text{Si}^{4+}-16^+$; 4O^{2-} и $2(\text{OH})^- - 10^-$ (слой общих атомов); $4\text{Al}^{3+}-12^+$; $6(\text{OH})^- - 6^-$.

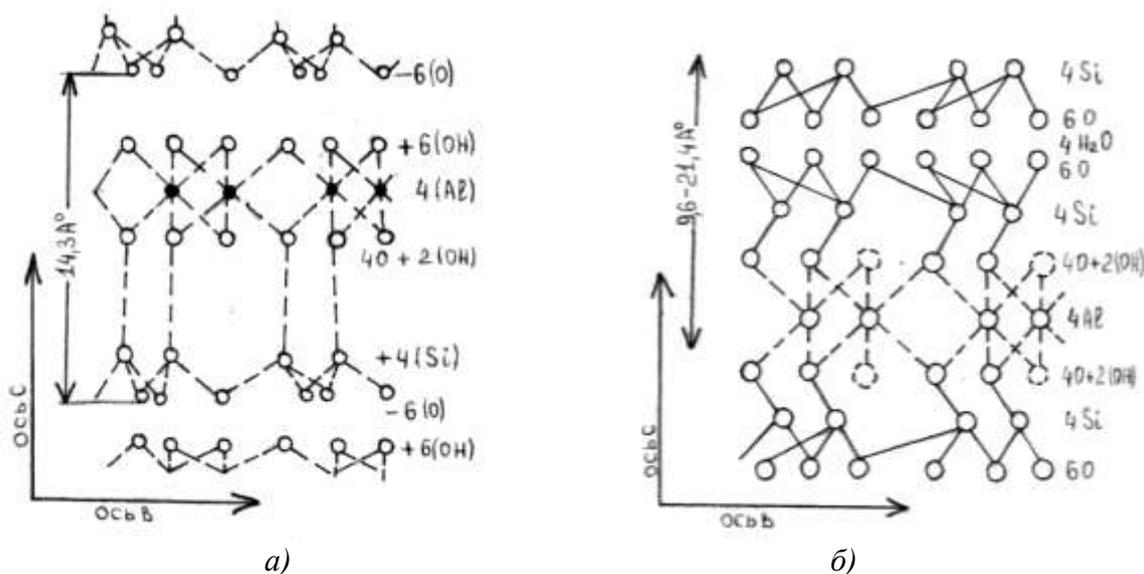


Рис. 3. Схематическое изображение структуры:
а - каолинового слоя; б - монтмориллонитового слоя

Как видно из рис. 3, а, одна часть гидроксильных групп каолинового слоя находится внутри пакета, а другая - на его поверхности. Указанное расположение гидроксильных групп оказывает влияние на температурный интервал дегидратизации глинистых минералов в процессе их сушки.

Особенностью кристаллической решетки монтмориллонита является ее подвижность в направлении к оси С. Для бентонитовых глин, имеющих монтмориллонитовую структуру, характерны большая набухаемость и емкость поглощения, достигающая до 150 экв на 100 г. сухого материала; емкость поглощения каолиновых глин составляет лишь 10-15 мг. экв.

Элементарная частица каолина или монтмориллонита представляет сложную электрическую систему, во взаимодействии которой с внешней средой, например с водой, имеют место определенные закономерности.

4. Структурная характеристика кварцевых песков

Применяемые для приготовления формовочных смесей кварцевые пески состоят из минерала кварца, имеющего тетраэдрическую структуру. В центре решетки расположен положительно заряженный ион кремния, а по углам - отрицательно заряженные ионы кислорода. Из-за нескомпенсированности зарядами кислорода поверхность кристалла будет иметь отрицательный заряд.

Таким образом, поверхность зерен кварца несет на себе заряд. Дополнительную электризацию зерна кварца приобретают при перемешивании в процессах сушки и приготовления формовочной смеси в смешивающих бегунах.

5. Пьезоэлектрический эффект формовочных материалов

Явление поляризации, наблюдаемое при механических воздействиях на зерна кварца, носит название пьезоэлектрического эффекта.

Сущность этого эффекта заключается в следующем. При механическом воздействии на кристалл кварца (рис. 4, б) поверхности его *A* и *B* заряжаются противоположными зарядами [1-3] (продольный эффект).

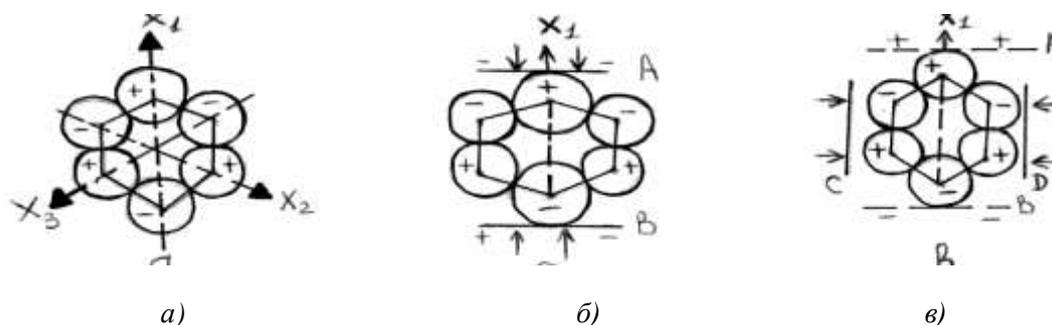


Рис. 4. Механизм возникновения электрических зарядов при пьезоэффекте кварца

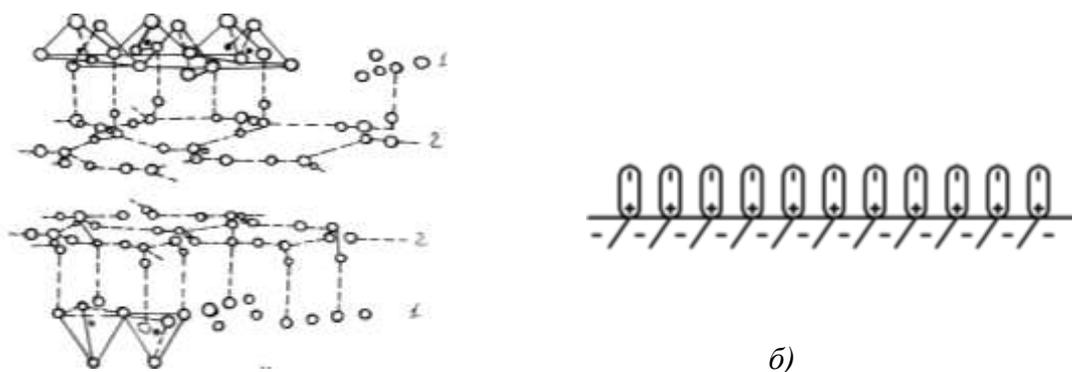
Воздействия усилий по схеме в приводят к возникновению на поверхности *A* и *B* зарядов, противоположных воздействию по схеме б (поперечный эффект).

Важно отметить наблюдающееся расширение по оси X_1 , и сжатие по оси X_2 при одновременном увеличении угла между осями X_2 и X_3 под действием электрического поля пластины, вырезанной перпендикулярно оси X (срез Кюри).

6. Трибоэлектрический эффект при приготовлении и перемешивании формовочных смесей

Одновременно с пьезоэффектом при перемешивании и пневмотранспортировке формовочных материалов в результате контактных явлений при трении на поверхности частиц формовочных материалов возникают электрические заряды. Это явление носит название трибоэлектрического эффекта, который зависит, с одной стороны, от удельного электрического сопротивления, химического состава и структуры, а также характера поверхности кварцевого песка и сопутствующих примесей, а с другой – на величину трибоэлектрического эффекта оказывают влияние и внешние факторы: влажность, температура, давление и характеристика внешнего электромагнитного поля. Продолжительность сохранения электрических зарядов, дополнительно приобретенных зернами кварцевого песка при механическом перемешивании (пьезо-и трибоэффект) в зависимости от конкретных условий, может изменяться в широких пределах.

Для упрощения рассмотрения подразумеваем, для песчано-глинистых смесей, что химическое взаимодействие на границе соприкосновения фаз не приводит к образованию новых фаз и не оказывает заметного влияния на сам процесс. В этом случае для рассматриваемой системы минеральная частица – вода связь адсорбционных молекул воды с минеральной частицей осуществляется за счет сил межмолекулярного взаимодействия, существенная роль среди которых принадлежит ориентационному взаимодействию. Под действием межмолекулярных сил происходит правильная ориентация диполей воды по отношению к поверхности минеральной частицы (рис. 5). Контурная сетка воды предложенная Хендриком и Джефферсоном, показывает связь с поверхностью глинистого минерала, осуществляемую через водород. По мере удаления от поверхности ориентации уменьшается и на некотором расстоянии от поверхности частицы ориентация диполей исчезает.



а) **Рис. 5. Конфигурная сетка воды:**
а - кремнекислородный слой глинистого материала;
б - ориентированные молекулы воды

На границе соприкосновения фаз образуются электрические заряды, приводящие к возникновению электрических потенциалов [1-3 и др.]. Согласно работам [1-3], минеральные составляющие формовочной смеси в коллоидном состоянии представляют собой мицеллы, состоящие из нерастворимого в воде ядра, окруженного двойным электрическим слоем.

Величина диффузного слоя d_0 мицеллы будет зависеть как от ионного обмена, так и от всех факторов, влияющих на поляризацию поверхности частицы. Следовательно, влияя на спонтанную поляризацию минеральной частицы, мы изменяем толщину электрического слоя, угол ориентации молекул воды и величину электрокинетического потенциала, что приводит к изменению свойств смеси.

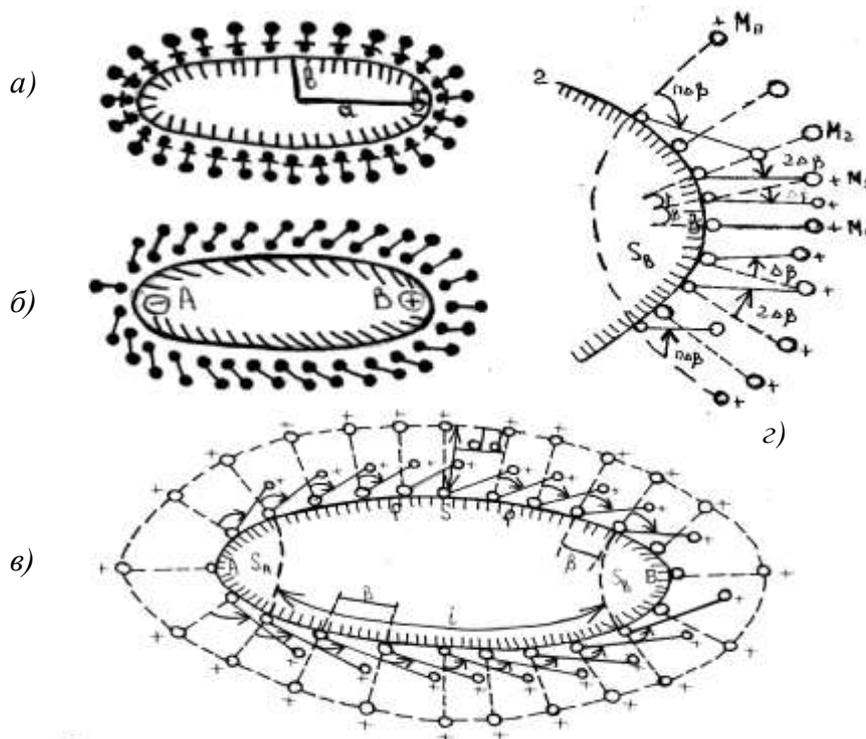


Рис. 6. Схема мицеллы коллоидной частицы с мономолекулярной пленкой воды, адсорбированных на ее поверхности (по Н.А. Толстому):

а - дипольные молекулы расположены нормально к поверхности; б - дипольные молекулы наклонены к поверхности частицы (последняя приобретает в целом дипольный момент μ); в - спонтанная поляризация сопровождается уменьшением толщины «двойного электрического слоя» от d_0 до d на «регулярном» участке и сдвигом центра тяжести наружных зарядов в направлении S_A ; г - детальное строение «нерегулярного» участка S_B

По данным Б.В. Дерягина на границе раздела фаз системы минеральная частица – вода не происходит полной компенсации зарядов частицы диполями воды, в результате чего образуется подвижная часть диффузного слоя, ионы которого и компенсируют заряд частицы (рис. 7 и рис. 8).

Как видно из рис. 7, *a*, наибольший потенциал имеет отрицательно заряженная поверхность минеральной частицы (Ψ - потенциал). Затем потенциал снижается до уровня потенциала в свободной воде. Его снижение в диффузном слое, или электрокинетический потенциал (ξ - потенциал), играет существенную роль в формировании прочности смесей. По данным [1 - 3], чем меньше ξ - потенциал, тем выше прочность и структура смеси.

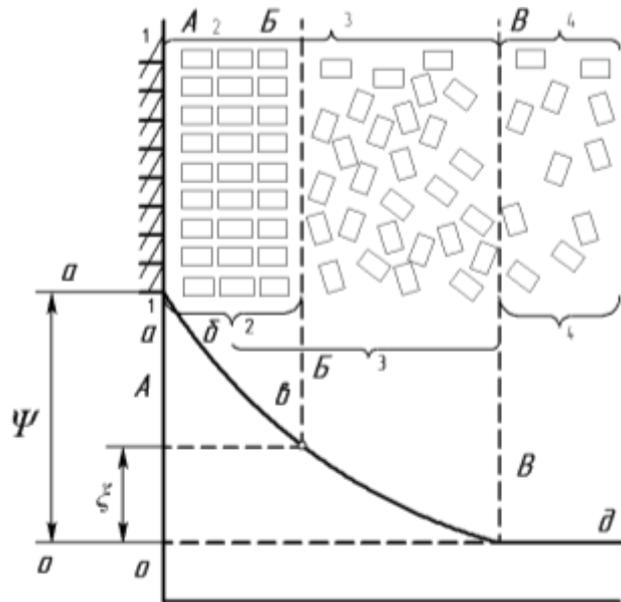


Рис. 7. Схема межмолекулярного взаимодействия минеральной частицы формовочной смеси с молекулами воды:

- 1-1 - отрицательно заряженная поверхность твердой частицы; 2-2 - неподвижный слой противоионов;
- 3-3 - диффузный слой; 4-4 - свободный раствор; АА - граница раздела между твердой частицей и средой;
- ББ - граница между неподвижной и подвижной частями диффузного слоя;
- ВВ - граница диффузного слоя; аб - уровень потенциала в твердой частице (ξ - потенциал);
- бв - падение потенциала в неподвижной части; вг – падение потенциала в подвижной части;
- гд – уровень потенциала в свободном растворе

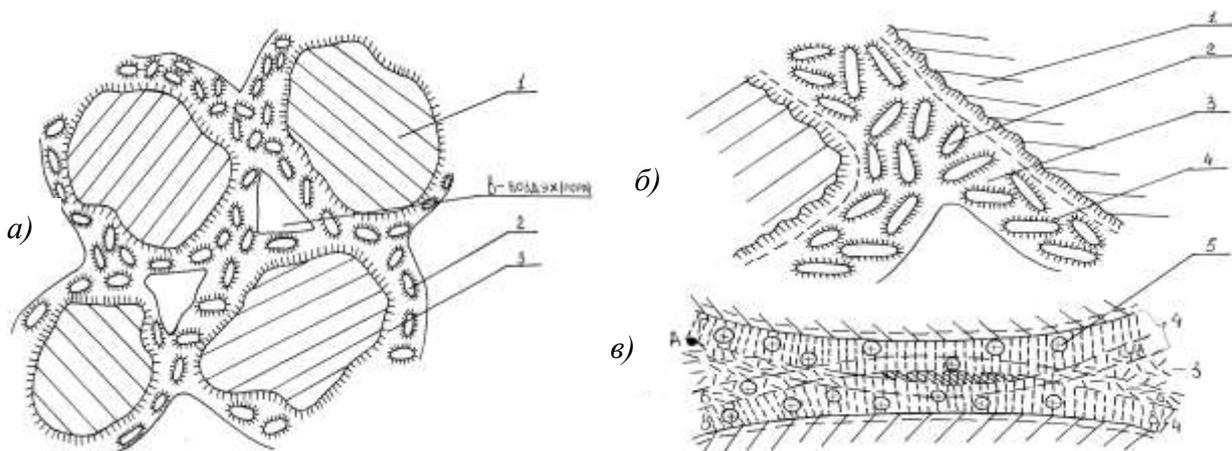


Рис. 8. Схема взаимодействия между составляющими формовочной смеси

Прочность формовочных смесей непосредственно связана с силами взаимодействия между двумя коллоидными частицами (мицеллами). По данным [1-3], ξ - потенциал гидрофобных коллоидных систем обычно изменяется в пределах 0,05-0,1 в. Силы взаимного притяжения между частицами могут преобладать над электростатическими силами отталкивания в случае, когда ξ - потенциал системы будет меньше 0,03 В.

Существенное значение на взаимодействие минеральной частицы смеси с водой оказывает неоднородность ее поверхности [1-3] в широком смысле (энергетическая, геометрические неровности, химическая и т.д.). Таким образом, на взаимодействие минеральной частицы смеси с водой оказывают влияние многие факторы, что приводит к изменению сил межмолекулярного взаимодействия [1-3].

7. Поверхностные явления в системе минеральная частица – вода – воздух

При межмолекулярном взаимодействии между водой и минеральной частицей вдоль линейной границы раздела частица – жидкость – газ (воздух) на твердой поверхности образуется краевой угол смачивания. Величина краевого угла смачивания минералов различна, что зависит от состояния поверхности того или иного минерала. На взаимодействие минеральной частицы с водой оказывают влияние находящиеся в воде ионы. Межмолекулярное взаимодействие воды с поверхностью минерала (адгезия) измеряется силой или работой на единицу площади контакта.

В системе минеральная частица – вода – воздух возникающие адгезионные силы связи количественно характеризуются величинами поверхностного и межфазного натяжений, а также значениям краевого угла смачивания (рис. 7).

Исследованиями [1-3] установлено, что краевой угол смачивания кварца находится в пределах от 0 до 10°. Тогда величина $\cos\theta$ изменится от 1 до 0, $W_A = 2\sigma_1$.

Согласно уравнению Дюпре, силы сцепления жидкой и твердой фаз могут быть выражены работой адгезии

$$W_A = \sigma_{жг}(1 + \cos\Theta),$$

где W_A - работа адгезии между жидкостью и твердым телом; $\sigma_{жг}$ - поверхностное натяжение жидкости на границе с газовой фазой; $\sigma_{жт}$ - межфазное натяжение на границе твердого тела с жидкостью; $\sigma_{гт}$ - поверхностное натяжение несмоченной поверхности твердого тела на границе с газовой фазой.

Принимая во внимание, что гидратный слой воды находится в «особо твердом» состоянии и имеет большее поверхностное натяжение, чем объемная вода, силы взаимодействия этого слоя с минеральной частицей будут значительно превосходить 2σ (145,6 эрг. см²). Следовательно, при отрыве пленки воды от минеральной частицы разрыв произойдет на участке объемной воды. При этом необходимо обратить внимание, что поверхность частиц кварца всегда покрыта различными веществами, способными существенно изменять величину адгезии контактирующих материалов.

Приведенные теоретические предпосылки дают возможность научно обоснованно объяснить влияние состава смесей, а также добавок на их прочностные характеристики.

8. Влияние на взаимодействие ориентации и размеров двух зерен песка, сцементированных коллоидными частицами глины

В свете рассмотренных закономерностей представляет значительный интерес рассмотрение физико-химических свойств агрегата, состоящего из двух зерен, сцементированных коллоидными частицами глины. Расстояние между зёрнами песка в уплотненных песча-

но-глинистых смесях достигает 12 - 15 мк [1 - 3]. Часть коллоидных частиц смеси будет находиться в зоне контакта зерен песка. В результате этого расстояние между минеральными частицами смеси будет значительно меньше, т.е. для некоторых контактных участков возможно соприкосновение гидратных слоев минеральных частичек, вода в которых имеет отличные от объемной свойства.

Ориентация диполей воды в адсорбированных слоях в результате молекулярного взаимодействия диполей воды с поверхностью частичек способствует образованию водородных связей между атомами водорода одного адсорбированного слоя с атомами кислорода другого адсорбированного слоя.

Таким образом, при сближении минеральных частиц смеси на расстояние порядка действия межмолекулярных сил, межмолекулярные силы взаимодействия между минеральными частицами заметно возрастают, и в этом существенную роль играют водородные связи.

Силы межмолекулярного притяжения между двумя сферическими частицами можно определять по формуле

$$\sigma_2 = 4\pi \cdot \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2},$$

где σ - сила притяжения между двумя частицами, дн; R_1 и R_2 - величина радиусов частиц, см; σ - поверхностная энергия на границе раздела между частицами и промежуточной сферой, дн/см.

Расчеты по указанной формуле, выполненные И.С. Лысенко, показывают, что межмолекулярные силы сцепления проявляются для частиц с размерами менее 50 мк, так как для частиц большого размера силы тяжести будут значительно превосходить силы межмолекулярного притяжения, что видно из табл. 3.

Таблица 3

Изменение молекулярных сил сцепления

Радиус частиц, см	Сила прилипания между двумя частицами, дн	Площадь проекции частицы, см ²	Число частиц, приходящееся на 1 см ²	Сила прилипания на 1 см ²		Вес частиц на 1 см ² кг
				дн	кг	
0,05	22,9	0,0079	130	1500	0,0015	0,0927
0,01	4,6	0,00031	3000	7000	0,007	0,045
0,005	2,3	0,000079	13000	15000	0,015	0,027
0,001	0,46	0,0000031	300000	70000	0,07	0,0051

Таким образом, выполненные теоретические исследования и лабораторные испытания указывает на наличие связи между уплотняемостью, текучестью и прочностью смесей с электрокинетическими явлениями, происходящими в формовочных смесях. Установленная зависимость расширяет наши представления о природе формирования физико-механических свойств песчано-глинистых смесей и позволяет глубже понять сущность процессов, протекающих при формообразовании.

Библиографический список

1. **Илларионов, И.Е.** Формовочные материалы и смеси / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. Чебоксары: Изд-во ЧувГУ, 1992. Ч. 1. – 223 с.; Ч. 2. – 288 с.
2. Металлофосфатные связующие и смеси / И.Е. Илларионов [и др.]. – Чебоксары: ЧТУ, 1995. – 524 с.
3. **Берг, П.П.** Формовочные материалы / П.П. Берг. –М.: МАШГИЗ, 1963. – 408 с.
4. О механизме формирования свойств формовочных смесей под действием электрических сил / И.Е. Илларионов [и др.] // Улучшение качества литья путем использования прогрессивных

- формовочных материалов, механизации и автоматизации технологических процессов. – Липецк, 1977. Вып. 2. С. 141–152.
5. **Васин, Ю.П.** Влияние крупности зерен песка на прочность формовочных и стержневых смесей // Изв. вузов. Сер. Черная металлургия. 1969. №12.
 6. **Гуляев, Б.Б.** Литейные процессы / Б.Б. Гуляев. – М.: МАШГИЗ, 1960. – 416 с.
 7. **Гуляев, Б.Б.** Формовочные процессы / Б.Б. Гуляев, О.А. Корнюшкин, А.В. Кузин. – Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ие. 1987. – 264 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.02.2011*

I.E. Ilarionov

THEORETICAL GROUNDS OF SHAPING OF PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES OF SANDY-ARGILLACEOUS MIXTURES.

Theoretical grounds of shaping of physical-mechanical properties of sandy mixtures, electrostatic energy of mineral corpuscles with water are in-process observed; pezo - and triboelectric effects and surface phenomenas in system, a mineral corpuscle - water - air.

Key words: sandy-argillaceous mixtures, electrostatic energy, water, polar fluid, underearth, arenaceous quartzes, triboelectric and the piezoelectric effects, a colloid particle, a micelle charge.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 543.9:257.1:518.5

В.М. Востоков¹, В.М. Смирнова¹, Г.Л. Дегтяренко²

ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОГО РИСКА БИОТЕХНОЛОГИЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Волжский государственный инженерно-педагогический университет²

Изучены особенности экологического риска биопроизводств. Выявлены оптимальные способы диагностики промышленных биоматериалов. На основе научных принципов и критериев количественной оценки биологических объектов, предложена методология выбора и научно-технической разработки оптимальных методов и средств инструментального экоконтроля и управления качеством промышленной биопродукции.

Ключевые слова: экологический риск, биопродукция, биологическая активность, экоаналитический контроль, система менеджмента качества.

В анализе многопараметровых и многофакторных биологических систем, к которым относится и продукция предприятий биотехнологического профиля, имеют место специфические особенности количественной оценки биологических объектов, без учета которых измеряемый аналитический сигнал уже не отвечает истинной величине контролируемого параметра качества.

Если для оценки качества и экологической безопасности химической продукции достаточно определить лишь массовую долю контролируемого ингредиента, то для диагностики биоматериалов уже потребуется одновременная оценка двух важнейших показателей качества: массовой доли биологически активного вещества (БАВ) и его биологической активности, выражаемой в международных единицах биологической (физиологической) активности *МЕ*.

Интерес к оценке величины биологической активности промышленных биоматериалов значительно возрос особенно после того, как выяснились, что основным загрязнителем биосферы являются вовсе не отходы и выбросы предприятий биотехнологического профиля, а сама генномодифицированная, недоброкачественная биопродукция, которая в условиях международной интеграции распространяется по разным регионам планеты, специфически воздействуя на биологические объекты тех или иных природно-климатических зон.

В отличие от загрязнения окружающей природной среды (ОПС) промышленными токсикантами, указанная биопродукция воздействует на объекты ОПС одновременно по двум направлениям: токсическому и генетическому, где более опасным и непредсказуемым является генетическое загрязнение биосферы.

Трудности достоверной оценки экологического риска предприятий биотехнологического профиля можно объяснить следующим. Если воздействие токсикантов на ОПС можно оценить по результатам локального (или глобального) экологического мониторинга, то экологическую нагрузку биопроизводства в настоящее время нельзя оценить по результатам экомониторинга “в поле”.

Наибольшие проблемы возникают при оценке негативного воздействия на объекты ОПС генномодифицированной биопродукции, вызывающей поражение механизма наслед-

ственности и мутации живого организма. К тому же указанное воздействие проявляется не сразу, иногда во втором, или третьем поколении.

Кстати, изменился взгляд на мутации, как на некую деградацию особи. Наоборот, фоновые мутации являются необходимой, составной частью естественного эволюционного процесса. Поэтому они не представляют серьезной опасности. В то же время очень опасно развитие острого мутагенеза, ведущего к гибели всей популяции, что уже является экологической катастрофой.

В данной ситуации для того, чтобы оценить суммарную экологическую нагрузку, например, предприятий микробиологического профиля, потребуется длительный глобальный мониторинг различных природных экосистем. Тем не менее, это не позволит оценить экологический риск отдельного биопроизводства.

Оптимальным решением указанной проблемы является априорная оценка экологического риска в рамках методологии *Prevention Pollution*, где оценку качества и генетической чистоты выпускаемой биопродукции осуществляют непосредственно на производстве, а именно, в заводской лаборатории (ЗЛ) с использованием стандартных методик, учетом специфики данного предприятия биотехнологического профиля и ожидаемого экологического ущерба.

Указанная методология оценки экологического риска позволяет управлять биотехнологическим процессом в отношении качества выпускаемой биопродукции. Одновременно по результатам выходного контроля можно выявлять экологический риск биопроизводства, оценивать качество выпускаемой биопродукции и проводить необходимые мероприятия по изменению биотехнологии с целью выпуска доброкачественной биопродукции.

Однако для создания комплексной, эффективно действующей системы менеджмента качества (СМК), в которой найдут отражение научные принципы и критерии количественной оценки биологических объектов, необходима разработка новых аналитических технологий, т.е. методов и средств измерений, отвечающих научным принципам количественной оценки биологических объектов (табл. 1).

Таблица 1

Научные принципы количественной оценки БАВ, реализованные в гибридных методиках выполнения измерений (МВИ) физико-химической диагностики биоматериалов

Принципы и условия количественной оценки БАВ	Область применения	Реализованы в методах анализа
Объективная оценка качества биопродукции, одновременно, по двум показателям качества: массовой доли контролируемого БАВ и его биоактивности	Экоаналитический контроль биопродукции	Гибридные методы ТСХ+флуориметрия ТСХ+фотометрия ВЭЖХ и т.д.
Предварительное разделение анализируемых объектов на две условных категории: БАВ-электролитов и БАВ-неэлектролитов	Анализ водных и неводных растворов БАВ	Инструментальная титриметрия Методы жидкостной хроматографии
Выполнение всех аналитических операций в предельно "мягких" условиях жидкой фазы, приближенных к условиям естественного течения биологического процесса	Контроль и диагностика биоматериалов	Физико-химический жидкофазный анализ
Аргументированный выбор оптимального метода диагностики биоматериалов по численным и атрибутивным критериям с учетом специфических особенностей анализа исследуемой биосистемы	Экомониторинг и диагностика биоматериалов	Гибридные методы анализа. Титриметрия. Хроматография. ВЭЖХ, ТСХ
Высокоинформативные методы анализа и гибридных МВИ диагностик биоматериалов, адекватных биопроцессу. Выбор приемлемого метода контроля по критерию адекватности биопроцессу, $K_{Am} = A_{\text{БАВ}}/m_{\text{БАВ}}$	Новые экоаналитические технологии	ТСХ и ВЭЖХ Неводное титрование. Экстракционные методы фотометрии и флуориметрии

В данном случае центром управления качеством биопродукции остается заводская лаборатория (ЗЛ), где реализуются аттестованные и стандартизованные, экспрессные, селективные и гибридные методики выполнения измерений (МВИ), адекватные биопроцессу, которые полностью отвечают указанным принципам физико-химической диагностики биоматериалов.

Адекватность МВИ биопроцессу по результатам определения массовой доли БАВ становится неременным условием достоверной оценки величины биологической активности. В работах [1-5], посвященных инструментальной диагностике биоматериалов, указаны особенности и трудности количественной оценки биологических объектов. Наибольшие затруднения возникают при численной оценке величины биологической активности выпускаемой биопродукции, когда потребуется выбор оптимального способа ее количественного определения, так как в реальных, жестких и нестерильных условиях производства под влиянием факторов внешнего воздействия величина биоактивности изменяется в достаточно широких пределах.

Из истории развития отечественной микробиологической промышленности известно, что в период становления промышленности микробиологического синтеза кормовых дрожжей для оценки качества выпускаемой биопродукции были реализованы биологические методы анализа, приемлемые лишь для стерильных условий микробиологической лаборатории НИИ. Но в условиях крупнотоннажного производства многие из них оказались неселективными и неэффективными. Поэтому их вскоре заменили на физико-химические методы инструментального контроля, уже апробированные в ЗЛ химического производства, что к стати не всегда правомерно.

Отказ от биологических методов непрерывного контроля объясняется прежде всего трудностями постановки биологического эксперимента в нестерильных условиях производства. Наряду с этим, биологические методы по своим метрологическим и техническим характеристикам (по точности и воспроизводимости результатов измерений, по селективности, экспрессности и трудоемкости) значительно уступают методам инструментального анализа и не отвечают современным требованиям метрологической аттестации.

Они оказались невостребованными в современных системах контроля и управления непрерывными технологическими процессами. Исходя из этого биологические методы производственного контроля не были стандартизованы и не получили распространения на предприятиях отрасли. В настоящее время их иногда применяют, например, в интегральной оценке токсичности проростков.

Развитие высокочувствительных и достаточно селективных, ферментативных, биосенсорных и иммунных методов анализа [1] открывает новые перспективы их дальнейшего практического использования в указанной сфере. Но для их реализации в комплексных системах контроля и управления качеством биопродукции потребуется решить целый ряд специфических задач. В первую очередь – проблему низкой воспроизводимости результатов биоконтроля в нестерильных условиях промышленного производства.

В отличие от биологических методов, методы физико-химической, инструментальной диагностики биоматериалов удовлетворяют нормам и требованиям метрологической аттестации и стандартизации. Они экспрессны, точны и воспроизводимы. С их помощью уже нетрудно осуществить дистанционный контроль непрерывного биотехнологического процесса. Поэтому инструментальные методы анализа остаются пока незаменимыми в комплексных автоматизированных системах контроля и управления качеством выпускаемой биопродукции. А применение достаточно чувствительных и точных методов физико-химической диагностики биоматериалов в значительной степени способствует получению достоверных результатов экоаналитического контроля. Это позволяет осуществить эффективное, внешнее управление биотехнологическим процессом, не полагаясь на генетическое его управление, как это принято сегодня, когда вмешательство человека в биопроцесс сводится к контролю

обсемененности сырья, производственных помещений и аппаратуры чужеродными микроорганизмами (Система *GMP*).

Система *GMP* удобна для управления качеством биопродукции специализированных, малотоннажных биопроизводств (производств лекарственных средств, бакпрепаратов и пр.) типа НПО, где строгое соблюдение санитарно-гигиенических норм обеспечивает выпуск безопасной продукции и достаточно высокого качества.

Подобные малые предприятия биотехнологического профиля при правильной организации работ не наносят значительного ущерба ОПС. Многотоннажные биотехнологические производства, включая предприятия агропромышленного комплекса, потенциально представляют экологическую опасность, так как они способны загрязнить биосферу генномодифицированной, недоброкачественной биопродукцией, если не будет создана комплексная система менеджмента качества и экологической безопасности, в которой отражены специфические особенности экоаналитического контроля биопроизводства и управления качеством выпускаемой биопродукции.

Практика показывает, что в жестких и нестерильных условиях крупнотоннажного биопроизводства не воспроизводится биотехнологический процесс, отработанный в стерильных и нормальных условиях научно-исследовательской лаборатории. В этом случае уже нельзя полагаться на генетическое управление биопроцессом, а потребуются активное вмешательство человека в контроль и управление биотехнологией путем ее корректирования по результатам промежуточного и выходного контроля.

С другой стороны, следует принимать во внимание, что управление биопроцессом по программе, заложенной в геном, остается главенствующим. Необоснованное вмешательство человека недопустимо. Здесь не может быть значимых систематических ошибок, поэтому в системе контроля востребованы доступные, но прецизионные методы инструментального контроля, адекватные данному технологическому процессу.

Однако следует принимать во внимание, что применение прецизионных анализаторов целевого предназначения не дает возможности решить все специфические проблемы достоверной оценки величины биологической активности. В данном случае, источником значимой систематической погрешности, характеризующей достоверность результатов измерений, скорее, является не измерительный прибор, а применяемая в контроле биопроизводства методика МВИ, если она не адекватна биотехнологическому процессу.

К наиболее достоверным методам контроля качества биопродукции относятся те методы и средства экоаналитического контроля и диагностики биоматериалов, в которых отражены специфические особенности, принципы и критерии количественной оценки биологических объектов (табл. 1). Лишь строгое соблюдение принципа адекватности МВИ биопроцессу позволяет достоверно оценить численное значение величины биологической активности, которую принято считать важнейшим показателем качества и экологической безопасности выпускаемой биопродукции, наряду с иным показателем ее качества - массовой долей контролируемого ингредиента.

Как известно, критерием достоверности результатов измерений является величина систематической погрешности. Следовательно, по указанному критерию можно сделать правильный выбор метода диагностики биопродукции, адекватного биопроцессу. Но в диагностике биоматериалов одновременно измеряют оба указанных показателя качества биопродукции.

Несоответствие указанных величин биоактивности и массовой доли БАВ является источником значимой систематической погрешности результатов экоконтроля, а численное соотношение величины может быть использовано в качестве критерия адекватности биопроцессу МВИ физико-химической диагностики биоматериалов:

$$K_{A/m} = A_{\text{БАВ}} / m_{\text{БАВ}}, \quad (1)$$

где $K_{A/m}$ – численный критерий адекватности МВИ биотехнологическому процессу; $A_{\text{БАВ}}$ – значение величины биологической (физиологической) активности контролируемого БАВ,

выраженное в межд. ед. биоактивности ME ; $m_{\text{БАВ}}$ – массовая доля определяемого БАВ в анализируемом образце биопродукции.

Рассмотрим основные причины возможного несоответствия указанных величин $A_{\text{БАВ}}$ и $m_{\text{БАВ}}$, которое свидетельствует о неадекватности МВИ биопроцессу.

Как видно из формулы (1), указанное численное соотношение может изменяться, если меняется численное значение одного из показателей качества или обе величины значительно изменяются в ходе анализа. Требуется выяснить, какая из контролируемых величин имеет стабильное значение и какая из них значительно влияет на критерий адекватности биопроцессу – $K_{A/m}$?

Чтобы ответить на указанные вопросы, потребовалось изучить условия и факторы влияния на величины $A_{\text{БАВ}}$ и $m_{\text{БАВ}}$ в условиях естественного метаболизма БАВ в равновесных многофакторных биосистемах. Оказалось, что именно биологическая (физиологическая) активность БАВ может изменяться в достаточно широких пределах. В то же время, величина массовой доли БАВ ($m_{\text{БАВ}}$) остается практически неизменной как при таутомерном превращении одной активной формы БАВ в другую, так и при деструктивном превращении данного соединения в ходе метаболизма.

В работах [2, 3] на примерах инструментального анализа витаминов, были выявлены основные причины неадекватного изменения величины биологической активности в равновесной биосистеме. Так, по результатам хроматографической оценки содержания водо- и жирорастворимых витаминов в разнообразном комбикормовом сырье были выявлены основные причины численного несоответствия контролируемых величин $A_{\text{БАВ}}$ и $m_{\text{БАВ}}$, что вызывает систематическую погрешность результатов экоконтроля биопродукции.

Численное несоответствие величин $A_{\text{БАВ}}$ и $m_{\text{БАВ}}$ обусловлено следующими факторами внешнего воздействия на величину биологической активности:

- биохимический синергизм биологически активных веществ;
- наличие или отсутствие в биосистеме специфических коферментов, влияющих на общую биологическую активность.
- термодинамические факторы влияния на равновесное состояние биосистемы;
- несоблюдение санитарных норм, включая нормы обсемененности чужеродными микроорганизмами;
- некорректная оценка биоактивности, когда реальный физиологический эффект отличается от ожидаемого, так как продукцию используют не по назначению;
- систематическая погрешность результатов определения массовой доли БАВ, обусловленная неверным выбором метода анализа, что может быть причиной неадекватности метода биопроцессу.

В ранее выполненных работах [2–5] впервые было указано на то, что практикуемая ныне оценка численного значения величины биологической активности БАВ по найденной величине его массовой доли не всегда бывает корректной. Это обусловлено тем, что под влиянием тех или иных факторов внешнего воздействия на биологическую активность БАВ изменяется ее численное значение $A_{\text{БАВ}}$. Соответственно меняется численное соотношение $K_{A/m} = A_{\text{БАВ}} / m_{\text{БАВ}}$, так как $m_{\text{БАВ}}$ – массовая доля указанного БАВ остается неизменной.

Также в указанных работах, посвященных анализу разнообразной пищевой, кормовой и фармацевтической продукции на содержание в ней витаминов, были установлены факторы влияния на величину витаминной активности, важнейшим из которых является специфический фактор синергентного воздействия одного витамина на биологическую активность другого.

Именно биологический синергизм отличает БАВ от других органических веществ, не проявляющих биохимических свойств. Так, водорастворимый витамин B_c (фолиевая кислота) проявляет B -витаминную активность только в присутствии аскорбиновой кислоты (водорастворимого витамина C), обладающего антиоксидантными биохимическими свойствами. В присутствии указанного антиоксиданта фолиевая кислота переходит в наиболее активную, восстановленную форму.

Кстати, жирорастворимые антиоксиданты (токоферолы, ретинол и т.д.) уже не оказывают синергетного воздействия на *B*-витаминную активность фолиевой кислоты, так как они, находясь в различных фазах, не контактируют с ней, что в целом указывает на многообразие факторов влияния на биологическую активность. Так, антиоксидантная активность жирорастворимого витамина *A* существенно зависит от того, в какой метаболической форме он находится.

В отличие от фолиевой кислоты, жирорастворимый витамин *A* представляет собой целое семейство природных соединений, обладающих *A*-витаминной активностью. Это ретинол, ретиналь, ретиноевая кислота, большая группа каротиноидов, в которой наибольшей активностью обладает β -каротин.

Все указанные провитамины и метаболиты витамина *A* не только обладают различной биоактивностью, но и отличаются по молекулярной массе. Следовательно, в ходе равновесного превращения одной активной формы в другую наблюдается изменение как величины биологической активности, так и массовой доли витамина *A*. Но если обе контролируемые величины не коррелируют между собой, то при оценке качества биопродукции по указанным показателям возникает систематическая погрешность измерений, доказывающая неправомерность оценки величины биологической активности по массовой доле витамина *A*.

Тем не менее, в практике аналитического контроля витаминной продукции применяется простой и доступный способ численной оценки суммарной *A*-витаминной активности. Ее вычисляют в пересчете на наиболее активную форму витамина *A* - ретинол, где за единицу витаминной активности (*1ME*) принимается масса ретинола, равная 0,3 мг.

Подобный прием широко применяется с целью вычисления биоактивности других витаминов (*D*, *E*, *B*₁₂ и др.) по массовой доле более активной формы БАВ. Хотя это не всегда дает объективную оценку данного показателя. Правильнее вычислять суммарную величину биоактивности по аддитивным значениям биоактивности каждого метаболита.

В этом случае также могут возникнуть источники систематической погрешности, обусловленные тем, что некоторые метаболиты обладают специфическими биохимическими свойствами, имеют особое физиологическое предназначение, по-разному усваиваются живыми организмами и т.д.

Кстати, ретинол, по массе которого вычисляют антиоксидантную активность витамина *A*, участвует в других биохимических процессах субклеточного обмена веществ. В частности, он является строительным материалом в синтезе зрительного пигмента – родопсина, необходимого для зрения. Возникает проблема выбора шкалы, по которой можно оценить указанную биологическую активность витамина *A*? Эта проблема, касающаяся стандартизации методов количественной оценки биологической активности той или иной витаминной продукции, в настоящее время требует своего решения. Вероятно, что нет единого эталона витаминной активности и единых норм ПДК, которые могут быть установлены по верхнему и нижнему пределу содержания витаминов с учетом их целевого предназначения. Так, витамин *D* способствует усвоению кальция и фосфора, без которых не может развиваться живой организм. К его активным формам относят эргокальциферол (вит.*D*₂) и холекальциферол (вит.*D*₃). Однако при оценке качества и экологической безопасности концентрата витамина *D*, используемого для кормления сельскохозяйственных животных и птицы, всегда необходимо помнить о том, что птица лучше усваивает витамин *D*₃, который бесполезен в кормлении крупного рогатого скота, так как он не усваивается жвачными животными, а в больших количествах является токсикантом.

В корма для животноводства добавляют эргокальциферол (вит.*D*₂), содержание которого в кормах и в пищевых продуктах не должно быть выше или ниже допустимых норм, так как избыток витамина *D* не менее опасен для живого организма, чем его недостаток. Нормы ПДК не могут быть одинаковыми для различных животных и птицы.

Указанные примеры наглядно демонстрируют особенности и трудности достоверной количественной оценки величины биологической активности как основного показателя каче-

ства выпускаемой биопродукции, без которого уже невозможно оценить экологический риск биотехнологического производства. А практикуемый ныне прямой перенос в сферу биопроизводства той или иной МВИ инструментальной диагностики материалов, успешно апробированной в ЗЛ химического производства, лишь тогда будет корректным техническим решением, если указанная МВИ адекватна биопроцессу.

Учитывая, что использование методов и средств экоаналитического контроля, не позволяющих в достаточной степени оценить качество и экологическую безопасность выпускаемой биопродукции, может привести к непредсказуемым последствиям, нами предложена методология выбора оптимального метода физико-химической диагностики биоматериалов по принципам и критериям количественной оценки биологических объектов, указанных в табл. 1.

В качестве примера практической реализации указанных принципов рассмотрим одну из методик хроматографической диагностики кормового концентрата B_{12} , созданную на основе обращено-фазного метода высокоэффективной жидкостной хроматографии (ВЭЖХ).

Выбор метода высокоэффективной жидкостной хроматографии был продиктован следующими основополагающими принципами количественного определения БАВ-неэлектролитов:

- 1) принцип предварительного разделения анализируемых объектов на две различные категории биологически активных веществ: БАВ-электролитов и БАВ-неэлектролитов;
- 2) принцип выполнения всех аналитических операций в предельно "мягких" термодинамических условиях жидкой фазы, максимально приближенных к условиям естественного протекания биопроцесса;
- 3) приоритет использования гибридных методов и методик выполнения измерений;
- 4) принцип аргументированного выбора оптимального метода контроля и физико-химической диагностики биоматериалов, адекватного биопроцессу, с учетом специфических особенностей исследуемой биосистемы по численным и атрибутивным критериям количественного определения, объективно и достоверно характеризующим информационно-аналитические возможности данного метода.

В частности, в ходе разработки МВИ приемлемой для хроматографического контроля качества витаминной биопродукции, выпускаемой Ефремовским БХЗ, реализованы принципы и критерии количественной оценки витамина B_{12} , которыми руководствовались при выборе метода экоаналитического контроля.

В данном случае для достоверной оценки суммарной B_{12} -витаминной активности кормового концентрата B_{12} потребуется определить массовые доли трех наиболее активных форм указанного витамина. Это фактор B , фактор Ш и цианкобаламин. Затем по аддитивному вкладу каждого из трех указанных метаболитов витамина B_{12} оценивается витаминная активность кормового концентрата B_{12} . Это дает возможность точнее оценить витаминную активность концентрата, по сравнению с методом определения по массовой доле цианкобаламина, который, хотя и является наиболее активной формой, но содержание его в концентрате соизмеримо с содержаниями менее активных форм-метаболитов, аддитивным вкладом которых в суммарную биоактивность не следует пренебрегать.

Принципиальная схема определения интегрального значения B_{12} -витаминной активности кормового концентрата проводилось с применением хроматографического анализа.

На рис. 1 приведена хроматограмма стандартной модельной смеси трех указанных наиболее активных форм витамина B_{12} , а на рис. 2 - хроматограмма экстракта кормового концентрата B_{12} . Путем их сопоставления идентифицируются пики цианкобаламина, фактора B и фактора Ш. По высоте пиков на хроматограмме экстракта и соответствующих пиков стандарта вычисляют массовую долю того или иного метаболита. Далее по численным значениям их индивидуальной активности уже нетрудно вычислить аддитивный вклад каждого провитамина, а затем интегральное значение B_{12} -витаминной активности кормового концентрата.

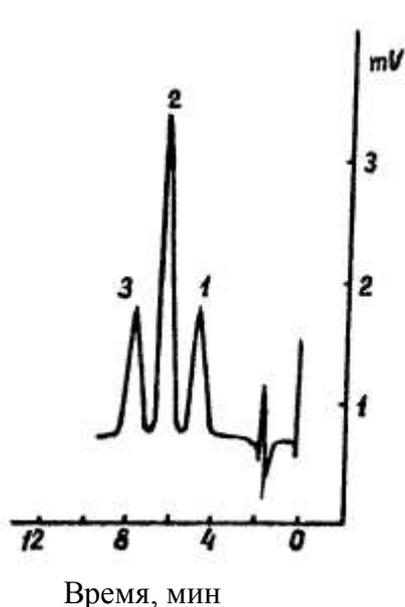


Рис.1. Хроматограмма модельной смеси трех активных форм витамина B_{12} :

1 – фактор B; 2 – фактор III;
3 – цианкобаламин

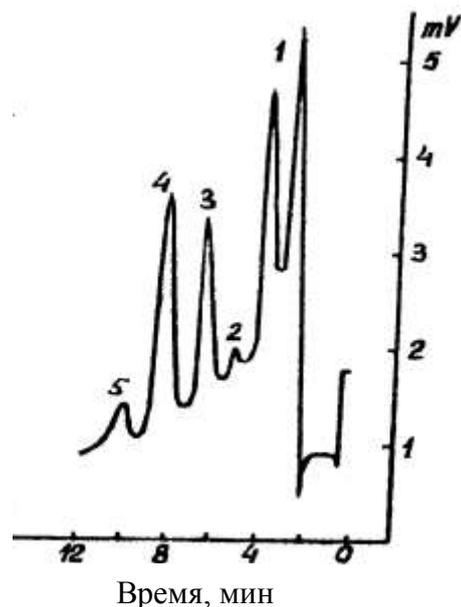


Рис.2. Хроматограмма экстракта кормового концентрата витамина B_{12} :

1, 2 – неидентифицированные пики;
3 – фактор B; 4 – фактор III;
5 – цианкобаламин

Разработка подобных МВИ, адекватных биопроцессу, и внедрение их в СМК биопроизводства позволяет решать острые и актуальные проблемы статистического управления качеством [6-8] и априорной оценки экологического риска предприятий биотехнологического профиля достаточно простыми и доступными средствами.

Выводы

1. Показана возможность эффективного управления биотехнологическим процессом по результатам инструментального контроля и физико-химической диагностики промышленных биосубстратов с учетом специфических особенностей количественной оценки биологических объектов.

2. Указано на то, что методы инструментального контроля, успешно апробированные в химическом производстве, часто непригодны для физико-химической диагностики биоматериалов и контроля биотехнологического процесса.

3. Выявлены специфические особенности диагностики биоматериалов и установлены научные принципы и критерии инструментального анализа многофакторных биосистем.

4. Предложена концептуально новая методология выбора оптимального метода инструментального контроля биопроизводства и научно-технической разработки МВИ, адекватная данному биопроцессу, в которой реализованы установленные принципы и критерии количественной оценки биологических объектов.

Библиографический список

1. Проблемы аналитической химии. Т. 12. Биохимические методы анализа; под ред. Б.Б. Дзантиева. – М.: Ин-т им. А.Н. Баха РАН. 2010. – 391 с.
2. **Востоков, В.М.** Хроматографический контроль биохимической активности жирорастворимых витаминов (A,D,E) в пищевой и кормовой продукции / В.М. Востоков, В.Р. Карташов // Изв. вузов. Сер. Химия и хим. технологии 2006. Т. 49. №4. С. 115–118.

3. **Востоков, В.М.** Научные принципы выбора физико-химических методов анализа и их реализация при разработке систем контроля биотехнологических производств / В.М. Востоков, С.А. Плохов // Н.Новгород. Деп. в ВИНТИ 29.12.2006. № 1640-В 2006. – 6 с.
4. **Востоков, В.М.** Особенности метрологической оценки результатов аналитического контроля биотехнологий / В.М. Востоков, А.П. Арбатский // Изв. вузов. Поволжск. регион. Сер. Химия. 2005. № 6. С. 231–240.
5. **Востоков, В.М.** Аналитический контроль содержания протеинов в продукции предприятий микробиологического синтеза кормового белка / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин, В.Р. Карташов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. Вып. 3. С. 21–24.
6. **Гличев, А.В.** Основы управления качеством продукции / А.В. Гличев. – М.: РИА «Стандарты и качество». 2001. – 424 с.
7. **Востоков, В.М.** Статистическое управление биопроизводством / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин // Стандарты и качество. 2006. № 5. С. 42–44.
8. **Востоков, В.М.** Статистическое управление биопроизводством. / В.М. Востоков, Е.Г. Ивашкин // Химия и химич. технология: межвуз. сб. / НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород. 2007. Т. 60. С. 98–102.

*Дата поступления
в редакцию 11.02.2011*

V.M. Vostokov, V.M. Smirnova, G.L. Degterenko

THE ENVIRONMENTAL RISK ASSESSMENT OF BIOTECHNOLOGY

At typical examples ecoanalytical quality control companies biosynthesis of feed protein, vitamin concentrates and other biologically active substances are shown the specific features of the analysis of biological objects and ecological risk assessment bio. Identified the principles and criteria for quantitative evaluation of biological objects. The need to create complex systems ecoanalytical control, consistent with the principles and criteria for environmental safety of bio.

Key words: environmental risk, bioproductivity, biological activity, ecoanalytical control, quality management.

УДК 661.419

М.И. Никандров, И.С. Никандров

ИССЛЕДОВАНИЕ ОЧИСТКИ ПЕЧНЫХ ГАЗОВ, ОБЕЗВРЕЖИВАНИЕ ОТХОДОВ ПРОИЗВОДСТВА ХЛОРОРГАНИЧЕСКИХ ВЕЩЕСТВ ПРОМЫВКОЙ СОЛЯНОЙ КИСЛОТОЙ ПЕРЕД ПЕРЕРАБОТКОЙ ГАЗОВ В ХЛОРИД АММОНИЯ

ООО «Волгаоргхим»

Показан состав примесей в печных газах установки обезвреживания отходов, Определены параметры массопередачи при выделении соляной кислоты в процессе охлаждения газов. Дана технологическая схема.

Ключевые слова: абгазы, хлористый водород, хлор, трихлорид азота, абсорбция, массопередача.

Наличие потребности в хлориде аммония объясняет целесообразность создания гибкой технологии получения на основе отходящих печных газов гаммы продуктов, включая соляную кислоту, хлорид аммония, хлорид цинка и др.

Обычно хлористый аммоний получают либо на основе товарной соляной кислоты, либо с использованием синтетического хлористого водорода [1] нейтрализацией аммиаком. Печные газы от обезвреживания газов и кубовых остатков производства хлорсодержащих органических материалов в печи сжигания характеризуется относительно малой долей хлористого водорода и большим содержанием примесных компонентов (оксид углерода (IV), водяные пары, хлор и др.). Присутствие примесей в печном газе накладывает дополнительные ограничения на технологический процесс, поскольку требования к товарному хлористому аммонiu остаются аналогичными, как и при синтезе хлорида из качественной кислоты или чистого синтетического хлористого водорода.

Таблица 1

Требования к хлористому аммонiu по ГОСТ 2210-73

Наименование показателя	Норма по ГОСТ	
	I сорт	II сорт
Доля хлорида аммония, % не менее	99,6	99,0
Доля влаги, % не более	0,2	1,0
Доля хлорида натрия, % не более	0,05	0,1
Доля карбонатов, % не более	0,01	0,025
Доля железа, % не более	0,003	0,01
Доля тяжелых металлов, % не более	0,0005	0,0025
Доля нерастворимых в воде, % не более	0,02	0,05
Доля сульфатов, % не более	0,05	0,1

Разработана циркуляционная технология хлористого аммония из печных газов в которой стадии абсорбции хлористого водорода и стадии нейтрализации разобщены и проходят в отдельных аппаратах, а для снижения теплового напряжения на единицу объема реакционно-го оборудования процессы ведут с циркуляцией большого объема возвратного маточного раствора.

Исследованием давления паров аммиака динамическим методом под водными растворами в системе $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl-H}_2\text{O}$ установлено (рис. 1), что давление аммиака под чистым раствором хлорида аммония равно нулю, но оно возрастает с увеличением доли свободного аммиака в изученной системе.

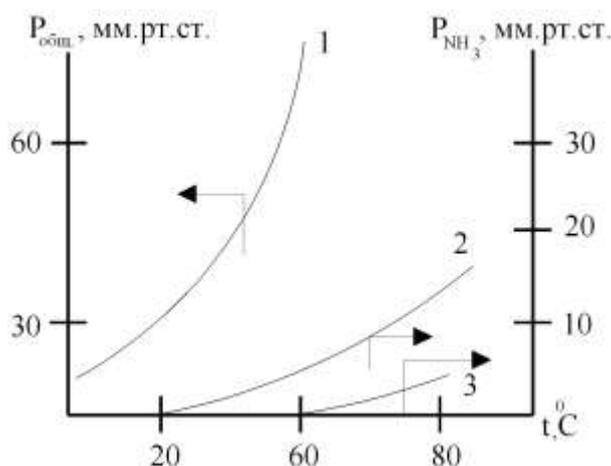


Рис. 1. Давление паров общее(1) и давление паров аммиака при содержании аммиака в растворе хлорида аммония (2-10 г/л, 3-1 г/л)

Растворимость аммиака в растворах хлорида аммония концентрацией 26-35% масс. при температуре 90°C составляет 3,3-2,6%. Растворимость хлористого водорода в растворах хлорида аммония концентрацией 26-35% масс. меняется соответственно в пределах 7,8-8,6% при температуре $70-90^{\circ}\text{C}$. Растворимость оксида углерода (IV) в растворах хлорида аммония концентрацией 26-35% масс. при температуре 70°C и парциальной доле CO_2 в газе 20% об. составляет 0,0014% масс.

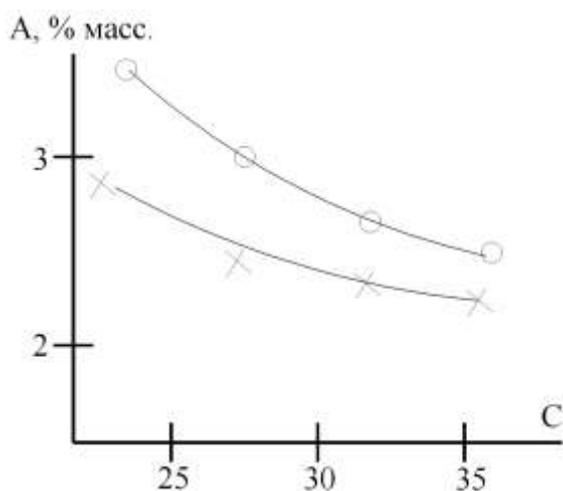


Рис. 2. Растворимость аммиака (А, % масс.) в растворах хлорида аммония концентрацией (С, % масс.) при температуре 70 (1) и 90°C (2)

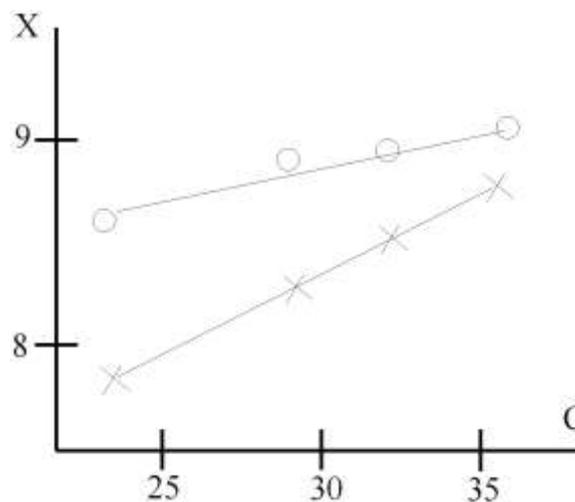


Рис. 3. Растворимость хлористого водорода (Х, % масс.) в растворах хлорида аммония (С, % масс.) при температуре 70 (1) и 90°C (2)

Снижение растворимости аммиака с ростом доли хлорида аммония в водном растворе связано, очевидно, с явлением высаливающего эффекта в совместных растворах.

Как видно из рис. 3, хлорид аммония в совместном растворе способствует увеличению растворимости хлоридного водорода, несмотря на общность иона хлорида. Это связано, видимо, с относительно малой способностью хлорид иона к образованию стойких гидратных оболочек вследствие слабого сродства к молекулам воды.

Растворимость оксида углерода (IV) в растворах системы $\text{NH}_3\text{-NH}_4\text{Cl}$ резко возрастает с увеличением доли свободного аммиака и для раствора с долей аммиака 0,6 % составляют 0,72% масс.

К увеличению доли соляной кислоты в совместном с хлоридом аммония растворе с 0

до 3% масс. растворимость оксида углерода (IV) снижается в 16 раз. Все это указывает на возможность при определенных условиях выделения хлористого водорода из газов без извлечения оксида углерода. При огневом обезвреживании абгазов протекает взаимодействие



Константа равновесия реакции (1) равна [2]

$$K_p = \frac{P_{\text{HCl}}^2 * P_{\text{O}_2}^4}{P_{\text{H}_2\text{O}} * P_{\text{Cl}_2}}.$$

При температуре 1200⁰С для данной реакции $\lg K_p = 30$. Следовательно, для постоянных парциальных давлений, характерных для состава реального печного газа ($P_{\text{H}_2\text{O}}=0,015$ МПа, $P_{\text{HCl}}=70,036$ МПа и $P_{\text{O}_2}=0,002$ МПа), P_{Cl_2} на выходе из камеры сгорания не превышает $0,26 \cdot 10^{-41}$ МПа. Доля хлора, свободного в печных газах при обеспечении скорости заковки, не должна превышать 10⁻⁴⁰% об.

Заметное количество хлора в газе появляется лишь при температуре в циклонной печи менее 600⁰С, что противоречит техническому регламенту, либо при низкой скорости заковки газов в котле-утилизаторе в интервале температур 600-400⁰С, либо при наличии разрушения целостности футеровки печи и образовании “свищей” и байпасных ходов газа между футеровкой и кожухом печи. При этом доля хлора может достигать 0,1-0,15% об.

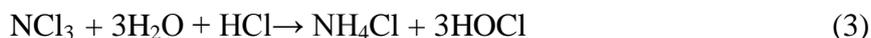
Поскольку растворимость хлора в воде при 20-80⁰С достигает значений 1,2-2,3% масс., то основная часть образовавшегося или проскочившего печь хлора переходит в соляную кислоту, образуящуюся на первой стадии абсорбции хлористого водорода из печных газов. Получаемая кислота возможно не будет удовлетворять требованиям ТУ 6-01-04689381-80-92 (массовая доля хлора не более 0,005%).

Таким образом, основными условиями исключения образования трихлорида азота как в котле-утилизаторе, так и абсорберах, является: отсутствие хлора в печном газе, что гарантирует автоматическим поддержанием температуры в печи 1200 ± 15^0 С и отсутствие свободного аммиака в орошающем абсорберы щелоче.

При низкой скорости заковки газов может проходить взаимодействие хлора с азотом по реакции

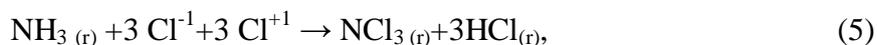


Тогда на стадии абсорбции хлористого водорода с получением соляной кислоты будет идти поглощение трихлорида азота



с образованием хлорноватистой кислоты, удаляемой с кислотой после растворения.

Если орошающий циркуляционный раствор хлорид аммония на стадии абсорбции хлористого водорода при производстве нашатыря будет содержать сводный аммиак, то существует возможность протекания также и следующих взаимодействий:



Дымовые газы печей огневого обезвреживания отходов производства хлорорганических веществ содержат: хлористый водород 26-35% об., водяной пар 14-16% об., кислород 2,5-3% об., азот 45-53% об. и оксид углерода 3-4,5% об.. Колебания состава газов в указанных пределах связаны с неритмичностью подачи в печь жидких отходов и газов дыхания емкостей и аппаратов. Подача газовых отходов в стадии хлорирования и гидрирования относи-

тельно постоянна. Для исключения образования хлорноватистой кислоты на стадии абсорбирования хлористого водорода циркулирующим раствором хлорида-аммония печные газы следует очистить промывкой их раствором соляной кислоты. Поэтому после котла-утилизатора газы необходимо охладить в воздушном теплообменнике до температуры (140-150°C) выше точки россы (110°C), исключающей образование соляной кислоты при конденсации паров воды, и затем до 80-85°C в кожухоблочном графитовом теплообменнике. В данном теплообменнике при этом конденсируется основная масса паров воды с образованием 29-30% массы соляной кислоты, которая вместе с газами может поступать на абсорбцию хлористого водорода в графитовом трубчатом пленочном абсорбере.

При подаче прямого тока сверху и достижении на выходе, температуре 70-78°C, выходящая снизу абсорбера кислота содержит примерно 31,5% масс. хлористого водорода и может использоваться и качестве технической соляной кислоты. В этой кислоте собираются все примесные соединения, поступающие с печным газом. Взвешенные твердые частицы «осола» и другие примеси печной газ после соляно-кислотной промывки не содержит, и в нем находится 25-27% об. хлористого водорода. Динамическим методом определены составы кислот при охлаждении до температуры 75°C газов, содержащих хлористый водород. Газы получали насыщением азота, пропускаемого со скоростью 500 мл/ч через соляную кислоту соответствующей консистенции, нагретую до 95-100°C.

Газовый поток пропускали через пустую дрексельную склянку, помещенную в термостат с температура 75°C. Образовавшийся конденсат взвешивали и анализировали. Как видно из рис. 4, концентрация кислоты, образующиеся в теплообменнике перед водной абсорбцией определяется составом печного газа. Изменение доли хлористого водорода и воды носит, судя по полученным данным, весьма сложный характер. Поскольку подача природного газа в печь огневого обезжиривания и доля отходящих газов стадии гидрирования относительно постоянны, то доля воды в печных газах меняется мало и находится на уровне 14-16% об. Более показательное влияние состава печного газа отражается зависимостью отношения концентрации или парциальных давлений хлористого водорода, представлено на рис. 5. Данная зависимость не линейна, а носит степенной характер с увеличением доли воды в газе в два раза.

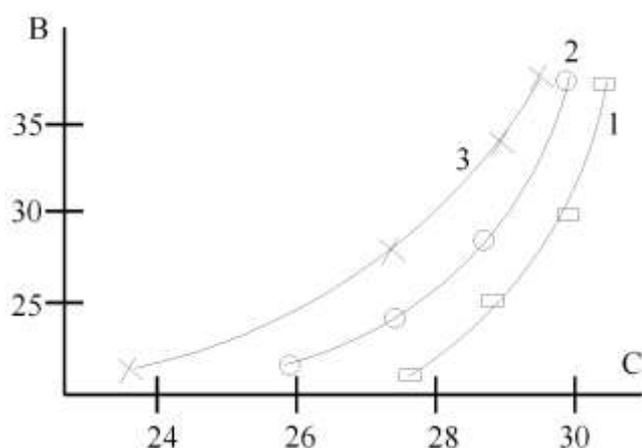


Рис. 4. Зависимость концентрации конденсата кислоты C (% масс.) от доли хлористого водорода в газе B (% масс.) при доле паров в газе 12(1) 14(2) и 16%(3) масс.

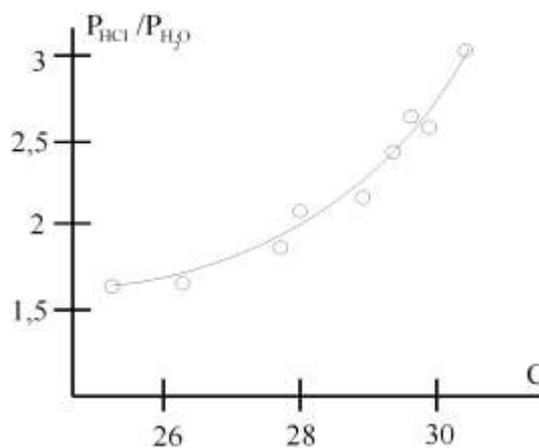


Рис. 5. Зависимость концентрации кислоты на выходе из теплообменника C (% масс.) от отношения парциальных давлений хлористого водорода и воды в печном газе

Концентрация кислоты уменьшается с 30 до 26% масс., одновременно несколько снижается и масса образующейся кислоты в 1,2 раза.

Схема узла абсорбции хлористого водорода водой приведена на рис. 5.

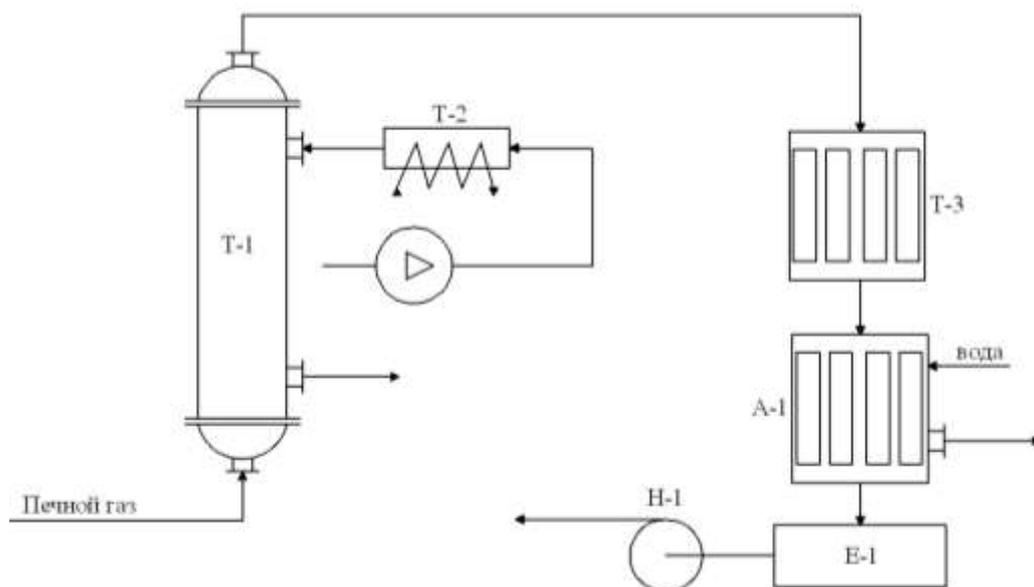


Рис. 5. Технологическая схема абсорбции хлористого водорода водой

Печной газ из котла-утилизатора с температурой 300 °С охлаждается в кожухотрубном теплообменнике Т-1 до 140-150 °С. Здесь исключается конденсация паров воды и образование соляной кислоты поскольку температура не достигает «точки росы» (108-110 °С). В теплообменник Т-1 подается воздуходувкой В-1 охлаждающий воздух с температурой 20-30 °С. В зимний период воздух дополнительно подогревается паром в теплообменнике В-2 до температуры 40 °С. Этот воздух с температурой 80-85 °С используется затем для подсушки товарного хлорида аммония до остаточной влажности менее 0,2% масс.

Далее печные газы охлаждаются в трубчатом графитовом теплообменнике Т-3 до температуры 80-85 °С и в графитовом теплообменнике-абсорбере А-1 до температуры 75-78 °С. Оба теплообменника охлаждаются обратной водой с начальной температурой 28 °С.

В теплообменнике Т-3 конденсируется основная часть водяных паров, приходящих с печным газом. В нем образуется соляная кислота с долей хлористого водорода 28-29% масс. Кислота вместе с газом поступает в верхнюю часть теплообменника-абсорбера А-1, куда подается прямооток с газами и умягченная вода. Выходящая из теплообменника кислота содержит 31,5% масс. хлористого водорода. Она собирается в емкость Е-1, откуда насосом Н-1 перекачивается на склад. Печной газ, уходящий из абсорбера А-1, содержит 24-17% об.

Теплообменник-абсорбер А-1 представляет собой кожухотрубчатый графитовый теплообменник (рис. 6) с плавающей головкой. В нем трубчатый пучок, заключенный в металлический кожух, состоит из графитовых труб, трубных решеток и поперечных перегородок. В верхней трубчатой решетке установлены распределительные колпачки с прорезями для пленочного распределения кислоты по трубам. Поверхность теплообменника Т-3 равна 56 м², абсорбера А-1 98 м². При прямоотке печного газа и кислоты в трубках в абсорбере достигается средний коэффициент массы передачи $K_u=0,00011$ Кмоль/(м²с). Коэффициент теплопередачи в теплообменнике-абсорбере составляет примерно 300 Вт/(м²К). Число Рейнольдса газового потока равно 3800 – 4000, число Прандтля газового потока 0,7-0,8 и число Нуссельта газового потока $(12-14) \cdot 10^{-6}$.

Коэффициент массоотдачи хлористого водорода из газового потока к поверхности раздела фаз $\beta_r=0,0003-0,0004$ м/с, $\beta_y=0,00012-0,00013$ Кмоль/(м²с). Коэффициент массоотдачи хлористого водорода по поверхности раздела фаз в пленку абсорбента $\beta_{ж}=(2-2,6) \cdot 10^{-5}$ м/с, $\beta_x=0,00013-0,00015$ к моль/(м²с).

Библиографический список

1. **Позине, М.Е.** Технология минеральных солей / М.Е. Позине. – 4-е изд. – П: Химия, 1974. – 860 с.
2. **Левинский, М.Е.** Хлористый водород и соляная кислота / М.Е. Левинский, А.Ф. Мазанко, И.Н. Новиков. – М.: Химия, 1985. – 160 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.02.2011*

M.I. Nikandrov, I.S. Nikandrov

**INVESTIGATION OF TREATMENT FURNACE GASES NEUTRALIZATION OF WASTE
PRODUCTION ORGANOCHLORIN COMPOUNDS BY WASHING WITH
HYDROCHLORIC ACID BEFORE PROCESSING GASES IN AMMONIUM CHLORIDE**

Fining furnace gas end absorption hydrogen chloride is studding. Technological cheme of production chlor hydria acid's is giving.

Key words: furnace gas, fining, hydrogen chloride, absorption, water, chlorhydric acid, production.

УДК 66.099.2.631

А.С. Борисенко, Н.В. Ксандров

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ РЕСУРСОСБЕРЕГАЮЩАЯ ПЕРЕРАБОТКА СЕРНОКИСЛОТНЫХ РАСТВОРОВ

Исследованы способы комплексной утилизации азотносернокислотных и солевых жидких отходов и безотходной технологии их переработки в высококачественные товарные продукты. На основе исследований статики и кинетики совмещенных процессов разработана оптимальная технология утилизации отработанной серной кислоты и предложена методологическая концепция создания региональных циклических систем регенерации с комплексным решением вопросов охраны окружающей среды.

Ключевые слова: отработанная серная кислота, олеум, денитрация, регенерация, степень восстановления, утилизация.

Для осуществления технологических процессов на предприятиях различных отраслей требуется применение олеума концентрацией ~ 19% SO₃ (своб.). В результате основной деятельности получают токсичные отходы производства в виде 65-68% серной кислоты в количествах, адекватных количеству потребляемого олеума (в пересчете на моногидрат), которую необходимо денитрировать, упарить до концентрации 92-93%, залить в железнодорожные цистерны и отправить на заводы, производящие минеральные удобрения, поскольку в собственных производствах указанная серная кислота используется в ограниченных количествах. Таким образом, если завозить на предприятие олеум со стороны или производить его на месте классическими методами (из серного колчедана или элементарной серы), возникает необходимость в кооперировании с целым рядом других предприятий и организаций крупномасштабных встречных перевозок (на предприятие идет олеум или содержащее серу сырье, а с предприятия упаренная серная кислота, огарок). Кроме того, необходимость упарки кислоты до купоросного масла связана с расходом больших количеств топлив и значительным загрязнением атмосферы отходящими газами, содержащими диоксид серы и туман серной кислоты.

Традиционно процесс упаривания серной кислоты проводят путем непосредственного контакта горячих топочных газов с отработанной серной кислотой (ОСК) и осуществляется он в барабанных барботажных концентраторах типа «Хемико» либо в распылительных агрегатах типа «труба Вентури». Недостатком такого процесса является значительное туманообразование (20-40 г/м³ сернокислотного тумана после барботажного концентратора и 4,5-11,6 г/м³ после концентратора типа «труба Вентури»).

Очистка выхлопных газов от тумана серной кислоты в электрофильтрах вследствие высокой дисперсности аэрозольных частиц недостаточно эффективна, что приводит к большим потерям серной кислоты и загрязнению атмосферы.

Выброс сернокислотного тумана и диоксида серы в атмосферу от единичного агрегата концентрирования мощностью 250 т/сут. в стандартных схемах составит соответственно 400 и 100 т/г. Обычно эти трудности усугубляются, помимо всего прочего, дефицитом железнодорожных цистерн, неравномерным потреблением кислоты и т. д.

Регенерация ОСК с получением продукта высокого качества может быть достигнута ее термической деструкцией до диоксида серы, когда в условиях высоких температур углеводородные примеси полностью выгорают [1]. Анализ современного состояния вопроса регенерации ОСК [2] с целью выявления перспективы и тенденцией развития показал, что в ближайшее время регенерация отработанных кислот будет осуществляться в основном методом термического разложения.

Процесс регенерации включает разложение кислоты в печах при температурах выше

873 К, охлаждение печных газов в котле-утилизаторе, промывку газов, очистку от сернокислотного тумана, осушку и переработку в кислоту по традиционной схеме [3]. Температурный предел процесса разложения обусловлен термической устойчивостью футеровки печей и материала теплообменной аппаратуры [2].

Необходимая температура процесса поддерживается за счет тепла сгорания топлива, предпочтительно серосодержащего, хотя возможно применение природного газа или мазута [4].

Для повышения концентрации диоксида серы в печном газе воздух, подаваемый на сжигание топлива, обогащают кислородом [5]. Метод может быть эффективен при наличии на предприятии бросового технологического кислорода. Специальное строительство кислородной станции резко скажется на технико-экономических показателях процесса. Чтобы обеспечить при этом достаточную концентрацию диоксида серы и препятствовать смещению равновесия в сторону исходных веществ, концентрацию кислорода на выходе из печи рекомендуют поддерживать равной 0,5 – 2,9 % или проводить процесс при недостатке кислорода.

Разложение кислоты в потоке горячего воздуха (1013 – 1477 К) не дает возможности получить высокую степень разложения до диоксида серы из-за окислительного действия кислорода и смещения равновесия в сторону триоксида серы. Введение в зону реакции восстановителей позволяет заметно ускорить образование диоксида серы и снизить температуру процесса. Имеются сведения по использованию в качестве восстановителей метана, нефти, гудрона, оксида углерода, серы и др.

Для увеличения концентрации диоксида серы предлагают проводить процесс разложения ОСК в две стадии, перераспределяя между ними воздушное дутье на горение топлива [6]. Согласно их предложениям, на первую стадию подают 0,6 – 0,95 части кислородсодержащего дутья от необходимого, создавая восстановительную атмосферу в печи, а на вторую стадию оставшиеся 0,05 – 0,4 части дутья.

Выполненные исследования, проведенные на сере, позволили получить технологический газ, содержащий 25,8 % диоксида серы и 0,01 % триоксида серы. Одностадийный процесс сжигания позволил обеспечить концентрацию диоксида серы в газе 16,74 % [7].

Процесс термического разложения ОСК многостадийен и включает стадии горения топлива, термического разложения кислоты и дожигания коксового остатка. При использовании разбавленных растворов ОСК получаемый газ содержит относительно небольшое количество диоксида серы, что накладывает дополнительные требования к организации переработки печного газа. Поэтому значительная часть работ направлена на повышение экономичности и надежности работы установок термолиза. Так, в работе [8] с целью повышения экономичности процесса тепло печного газа предложено использовать для подогрева потока кислоты, поступающей в печь для разложения. При этом кислоту рекомендуют [9] нагревать до температуры 100 – 200 °С, а воздух, подаваемый на сжигание, до 600 – 1000 °С. Перед подачей кислоты в печь предлагают [10,11] производить ее доупарку продувкой инертным газом, используя для этой цели тепло газов последнего слоя контактного аппарата.

Избыточное тепло процесса термолиза может быть использовано для получения пара различных параметров. Так, отмечено [2], что при подогреве дутьевого воздуха оставшееся его количество может направляться в паровой котел для производства пара низкого давления.

Важнейшим фактором при организации процесса разложения кислоты является выбор способа ввода ОСК в печь. При слишком грубом распыливании или неудачном подводе жидкости в зону горения может наблюдаться неполнота разложения и сепарация капель на поверхности печи.

Наиболее эффективными в работе являются циклонные печи, благодаря вихревой структуре и высокой турбулизации газового потока. В них обеспечивается высокая интенсивность, устойчивость горения топлива и создаются благоприятные условия для теплообмена между потоками газа и жидкости [12].

Немаловажную роль в повышении производительности и увеличении степени разложения ОСК играет выбор распыливающих устройств. Механические центробежные форсун-

ки дают грубый распыл и склонны к загоранию при распыливании загрязненных жидкостей. Применение пневматических форсунок требует для получения капель размером 400-600 мкм $0,5 - 0,8 \text{ м}^3$ воздуха на 1 кг ОСК [13].

Ассортимент отработанных серноокислотных растворов довольно широк и каждый отход специфичен по качественному и количественному составу.

Наиболее универсальным методом, позволяющим полностью освободить ОСК от примесей и получать квалифицированные сорта кислоты и, тем более, олеума, является термическое разложение отхода.

Известными работами термическое разложение в основном рассматривается как ограниченная самостоятельная задача без связи с последующими стадиями переработки газа в серную кислоту, хотя состав печного газа не позволяет априорно рекомендовать приемы переработки газа в олеум или серную кислоту по обычной классической схеме. Такая постановка оправдывается лишь тем, что исследования процесса носят в основном патентный характер и не нашли промышленного применения. Частично эти вопросы были решены на нефтеперерабатывающих заводах при разложении кислых гудронов. Однако процесс обеспечивается термической энергией сгорания сероводородного газа или серы, что не приемлемо для многих предприятий химической промышленности в силу их дефицита. Кроме того, малая мощность установок (до 40 тыс.т/г.) не обеспечит переработки больших объемов кислоты, имеющейся на ряде предприятий.

Для создания интенсивных циклических систем регенерации данных ОСК необходимо решить комплексно вопросы их денитрации, термического разложения и переработки в олеум в единой технологической цепи как взаимосвязанные последовательные стадии целостной системы.

Исходя из этого, выявляются следующие основные задачи, решение которых и создает теоретические основы для практической реализации разработанных технологий, в том числе:

- установление физико-химических основ процесса термического разложения кислотных растворов различных концентраций с оценкой скорости протекания отдельных его стадий и прогнозированием возможного состава отходящих газов в зависимости от условий процесса и применяемого топлива;
- определение влияния состава кислоты с оценкой скорости догорания продуктов распада, оценкой влияния паров кислоты на продукт горения и сажеобразования, с выбором места ввода кислоты в печь;
- выявление влияния состава газа и условий его охлаждения на состав образующихся конденсатов с решением вопросов оптимизации режимов орошения и компоновки промывного отделения, обеспечивающего вывод избыточной влаги;
- изучение влияния оксидов азота и азотной кислоты на процесс термического разложения и разработка эффективных жидко - и газофазных процессов восстановительной денитрации;

Совокупность данных задач направлена на решение важной народнохозяйственной проблемы создания ресурсосберегающих, замкнутых циклических систем регенерации олеума и серной кислоты из ОСК с комплексным решением вопросов охраны окружающей среды от загрязнения оксидами серы и азота.

В большинстве случаев отработанные серноокислотные растворы содержат в своем составе токсичные примеси, что затрудняет их прямое непосредственное использование. Особую трудность представляет выделение из кислоты примесей неорганических соединений. Для очистки кислот от неорганических примесей применяют в основном реагентные методы [1, 14-18]. Их используют для осаждения из растворов ионов ртути, меди, свинца, никеля и других компонентов. В ряде случаев кислоту, содержащую минеральные компоненты, можно непосредственно подвергать термическому разложению как с предварительным упариванием, так и без него. Например, разложение отходов производства акрилатов, содержащих сульфат-бисульфат аммония, протекает достаточно интенсивно [19-23].

Относительно легче проходит обезвреживание отходов, загрязненных углеводородными примесями. Так, установки термического разложения сернокислотных отходов нефтеочистки «Парекс» стабильно эксплуатируются с 1980 г. В них в качестве источника тепла для термического разложения кислоты используют тепло реакции горения сероводорода в токе атмосферного воздуха. Поскольку в данном случае оба процесса (т.е. горение гидрида серы и расщепление кислоты) идут с образованием диоксида серы, то в результате получают газ с достаточно высоким содержанием диоксида серы.

Отработанная серная кислота – отход производства ВВ имеет концентрацию 66-68% и содержит в своем составе до 1,3 % азотной кислоты, до 5 % оксидов азота и 0,7-1 % нитросоединений. Прямая подача такой кислоты на термическое разложение недопустима по двум основным причинам. Во-первых, из-за потерь оксидов азота и возможного загрязнения ими воздуха рабочей зоны и окружающей среды; во-вторых, оксиды азота и азотная кислота влияют на процесс термического разложения серной кислоты, снижая степень ее разложения, а также загрязняют растворы промывного отделения.

Предельные концентрации азотной кислоты и оксидов азота в кислоте, которую можно подавать на разложение, составляют соответственно 0,04 и 0,06 %. При поддержании восстановительных условий в печи доля оксидов азота и азотной кислоты в растворе, подаваемом на разложение, может быть выше (соответственно 0,5 и 0,3 %). Поэтому предварительно серную кислоту денитрируют. При денитрации кислоты паром она разбавляется до концентрации 65 %. Предложено техническое решение по денитрации кислоты в аппаратах Вентури. По разработанной схеме [24] концентрация кислоты после денитрации может достигать 70 – 75 %. Применение данного технического решения позволит снизить затраты топливного газа на 5-8 % и повысить содержание диоксида серы в продукционном газе на 0,8 – 1,2 %.

Для повышения степени использования тепла и устойчивости системы предложено использование тепла печного газа после печи на подогрев газов перед контактным аппаратом. Внедрение данного приема позволит осуществить стабильную эксплуатацию систем и на малоконцентрированных сернистых газах. При этом хороший эффект дает использование нестационарного режима контактирования [11].

Опытно-промышленные испытания таких аппаратов в Воскресенском филиале НИУ-ИФ с использованием катализаторов ИК-1-6, ИК-1-4 при термическом разложении слабоконцентрированных кислот дали высокие технологические показатели при работе системы на газах с малым содержанием диоксида серы (2-5 %).

Поскольку в отечественной промышленности отсутствуют системы регенерации отработанной серной кислоты методом термолиза с получением всей продукции в виде олеума и нет сведений о наличии такого опыта и за рубежом, то создание принципиально нового производства осложняется тем, что оно должно быть универсальным по использованию в качестве топлива как газа, так и других топлив, включая и твердое.

Максимально учтен опыт эксплуатации установок термического разложения кислых гудронов, что позволило создать гибкие установки, способные работать в условиях автотермии контактного узла даже при снижении концентрации диоксида серы в газе ниже 5% [1].

Переработка кислотных отходов в олеум включает все стадии классического производства серной кислоты. Но, учитывая специфику отхода и использование в качестве топлива природного газа или мазута, получаемый печной газ будет характеризоваться высоким содержанием паров воды. Поэтому возникла необходимость в предварительной подготовке кислоты к разложению (ее денитрации), очистке газа и вывода из системы избыточной влаги.

Основываясь на данных исследований, предложено процесс конденсации воды разделить на две ступени, проводя первую при температуре 160-180 °С, вторую при 20-30 °С с поддержанием концентрации конденсата на первой ступени, близкой к азеотропной точке, даже при высоких степенях разложения. Конденсат второй ступени в этом случае содержит 0,1 – 0,2 % серной кислоты. Проведение двухступенчатой конденсации и промывки газов создает условия для снижения времени пребывания кислоты в печи и температуры процесса

вплоть до достижения степени разложения 60 -70 %. Полученного при этом диоксида серы достаточно для получения олеума из конденсата первой ступени.

При обычном режиме работы печи (900-1050 °С) применение предложенного технического решения позволяет снизить расход природного газа на 40 – 60 м³/т мнг, а при экономичном режиме (750 – 800 °С) на 80 – 100 м³/т мнг.

Охлаждение печных газов можно производить в теплообменниках [25], для ускорения процесса охлаждения в кислоту можно впрыскивать охлажденный конденсат либо применять для этой цели отработанные сернокислотные растворы, содержащие до 10 % формальдегида или уротропина, которые в небольших количествах имеются на предприятиях отрасли. При этом одновременно с охлаждением газа происходит восстановление кислоты углеводородами. Для снижения энергозатрат предложено использовать эксергию сухих, отходящих после второго моногидратного абсорбера газов для предварительной упарки исходного раствора или упарки конденсата второй ступени.

В установках термического разложения кислых гудронов конденсацию воды и промывку газа проводят в двух промывных башнях. Первая из них работает в испарительном режиме, вторая - в конденсационном. При охлаждении газа с 300 до 95 °С и орошении кислотой с температурой 100 °С в первой промывной башне происходит конденсация 40-50 % кислоты, которую разбавляют олеумом до продукционной (93 %) и выводят к потребителю. Оставшаяся влага конденсируется в виде 5 % раствора серной кислоты при температуре в башне 30 °С. Избыток влаги отдувают воздухом в башнях-холодильниках, включенных в цикл орошения второй промывной башни.

Показана целесообразность установки двух сушильных башен. Первая сушильная башня орошается исходной кислотой при подаче в нее до 25 % печного газа, поступающего на осушку. При этом кислота разбавляется на 3-4 % и далее поступает в аппараты расщепления. Количество уловленной влаги можно регулировать байпасированием части газа мимо первой сушильной башни. Вторая сушильная башня орошается 93 % кислотой при подпитке кислотой из моногидратного абсорбера.

Поскольку тепло печного газа используется для подогрева технологического газа, поступающего на первый слой контактного аппарата, то для окисления диоксида серы можно использовать метод двойного контактирования с промежуточной абсорбцией (ДК/ДА). Метод ДК/ДА позволяет применять абсолютно сухие выхлопные газы для вывода избыточной влаги из цикла орошения второй промывной башни, одновременно охлаждать циркулирующую кислотную воду при уменьшенной холодильной поверхности. Контактный узел может быть оформлен по схеме 2 + 2, которая хорошо себя зарекомендовала в составе действующего сернокислотного производства, поставленного в Россию фирмой «Лурги» (ФРГ) на завод «Электроцинк» (г. Владикавказ).

Избыточное тепло процесса конверсии можно использовать для подогрева атмосферного воздуха, направленного на сжигание метана или для испарения избыточной влаги.

Указанные выше технические решения использованы при разработке энергосберегающего технологического процесса получения олеума из ОСК и подробно представлены в [26].

Разработанная технология в сравнении с традиционными позволяет упразднить стадию концентрирования ОСК до купоросного масла, что автоматически снизит загрязнение атмосферы оксидами серы и сернокислотным туманом и обеспечит замкнутый кислотооборот, исключив необходимость в цехе по производству олеума из колчедана или серы и ликвидирует столь затратные встречные грузоперевозки. Одновременно исключается проблема обезвреживания и утилизации кислых шлаков и стоков после промывных башен, количество которых в классических схемах составляет десятки тонн в год.

Это достигается тем, что при работе промывного отделения в конденсационном режиме и дополнительной установке испарительной колонны, вся избыточная влага из процесса выводится в атмосферу с отходящими газами, т.е. производство не будет иметь технологических стоков и станет полностью бессточным.

Кроме того, установленная на «хвосте» испарительная колонна выполняет функции санитарной башни, поглощая часть триоксида и диоксида серы, так как на орошение этой колонны подается кислая вода, которая хорошо поглощает и растворяет диоксид и триоксид серы. Этому же способствует то обстоятельство, что в процессе испарения температура кислой воды снижается, что увеличивает ее поглотительную способность. Таким образом, газы, выбрасываемые в атмосферу, содержат значительно меньшее количество триоксида и диоксида серы, чем в традиционных схемах.

При сжигании топлива в печи терморасщепления в присутствии незначительного количества восстановителей, одним из которых могут быть нитросоединения, содержащиеся в ОСК, реально можно достичь степени расщепления кислоты до диоксида серы 99,95 %, что исключает возможность туманообразования и выброс сернокислотного тумана из системы.

При такой степени терморасщепления ОСК, степени конверсии диоксида серы в триоксид в системе ДК/ДА 99,8%, степени абсорбции 99,99 % и наличии отдувочной и испарительной башни, выполняющей роль санитарной колонны, содержание вредных компонентов в выхлопных газах составит по диоксиду и триоксиду серы соответственно 0,001 и 0,0001 %, что для цеха, мощностью 80 тыс. т/г. (мнг), выразится выбросом $SO_2 = 4,0 - 4,5$ т/г. и $SO_3 = 0,4 - 0,45$ т/г.

В качестве используемых производственных отходов можно получить пар $P = 6$ атм, $t = 158$ °С в качестве 10-12 т/ч.

Возможная конденсация избыточной влаги после испарительной башни позволит использовать тепло конденсации, обеспечить потребность в воде котла-утилизатора и подпитку водооборотной системы предприятий.

Библиографический список

1. Регенерация отработанных сернокислотных растворов / К.М. Дюмаев [и др.]. – М.: Химия, 1987. С. 112.
2. Регенерация ОСК, содержащей органические примеси / Б.Е. Шенфельд [и др.] // Хим. пром. 1986. №2. С. 97–99.
3. Заявка 1462925 (Великобритания) МКИ СО1 в 17/72. Process for the thermal decomposition of waste / Bast A. Заявл.14.06.74.; Оп.1.01.1977. Бюл. №2.
4. **Когтев, С.Е.** Сравнительная оценка высокотемпературных методов разложения серной кислоты // Тез. докл. Всесоюзного совещания по утилизации жидких сернокислотных отходов. – Дзержинск. 1988. С. 7–8.
5. Заявка 2005905 (ФРГ) СО1 в 17/90. Recovery of sulfur dioxide from spent sulfuric acid /Hurlburt Harveyz- заявл. 03.09.70.; опубл. 1971 74 439758.
6. А.с.1010009 (СССР) МКИ СО1 в 17/50. Способ получения сернистого ангидрида /А.Д.Марков, Ю.В.Филатов, Л.М.Варшавская; заявл.17.12.81. № 3365034; опубл. 1983. Бюл. №13.
7. А.с. 644724 (СССР) МКИ СО1 в 17/50. Способ получения сернистого газа / В.П. Влезко [и др.]; заявл. 17.04.75. № 2125637; опубл. 26.01.76. Бюл. № 4. 1979. С. 76.
8. Заявка 2042483 (Великобритания) МКИ СО1 в 17/50. Термическое разложение серной кислоты // Blakey G, Watson R; заявл. 17.01.78.; опубл. 11.09.80. Of. Gaz № 4780.
9. Пат. 4490437 (США) МКИ СО1 в 17/90. Переработка отходов, содержащих разбавленную серную кислоту // P. Gelbum; заявл. 07.02.83. № 464429; опубл. 25.12.84. Of. Gaz № 1049.
10. Заявка 2529709 (ФРГ) МКИ СО1 в 17/76. Способ получения серной кислоты // K. Dorg, H. Gimm; заявл. 3.07.75.; опубл. 20.01.77 / РЖХ 1Л36П. 1978.
11. **Полищук, М.А.** Каталитическая очистка отходящих газов промышленных и выхлопных газов автотранспорта / М.А. Полищук, Ю.Ш. Матрос, Г.А. Бунимович // Тез. докл. Всесоюзной конференции по охране окружающей среды. – Новосибирск, 1981. С. 6–9.
12. Современное состояние и перспективы переработки сернокислотных отходов / А.Д.Гончаренко [и др.] // Тематический обзор. Сер. Нефтехимия и сланцепереработка. – М.: НИУИФ. 1982. С. 53.
13. Заявка 2816469 (ФРГ) МКИ СО1 в 17/58. Термический способ регенерации сбросной серной кислоты./ W.Кетег; заявл. 15.04.78; опубл. 20.08.79. Бюл. № 31.
14. **Суцев, В.С.** Об основных направлениях утилизации и регенерации серных кислот химических и нефтехимических производств / В.С. Суцев, Л.А. Филонова, Т.М. Метелица // Тез. докл. Всесоюзного совещания по утилизации жидких сернокислотных отходов. – Пермь, 1984. С. 3–4.
15. **Родионов, А.И.** Методы регенерации отработанной серной кислоты / А.И. Родионов, В.С. Суцев, А.В. Елинек // Труды института МХТИ. М., 1984. Вып. 132. С. 9–15.

16. А.с. 171876 (ЧССР) МКИ СО1 в 17/90 Zpusob adstranovani Zelero 2 kuseliny sirove / М. Miroslav [at al.]; заявл. 24.04.73 № 2923-73 от 15.03.78 //РЖХ,1979,6АЗОП.
17. Пат.53-11518 (Япония) МКИ СО1 в 17/90. Способ очистки серной кислоты / Иман Тэруо, Такэути Татака; заявл. 24.04.74. № 50 -50057; опубл. 21.04.78 // РЖХ, 1974, 6ЛЗОП.
18. Пат. 53- 11519 (Япония) МКИ СО1 в 17/90. Способ очистки серной кислоты/ Иман Тэруо Такеути Татака; заявл. 2.05.75. № 50 – 52585; опубл. 21.04.78 // РЖХ, 1979. 6ЛЗ1П.
19. **Когтев, С.Е.** Термическое разложение частично нейтрализованной серной кислоты / С.Е. Когтев, И.С. Никандров // Минеральные удобрения. Новые исследования и разработки: межвузов. сб. науч. тр. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета, 1987. С. 142-145.
20. **Белов, А.А.** Выделение сульфата аммония при регенерации сернокислотных отходов производства акрилатов / А.А. Белов, С.Е. Когтев // Тез. докл. Всесоюзного совещания по утилизации жидких сернокислотных отходов. – Дзержинск. 1988. С. 33–34.
21. Поиск оптимального режима процесса терморазложения отработанной кислоты – отходов производства акриловых соединений / Н.Д.Саенко [и др.] // Тез. докл. Всесоюзного совещания по утилизации жидких сернокислотных отходов. – Дзержинск. 1988. С. 12.
22. Исследование процесса термического разложения отработанной серной кислоты производства метилметакрилата / Н.Д.Саенко [и др.] // Тез. докл. Всесоюзного совещания по утилизации жидких сернокислотных отходов. – Пермь. 1984. С. 76–77.
23. **Когтев, С.Е.** Выделение сульфата аммония при термической регенерации серной кислоты / С.Е. Когтев, А.А. Белов, И.С. Никандров // Технология минеральных удобрений и солей: сб. научн тр. – Л.: ЛТИ им. Ленсовета. 1988. С. 124–129.
24. А.с. 1465413 (СССР) МКИ СО1 в 17/90. Способ денитрации серной кислоты / С.Е. Когтев [и др.]; заявл. 23.02.87. № 4217342; опубл. 15.03.89. Бюл. № 10.
25. **Когтев, С.Е.** Конденсация паров воды при охлаждении печного газа терморазложения серной кислоты / С.Е. Когтев, Г.А. Кокина, В.А. Комаров // Современные машины и аппараты химических производств: тез. докл. Всесоюзной конф. – Ташкент, 1983. С. 143–144.
26. **Борисенко, А.С.** Циклическая энергосберегающая система регенерации олеума/ А.С. Борисенко, С.Е.Когтев, Н.В. Ксандров // Хим. пром. сегодня 2008. №5. С. 5–10.

*Дата поступления
в редакцию 01.03.2011*

A.S. Borisenko, N.V. Ksandrov

ECOLOGICAL ALTERNATIVE PROCESSING OF SULFURIC ACID SOLUTIONS

Methods of complex nitrogenous sulfuric acid and saline liquid wastes utilization and ways of nonwaste technology of processing them into high quality trade goods have been studied in the research. On the basis of examining statics and kinetics of combined processes optimal technology of black sulfuric acid utilization has been developed and methodological conception of creating regional cyclic refreshment systems with end-to-end solution of the problem concerning environmental protection has been suggested.

Key words: black sulfuric acid, oleum, denitration, refreshing, degree of reduction, utilization.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 33.05

Д.Е. Ершов

СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД АНАЛИЗА РЕГИОНАЛЬНЫХ РЫНКОВ НА ОСНОВЕ МЕТОДИКИ ПРОНИКАЮЩИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ

Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет

Представлен системный подход анализа региональных рынков на основе макроэкономических показателей, позволяющий соединить множество данных, получаемых в процессе анализа, посредством проникающих показателей.

Ключевые слова: макроэкономические показатели, исследование рынка, информационные показатели, проникающие показатели, жизненный цикл.

Как правило, в современной литературе для анализа отдельных рынков по макроэкономическим показателям чаще всего используются типичные показатели макроэкономики, такие как национальный объем производства, валовой национальный и внутренний продукт, совокупный спрос и совокупное предложение, занятость и норма безработицы, уровень инфляции и т.д. Проводя анализ рынка в разрезе маркетинговых целей, из всего многообразия показателей следует выделить основные параметры, чтобы впоследствии получить необходимое и достаточное количество данных для ответа на ключевые вопросы о рынке.

Существует множество методик анализа рынков, но все они имеют существенный недостаток - склонность к простым и линейным схемам. Последствия этого недостатка выражаются в том, что прогнозы развития рынка чаще всего сводятся к простым экстраполяциям текущих данных на интересующий период времени.

В математике уже давно доказано, что меняющуюся социальную и экономическую реальность лучше всего описывают методики, созданные на основе нелинейных видов анализа. Методики, которые сами настраиваются на изучаемый объект на разных стадиях его развития. Именно на этом принципе построена методика анализа показателей рынка с помощью системы проникающих индикаторов, рассматриваемая в данной статье.

Ключевое преимущество данной методики состоит в том, что она формирует самонастраивающийся инструмент прогноза, полезность которого имеет пролонгированный характер, а прогнозная модель пригодна для принятия эффективных управленческих решений в течение длительного периода времени.

Реализация методики проникающих индикаторов состоит из следующих последовательных этапов:

1. Построение системы информационных показателей, отражающих ключевые характеристики рынка;
2. Сбор информации по выделенным показателям относительно прошлого и текущего состояния рынка;
3. Расчет значений проникающих индикаторов;
4. Построение моделей развития рынка.

Для успешного применения методики проникающих индикаторов исследовательский инструментарий должен включать в себя систему информационных показателей, обладающих следующими признаками:

- информационные показатели должны отражать суть и содержание изучаемого рынка;
- показатели должны быть сформулированы таким образом, чтобы их было легко найти на любой стадии развития рынка;
- показатели должны быть измеряемыми и равновоспринимаемыми всеми участниками рынка.

Информационные показатели делятся на условно внешние и условно внутренние характеристики рынка. Под внешними характеристиками рынка понимается комплексный анализ ключевых условий, при наличии которых рынок существует и имеет потенциал для развития. В качестве внутренних характеристик изучаемого рынка используются такие показатели, как емкость рынка и его структура.

Для выделения ряда ключевых показателей, позволяющих рынку развиваться, необходим методологически выверенный инструментарий. Он должен, с одной стороны, включать в себя множество разнообразных переменных, а с другой – позволять легко их интерпретировать и трансформировать. Для этого пригодны многие из методов стратегического анализа. Сформируем систему информационных показателей на основе широко известного PEST - анализа, показанную в табл. 1.

Таблица 1

Структура системы информационных показателей

		Внутренние характеристики рынка			
		Емкость	Структура	Ретродинамика	Среднесрочный прогноз
Внешние характеристики рынка	Political	Текущий политический климат		Изменения во взаимоотношении государства и бизнеса	
	Economic	Количество покупателей	Количество производителей Количество продавцов Каналы движения товаров	Индекс доходов и структура расходов потребителей	Индекс доходов и структура расходов потребителей
	Social	Предпочтения и поведение покупателей			
	Technological	Критические изменения в условиях производства и торговли			

В ячейках таблицы находятся информационные показатели, отражающие суть взаимосвязи внешних и внутренних характеристик рынка. Несомненно, что для различных типов рынков используются различные типы показателей. Например, для оценки емкости рынка конечных потребителей может быть использован индекс доходов покупателей, а для оценки емкости корпоративных рынков рынка следует использовать показатели объема валового внутреннего продукта применительно к изучаемой отрасли. Эти информационные показатели образуют структуру задач сбора информации. Рассмотрим далее принцип применения системы проникающих индикаторов по отношению к каждому из показателей, упомянутых в таблице.

Мультифакторность информации, собранной о рынке с использованием описанной схемы, позволяет построить пространственно-временную модель развития рынка до текущего момента. Но все попытки прогнозов будут упираться лишь в линейную экстраполяцию обнаруженных закономерностей функционирования рынка.

Рынок, а, тем более, социальная реальность, - не являются жесткими системами. Поэтому нам необходим инструмент построения прогноза, показывающий, в каком направлении, с какой скоростью будет развиваться рынок и какова будет максимальная амплитуда его колебаний. В качестве такого инструментария целесообразно использовать систему про-

никающих индикаторов, построенную на основе собранных данных об информационных показателях.

Проникающий индикатор - числовой коэффициент, показывающий вектор и амплитуду колебаний каждого из информационных показателей на анализируемых периодах развития рынка в зависимости от динамики внешних характеристик рынка. Например, такой показатель, как емкость рынка в различные периоды времени изменяется в зависимости от колебания общих экономических условий функционирования рынка. Рассмотрим методику поэтапного формирования проникающего индикатора для показателя емкости рынка.

Первый этап - проведение анализа взаимосвязи между емкостью рынка и экономическими условиями за несколько прошедших периодов, что позволяет выяснить математическую природу взаимосвязи этих показателей.

Второй этап - тестирование значения полученного индикатора на предмет способности формировать близкие к реальности прогнозы на базе данных о недавних периодах развития рынка.

Третий этап - актуализация индикатора относительно текущей и ближайшей ситуации на исследуемом рынке.

Таким образом, мы получаем набор проникающих индикаторов относительно каждого информационного показателя. Это позволяет настраивать прогноз развития того или иного рынка в зависимости от динамики внешних условий его существования.

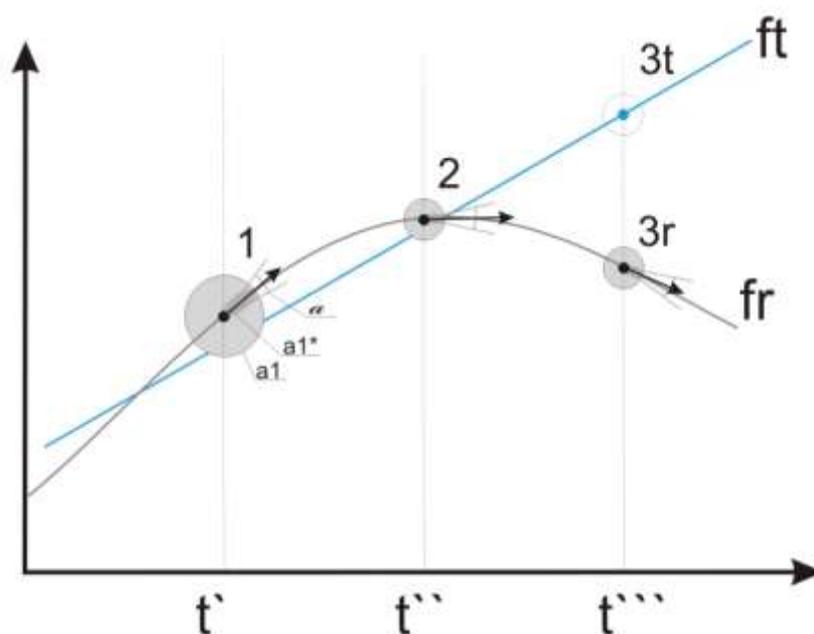


Рис. 1. Принцип действия системы проникающих индикаторов

Суть применения данного инструмента отражена на рис. 1, где показан прогноз динамики емкости рынка устройств мобильной связи. На графике изображены три временные точки: точка 1 - период прошлого, точка 2 - период настоящего, точка 3 - период прогноза на будущее. В случае применения традиционного подхода к построению прогнозов мы получим точку на прямой линии, построенной по линейному принципу, - точка $3t$ (использование данных полиномиальных, логарифмических, степенных, экспоненциальных или других видов аппроксимации не только ограничено количеством данных периодов, но и, как показывает практика, дает незначительное уточнение положения искомой координаты), на рис. 1 эта точка лежит на линии, обозначенной ft (функция тренда). Линия fr (фактическая функция) показывает изменения прогноза емкости рынка при применении системы проникающих индикаторов в трех временных интервалах: t' (прошедший период), t'' (текущий период), t''' (будущий период).

Использование проникающих индикаторов позволяет оценить диапазон колебаний и направление колебаний значения данной точки. В итоге прогнозируемое значение при использовании проникающего индикатора ($3r$) может существенно отличаться от значения, полученного при использовании функции тренда ($3t$). Рассмотрим подробнее принцип действия системы.

Важным преимуществом системы проникающих индикаторов является возможность определить вектор дальнейшего движения точки во времени, что существенно увеличивает прогнозные свойства системы.

Проникающий индикатор состоит из трех компонент, обозначенных на графике как $a1$, $a1^*$ и α (альфа). Компонент $a1$ показывает зону колебаний полученного значения емкости рынка вокруг точки. Если сравнивать со статистикой, то этот показатель наиболее близок по своей сути к ошибке выборки. Так, говоря о прошлом (находясь в точке t^{\prime}) и собирая данных о состоянии рынка в прошлых периодах, мы будем иметь повышенную ошибку выборки (увеличенную площадь круга $a1$). В точке $t^{\prime\prime}$ (настоящее время) при сборе данных уровень ошибки не будет превышать стандартный (уменьшенный размер круга в точке 2). При прогнозировании будущего (точка $t^{\prime\prime\prime}$) уровень ошибки также не будет превышать стандартный (подробное описание точки $3r$ см. на рис. 2). Второй компонент $a1^*$ обозначает общую статистическую погрешность вектора вероятного изменения колебаний значения показателя «емкость рынка». На рисунке отражено, что он сужает зону поиска и, следовательно, снижает статистическую погрешность в рамках ограничения направления вектора. Третий компонент α (альфа) обозначает диапазон колебаний значения вектора вероятного изменения емкости рынка.

Применив проникающий индикатор к третьей точке (чтобы сделать прогноз на будущее), мы увидим серьезные отличия между прогнозными показателями (точка $3t$ и $3r$). Если функция тренда идет вверх (прямая линия), то функция, построенная с использованием системы проникающих индикаторов, показывает снижение рынка (кривая линия). Таким образом, в третьем временном периоде (точке $t^{\prime\prime\prime}$) мы видим серьезный разрыв в значениях показателя емкости рынка между точками $3t$ и $3r$. Точка $3r$ максимально приближена к реальности. Если бы мы опирались на данные традиционных методов прогноза, то следовало бы ожидать роста емкости рынка, тогда как на самом деле происходит ее снижение. Наличие подобной информации позволяет быть готовым к возможным сценариям развития ситуации на изучаемом рынке. Прогнозирование вариантов развития рынка позволит выбирать адекватные сроки и объемы инвестирования, с тем, чтобы получить максимальную прибыль на пике рынка и вовремя изъять средства, во избежание их потерь на спаде рынка, с точки зрения производства и продаж данные об изменении рынка позволят скорректировать план и вовремя принять решения относительно управления портфелем торговых марок.

Основой для анализа в каждом временном периоде выступает единая матрица информационных показателей (табл. 1). Мы используем эту систему показателей как инструмент анализа состояния рынка в его прошедших периодах и текущем состоянии. В частности, на рис. 2 показателями t^{\prime} , $t^{\prime\prime}$, $t^{\prime\prime\prime}$ обозначены соответствующие периоды времени. t^{\prime} — состояние рынка в прошедших периодах, $t^{\prime\prime}$ - состояние рынка в текущем периоде и $t^{\prime\prime\prime}$ - данные о прогнозируемых состояниях рынка в будущих периодах, полученные на основе применения системы проникающих индикаторов.

Важным вопросом является принцип определения интервалов периодов. Для расчета адекватных периодов авторы предлагают использовать усредненные показатели жизненного цикла стандартных продуктов на изучаемом рынке. Так, для большинства рынков товаров народного потребления жизненный цикл продукта может составлять от трех месяцев до двух лет, а для рынка промышленного оборудования жизненный цикл товара колеблется от трех до семи и в отдельных случаях более лет. Опираясь на данные о продолжительности жизненного цикла (а в отдельных случаях требуются данные о продолжительности отдельных стадий жизненного цикла), мы выделяем точки анализа данных на основе полученных вре-

менных интервалов. Принципиальное значение имеет тот факт, что различные временные периоды мы сравниваем и изучаем на основе единых показателей (табл. 1).

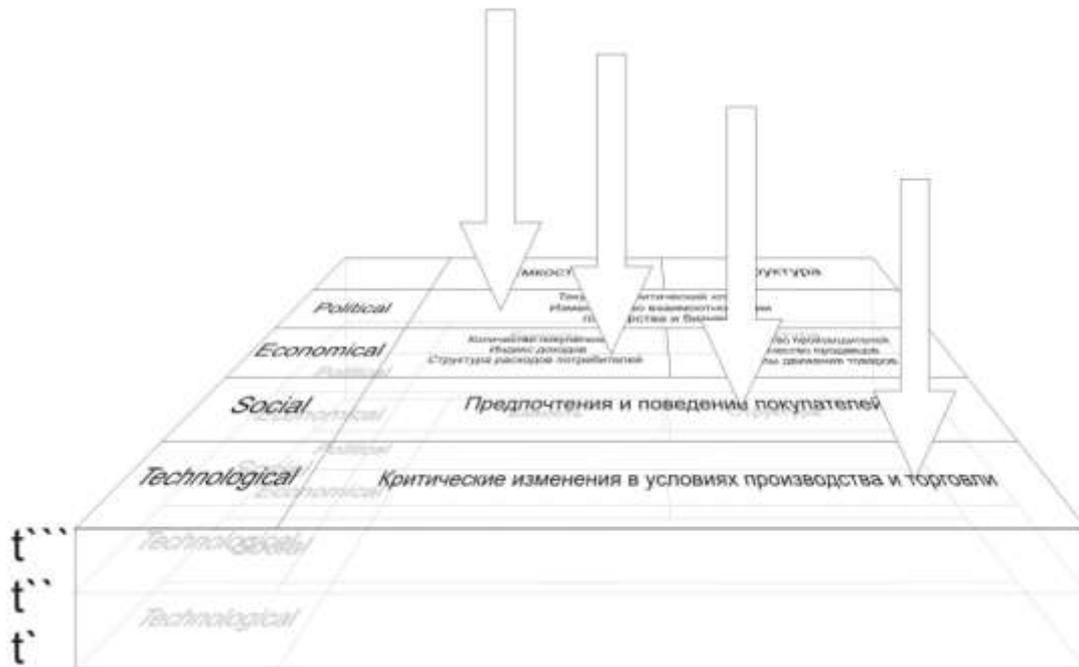


Рис. 2. Матрица анализа состояния рынка в различных временных периодах

Для оценки перспектив развития рынка необходимо знать его прошлое и текущее состояние, а также оценить влияние факторов, приведших рынок к этому состоянию. Таким образом, возникает проекция системы информационных показателей во времени, отраженная на рис. 2.

Упрощенная архитектура процесса сбора информации представлена в табл. 2.

Таблица 2

Соотношение методов исследования и временных периодов

№ слоя	Обозначение	Тип исследования	Задачи исследования
Слой I	t'	Кабинетное исследование	Информация о прошлом состоянии рынка (прогнозное и фактическое)
Слой II	t''	Исследование субъектов и состояния рынка	Информация о текущем состоянии рынка (прогнозное и фактическое)
Слой III	t'''	Анализ экспертных оценок	Информация о направлениях развития рынка в ближайшем будущем (прогнозное)

Качественное информационное наполнение показателей обеспечивают современные технологии сбора информации, адаптированные к схеме и характеру циркулирования информации в деловых кругах современной России. Указанные слои архитектуры исследования предполагают использование различной методологии, зависящей от типа исследуемого рынка. Например, при анализе рынка спецавтотехники значительную часть информации возможно получить с помощью методов конкурентной разведки, тогда как при исследовании рынка широкополосного доступа в Интернет достаточно информации, полученной от потребителей и экспертов путем проведения серии глубинных интервью.

Кабинетное исследование в рамках описываемой методики имеет свою специфику. Необходимо обратить внимание на сбор информации по следующим показателям:

- информация о текущем состоянии рынка за исследуемый период;
- информация о ключевых макроэкономических факторах, оказывающих влияние на состояние рынка в исследуемый период;
- информация о прогнозах развития рынка, созданных в изучаемый период развития рынка.

Отдельно следует затронуть тему методологии расчета информационных показателей емкости и структуры рынка, поскольку во многом именно от точности оценки этих показателей зависит точность результирующих расчетов.

Оценить емкость рынка можно с помощью нескольких способов. Первый способ - оценка объема предложения (производства) товара или услуги, второй - оценка объема потребления, третий - оценка рынка по отношению к размеру сходного рынка.

Каждый из указанных способов имеет свои недостатки и преимущества в зависимости от типа рынка. С инструментальной точки зрения наиболее точно емкость рынка может быть оценена через объемы потребления. Для этого необходимо собрать данные из нескольких независимых открытых источников и привести к единому знаменателю, произведя взвешивание относительно независимых параметров. Но иногда данный способ дает недостаточно точные результаты.

Получить более точные результаты можно, дополнив данные расчеты оценкой объемов потребления. Для оценки объемов потребления недостаточно информации из открытых источников, так как она обладает рядом недостатков, большинство которых проистекают от теневого характера экономики России. Более адекватным способом оценки объемов потребления является маркетинговое исследование. Но это может касаться преимущественно только оценки емкости рынка на текущий момент. Основными задачами исследования будет выявление объемов потребления и предпочтений контрольной группы (целевой аудитории). Важно отметить, что сама целевая аудитория опроса должна быть сконструирована очень тщательно, с тем, чтобы данные о ее поведении можно было распространять на всю совокупность потребителей. Таким образом, формируется алгоритм получения данных о емкости рынка, включающий двустороннюю проверку. Часто складывается такая ситуация, когда нет официальных сведений о рынке, а получение информации от потребителей затруднено или невозможно. Адекватным выходом может быть оценка емкости рынка по показателям сходных рынков путем формирования системы коэффициентов, отражающих отношение показателей на исходном и сравниваемом рынках.

Второй важный показатель при изучении внутренних характеристик рынка - это анализ его структуры. Анализ структуры рынка включает в себя, с одной стороны, изучение товаров, а с другой - изучение участников рынка. Изучение товаров/услуг включает в себя анализ механизмов создания стоимости товаров и услуг, распределение их по ключевым сегментам. В то время как изучение участников рынка включает в себя описание игроков по таким параметрам, как доля рынка и позиционирование предложения на рынке. Решение таких задач позволит понять тип конкуренции на изучаемом рынке, определить его структуру. Внимания требуют инструменты, используемые для получения такой информации. Основным инструментом является исследование предпочтений потребителей, которое позволяет оценить доли рынка и специфику позиционирования игроков. Методология исследования может быть различной как по методикам, так и бюджету исследования. Дополнительным инструментом является поиск информации в открытых источниках. Наиболее эффективны в этом отношении такие источники, как отраслевые издания, региональные издания и справочники официальных органов статистики. Используя эти источники важно помнить о необходимости использования различных алгоритмов расчетов искомых показателей. Идеальным вариантом будет система взвешивающих коэффициентов, играющая роль проверки в отношении рассчитываемых показателей.

Таким образом, владея информацией о состоянии рынка (емкости и структуре) в его различные периоды времени (учитывая влияние динамики внешних факторов на его разви-

тие), на основе применения системы проникающих показателей, связанных единой матрицей информационных показателей на каждом из временных срезов, мы получаем завершённый инструментарий, позволяющий накапливать в рамках стандартизированной информационной системы, анализировать и получать максимально приближенные к реальным значениям прогнозные показатели. Данная прогнозная система является самонастраивающейся на возможные ситуации развития рынка в краткосрочном и среднесрочном периодах в зависимости от характера внешней ситуации. Накапливая данные за большее количество периодов и таким образом корректируя векторные составляющие прогноза, мы получаем дополнительные возможности, такие как повышение точности прогнозирования и/или возможность прогнозирования на более длинные временные интервалы. Роль такого инструмента трудно переоценить, так как с одной стороны он позволяет избегать непредвиденных издержек, а с другой – высвечивает зоны эффективно инвестирования. Более точное прогнозирование вариантов развития рынка позволит выбирать адекватные сроки и объемы инвестирования с тем, чтобы получить максимальную прибыль на пике рынка и вовремя изъять средства, чтобы избежать их потерь на спаде рынка, а с точки зрения производства и продаж данные об изменении рынка позволят скорректировать план и вовремя принять решения относительно управления портфелем торговых марок.

Библиографический список

1. **Андерсен, А.Р.** Механизм управления стоимостью продукта предприятия // ЭКО. – 1999.
2. **Клейнер, Г.** Механизмы принятия стратегических решений и стратегическое планирование на предприятиях // Вопросы Экономики. 1998. № 3.
3. **Морозова, Г.А.** Продвижение продукта в регионе / Г.А. Морозова. – Нижний Новгород: Изд-во ВВАГС, 2004.
4. **Gary, L.Lilien.** Marketing models / Gary L.Lilien, Philip Kotler, K. Sridhor Moorthy.– Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey, 1992.
5. **Kendrick, J.W.** Improving company productivity; Handb. with case studies/ Kendrick J. W. in col-lab. with the Amer. productivity center. - Baltimore; London: Johns Hopkins univ. press, 1984.
6. **Krugmann, P.R.** International Economics: Theory and policy / P.R. Krugman. Obstfeld, Maurice. – 8th ed. – Reading: Addison-Wesley, 2004.
7. **Norton, D.** The Balanced Scorecard / D. Norton, R. Kaplan // HBS Press, 2004.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2011*

D. Ershov

THE SYSTEMATIC APPROACH FOR THE ANALYSIS OF REGIONAL MARKETS BASED ON A METHODOLOGY OF INTERCONNECTED PARAMETERS

The subject of the article is the analyses of macroeconomic data, based on classification of data according to the methodology of interconnected parameters.

Key words: macroeconomic, marketing research, interconnected parameters, data, life-cycle.

УДК 338.45

С.Н. Яшин¹, П.И. Лазарев²

**ВЫБОР КРИТЕРИЕВ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ИННОВАЦИОННЫХ ПРОЕКТОВ ВНЕДРЕНИЯ
ДОПОЛНИТЕЛЬНЫХ УСЛУГ СВЯЗИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ЗАО «НСС»²

В статье обосновывается выбор показателей оценки эффективности инновационных проектов внедрения дополнительных услуг связи. Определение показателей осуществляется отдельно для двух различных типов проектов: высокобюджетных и низкобюджетных. Отбор производится по следующим группам критериев: рыночные, научно-технические, финансовые, производственные, внешние и критерии, связанные с целями корпорации, ее стратегиями, политиками и ценностями.

Ключевые слова: эффективность, инновационный проект дополнительные услуги связи, критерии оценки, низкобюджетные и высокобюджетные проекты, отборочные и оценочные показатели.

Дополнительные услуги связи – популярный в телекоммуникационной сфере термин для обозначения сервисов, представляемых не основной сетью оператора связи, а дополнительными платформами. Часто для обозначения таких сервисов используют аббревиатуру VAS (Value Added Services), что в переводе с английского означает «услуги, приносящие дополнительный доход».

С каждым днем организации связи все больше внимания уделяют разворачиванию специальных видов обслуживания клиентов, персонализации, локализации и повышению разнообразия предлагаемых услуг. К такой необходимости операторов связи подталкивает постепенное насыщение отдельных сегментов рынка и жесткая межоператорская конкуренция. Именно дополнительные услуги способны дать оператору конкурентное преимущество, помочь ему удержать имеющихся и привлечь новых клиентов, а также повысить ARPU, т.е. уровень дохода в расчете на одного абонента.

Одной из главных особенностей операторов связи является их высокая технологичность, поскольку оказание современных телекоммуникационных услуг невозможно без использования большого числа программно-аппаратных средств [3]. Внедрение дополнительных платформ в существующие сети в силу вышеописанной особенности приводит к появлению сложных, а часто и вовсе инновационных проектов по внедрению VAS.

В большинстве случаев организации дополнительных услуг разработчиком платформы является сторонняя компания небольшого размера. Это объясняется тем, что на сегодняшний день российский оператор связи обычно самостоятельно не создает крупные инновационные платформы.

С каждым годом число предложений со стороны сторонних разработчиков VAS платформ увеличивается. Необходимость во внедрении все большего числа разнообразных дополнительных услуг у операторов связи также растет. Усложнение сетей оператора приводит к появлению все большего числа инновационных телекоммуникационных проектов. Все это делает задачу разработки методов отбора для финансирования инновационных проектов внедрения дополнительных услуг связи более значимой и актуальной.

Разработка метода отбора для финансирования проектов включает: определение показателей, по которым будут оцениваться проекты; выбор способов оценки этих показателей; подбор метода приведения множества разнородных показателей к одному или нескольким критериям; определение общего алгоритма действий.

В данной статье мы сосредоточимся на определении критериев оценки эффективности инновационных проектов внедрения дополнительных услуг связи.

Набор критериев, предназначенный для оценки объекта экспертизы, должен обладать рядом свойств, делающих его использование целесообразным [2]:

- полнота – в наборе критериев должны быть представлены показатели, описывающие все основные аспекты оценки объекта экспертизы;
- действенность – критерии должны характеризовать основные аспекты анализируемой ситуации и быть доступными для получения оценок по ним;
- разложимость - если критериев очень много, то целесообразно их разбить на более мелкие группы для удобства одновременной работы с ними, обычно не более 7;
- избыточность – отсутствие показателей, определяющих схожие свойства;
- минимальная размерность - необходима, чтобы процедура многокритериального оценивания не была без необходимости слишком объемной.

Предлагается для оценки проектов использовать следующие группы показателей [1]: показатели, связанные с целями корпорации, ее стратегиями, политиками и ценностями, рыночные критерии, научно-технические, финансовые, производственные, внешние и экономические критерии.

Показатели, связанные с целями корпорации, ее стратегиями, политиками и ценностями. Разделим все исследуемые проекты на высоко- и низкобюджетные. Высокобюджетными будем называть такие проекты, планируемые затраты на реализацию которых за весь период внедрения услуги превышают некоторое пороговое значение M , низкобюджетными – если не превышают. Значение M определяется руководством организации в зависимости от масштабов компании.

В случае высокобюджетных проектов обязательным условием является совместимость проекта с текущей стратегией компании и ее долгосрочными планами, в противном случае риск недофинансирования проекта становится весьма существенным. Для низкобюджетных проектов ситуация несколько иная. Так как они не требуют значительного финансирования, то они могут быть выполнены независимо от совместимости или несовместимости с текущей стратегией, если лицо, принимающее решение, уверено в их успехе. Для такого типа проектов более важным становится показатель согласованности проекта с представлениями о компании. В случае невыполнения данного критерия появляется риск потери лояльности среди клиентов, пользователей основных услуг компании. Для высокобюджетных проектов не имеет смысла отдельно учитывать показатель согласованности проекта с представлениями о компании, так как он уже опосредованно учитывается в показателе совместимости с текущей стратегией.

Любой проект по внедрению дополнительных услуг имеет высокую степень неопределенности конечного результата. Именно поэтому политика корпорации в отношении риска и нововведений оказывает определяющее влияние на выбор таких проектов. Политика компании в отношении риска будет измеримо учитываться в других показателях иных групп критериев, поэтому данный показатель отдельно мы рассматривать не будем.

Другие показатели этой группы [1], на наш взгляд, не играют значительной роли при выборе инновационных проектов внедрения VAS. Проекты внедрения дополнительных услуг не оказывают определяющего влияния на стратегию оператора связи, поэтому нет существенной необходимости принимать во внимание допустимость изменений в стратегии фирмы с учетом потенциала проекта. Показатель соответствия временного аспекта проекта требованиям корпорации для проектов по внедрению VAS не способствует отбору проектов, так как практически все подобные проекты внедряются в сжатые сроки.

Рыночные показатели. Рыночные потребности переменчивы, что особенно проявляется для инновационных дополнительных услуг. Поэтому наличие ярко выраженной потребности при выборе проекта, не означает, что рыночная перспектива гарантирована. Услуга может быть востребована на совершенно ином рынке, где ранее и не предполагалось, а мо-

жет абсолютно не пользоваться спросом, хотя все изначальные прогнозы свидетельствовали об обратном. Поэтому для низкобюджетных проектов не будем уделять серьезного внимания выявлению потребностей, оставим показатель соответствия проекта четко определенным потребностям рынка только для высокобюджетных проектов.

Такие рыночные показатели, как потенциальный объем продаж, уровень конкуренции, ценообразование, каналы распределения и воздействие на существующие продукты необходимо рассматривать для обеих групп проектов. Эти показатели взаимосвязаны и оказывают непосредственное влияние на экономический результат деятельности компании.

Временной аспект, как уже отмечалось, для проектов внедрения VAS не является определяющим критерием. А вот стартовые затраты значительным образом влияют на выбор проектов. Это объясняется высокой неопределенностью рыночных перспектив инновационных дополнительных услуг. Стартовые затраты являются одним из показателей, характеризующих отношение руководства к риску и нововведениям.

Научно-технических показателей. Дополнительные услуги, как правило, функционируют на программно-аппаратных средствах сторонних разработчиков, интегрированных в основную сеть оператора. Поэтому при выборе проекта необходимо учитывать совместимость предлагаемой платформы с существующей сетью оператора.

Проекты по внедрению VAS обычно не затрагивают кардинальным образом существующую техническую структуру сети, поэтому такие показатели, как соответствие проекта стратегии НИОКР и допустимость изменений в стратегии НИОКР с учетом потенциала проекта не оказывают существенного влияния на выбор проекта. Поскольку оператор чаще всего не является разработчиком VAS платформы, то для него модификация и проведение исследований собственными силами, с целью ее улучшения, становится неактуальной задачей. В этой связи показатель, определяющий возможность выполнения будущих НИОКР на базе данного проекта и новой, технологии, при выборе проектов VAS, использовать мы не будем. Также неопределяющим фактором становится наличие квалифицированных научно-технических ресурсов внутри компании для реализации проекта, поскольку такие специалисты должны быть в компании партнере.

Вероятность технического успеха проекта, стоимость и время разработки, его патентная чистота и воздействие на другие проекты – все эти научно-технические показатели должны быть учтены при выборе проекта для финансирования.

Финансовые критерии. Для успешной реализации обоих типов проектов необходимо наличие достаточных финансовых ресурсов в нужные моменты времени. Также следует учесть планируемую стоимость НИОКР, вложения в производство и маркетинг, операционные расходы. Кроме того, требуется определить время достижения точки безубыточности и максимальное отрицательное значение расходов, потенциальный годовой размер прибыли, а также оценить соответствие проекта критериям эффективности инвестиций, принятым в компании, если таковые имеются.

Производственные критерии. Качественное оказание новых дополнительных услуг может потребовать значительного изменения некоторых бизнес-процессов или существенной модификации организационной структуры предприятия. Поэтому обязательно необходимо учесть при отборе проектов такой показатель, как необходимость и масштаб организационных изменений, описывающий необходимость создания новых бизнес-процессов и изменения организационной структуры, потребность в наборе и обучении персонала. Также при выборе проектов следует учесть необходимость в использовании, стоимость покупки и наличие клиентского оборудования и материалов.

Внешние и экономические критерии. Отрасль связи в России всегда была и остается стратегически важной отраслью экономики, пронизывающей все без исключения сферы современного общества. От качества, скорости и своевременности передачи информации зависит правильность принимаемых решений как на уровне федеральных, региональных и муниципальных властей, так и на уровне отдельных хозяйствующих субъектов. Более того,

системы связи играют важную роль в процессе доведения до каждого члена общества политической, общественной, культурной, образовательной и другой информации. Трудно переоценить и функции телекоммуникационных систем в вопросе сохранения национальной безопасности. Поэтому государство вынуждено жестко регулировать на законодательном уровне все происходящие в отрасли процессы. В силу этого такой показатель, как текущее и перспективное законодательство, необходимо учитывать при отборе для финансирования инновационных VAS проектов.

Так как одной из главных особенностей исследуемого типа проектов является участие в них сторонних разработчиков платформ, будем также рассматривать для высокобюджетных проектов критерии, связанные с оценкой опыта, репутации и финансового состояния компании-партнера. Для малобюджетных такие показатели учитывать не будем, поскольку под такие проекты компании часто создаются с нуля и, следовательно, не имеют необходимой для рассмотрения информации.

Других факторов из группы внешних и экономических критериев, оказывающих значительное влияние на выбор VAS проектов, нами не отмечено.

Таким образом, мы выявили показатели, представленные на рис. 1 и 2, которые целесообразно учитывать при выборе для финансирования инновационных проектов внедрения дополнительных услуг.

Далее выделим и проанализируем основные особенности выбранной системы показателей. Во-первых, все показатели можно разделить на две группы. К первой группе относятся показатели, невыполнение которых или недостижение определенного порогового значения автоматически исключает проект из числа претендентов на финансирование. Назовем такие показатели, *отборочными*. Ко второй группе отнесем все остальные показатели и назовем их *оценочными*. Логично в алгоритм отбора проектов для финансирования ввести отборочный тур, который будет отсеивать явно неудовлетворяющие требованиям компании инновации. Отборочные показатели представлены на рис. 3.



Рис. 1. Показатели оценки инновационных проектов внедрения VAS для высокобюджетных проектов

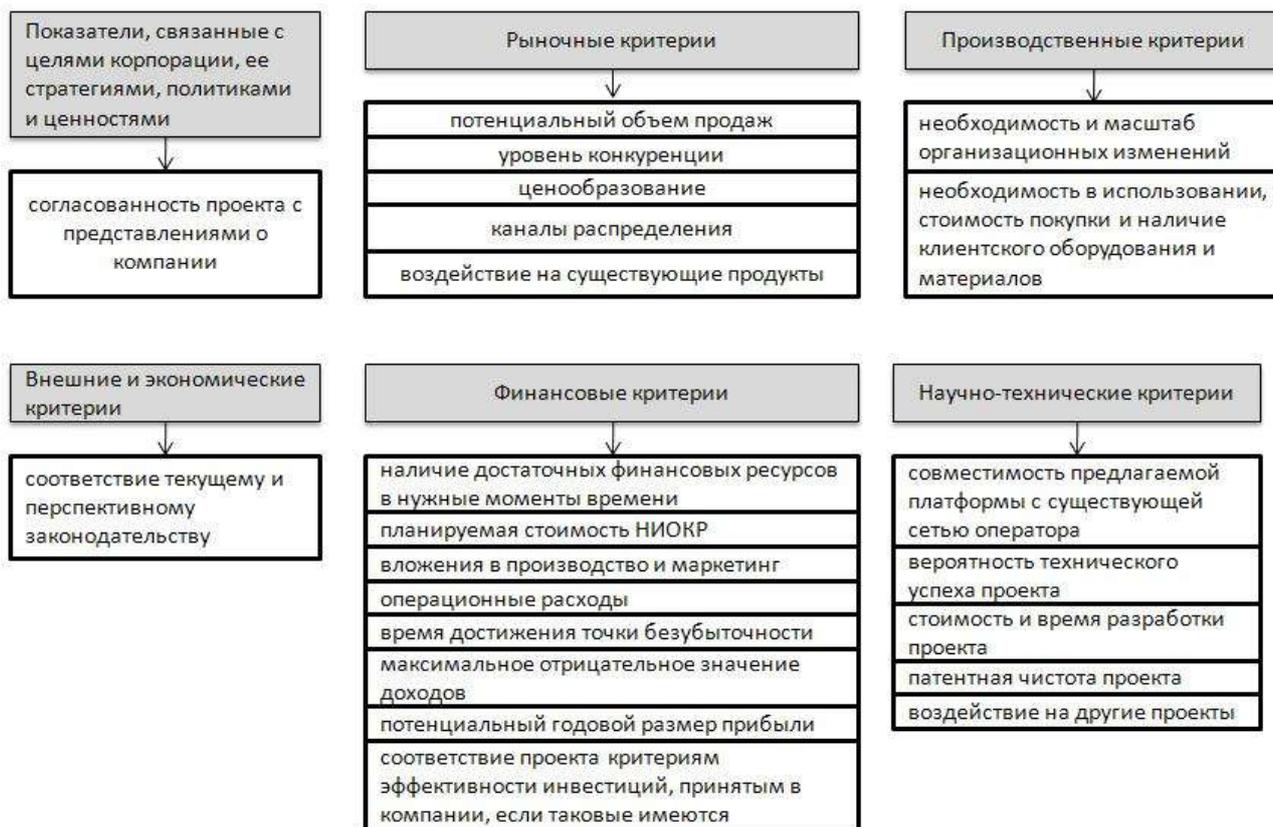


Рис. 2. Показатели оценки инновационных проектов внедрения VAS для низкобюджетных проектов



Рис. 3. Отборочные показатели оценки инновационных проектов внедрения VAS

Во-вторых, оставшихся показателей достаточно много для восприятия, они неравноценны, имеют различную степень неопределенности, некоторые показатели находятся в антагонистических отношениях, т.е. улучшение по одному критерию обязательно ведет к ухудшению по другим. Поэтому принятие эффективного решения по отбору проектов для финансирования по такой системе показателей невозможно. Представленную систему показателей необходимо приводить к более удобному виду.

Рассмотрим существующие наиболее известные и употребляемые агрегированные показатели, используемые для оценки инновационных проектов: чистая текущая стоимость (NPV), индекс рентабельности (PI), период окупаемости с учетом дисконтирования (DPP), внутренняя норма рентабельности (IRR). Подробное описание этих показателей можно найти в [4].

Эти показатели агрегируют в себе значительную часть выявленных факторов, которые, по-нашему мнению, должны быть учтены в ходе выбора проектов. В случае использования их вместе они являются достаточно адекватной заменой большинства оценочных критериев (рис. 1, 2).

В агрегирующих показателях не нашли свое отражение следующие критерии: воздействие на существующие продукты; вероятность технического успеха проекта; воздействие на существующие технические проекты; необходимость и масштаб организационных изменений; соответствие проекта критериям эффективности инвестиций, принятым в компании, если таковые имеются. При этом последний показатель является отборочным, но уже на этапе оценки.

Таким образом, для выбора для финансирования инновационных проектов внедрения дополнительных услуг мы имеем систему отборочных показателей, проверяемых на этапе предварительного отбора проектов, восемь оценочных показателей и один отборочный, позволяющий отсеять неподходящие проекты уже на этапе оценки.

Для решения общей задачи выбора проектов осталось определить значимость оценочных критериев и найти метод их свертки в один общий количественный критерий эффективности, наиболее отражающий специфику инновационных проектов по внедрению дополнительных услуг.

Библиографический список

1. **Гольдштейн, Г.Я.** Стратегический инновационный менеджмент: учеб. пособие / Г.Я. Гольдштейн. – Таганрог: Изд-во ТРТУ, 2004. – 267 с.
2. **Литвак, Б.Г.** Разработка управленческого решения: учебник / Б.Г. Литвак. – 3-е изд., испр. – М.: Дело, 2002. – 392 с.
3. Менеджмент в телекоммуникациях / под ред. Н.П. Резниковой, Е.В. Деминой. – М.: Эко-Трендз, 2005. – 392 с.
4. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. Вторая редакция. Официальное издание / рук. авт. кол.: В.В. Коссов, В.Н. Лившиц, А.Г. Шахнозаров. – М.: Экономика, 2000. – 421 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2011*

S.N. Yashin, P.I. Lazarev

MEASURE SELECTION FOR INNOVATIVE PROJECTS EFFICIENCY ASSESSMENT FOR VALUE ADDED SERVICES

Measure selection for innovative projects efficiency assessment for value added services is substantiated in the paper. Measure detection is accomplished separately for two different types of project: high-budget and low-budget. Selection is performed according to the following groups of criteria: market, scientific and technical, financial, industrial, external and criteria associated with corporate targets, strategies, politics and values.

Key words: Efficiency, innovative project, value added services, assessment criteria, high-budget and low-budget projects, selection and valuation measure.

УДК 339.977

Ф.Ф. Юрлов, В.Н. Новикова

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ИННОВАЦИОННЫХ РЕШЕНИЙ В ЭКОНОМИКЕ В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Проведен анализ принципов оптимальности, применяемых для выбора предпочтительного инновационного решения. Выбор оптимального инновационного решения может быть получен только при всесторонней оценке инновационной деятельности предприятия. Поэтому определение наиболее предпочтительных альтернатив должно осуществляться на основе многокритериального выбора. В статье приведен пример выбора эффективного инновационного решения в условиях неопределенности при применении разных принципов оптимальности: оптимизма, пессимизма, гарантированного результата.

Ключевые слова: принципы оптимальности, принцип Парето, неопределенность, эффективное множество инновационных решений.

В настоящее время для оценки эффективности инновационных решений, принимаемых при анализе экономических систем различного назначения, находят наибольшее применение детерминированные и вероятностные модели. При детерминированном подходе предполагается, что результаты анализа могут быть определены точно. Такой подход при использовании рыночных методов хозяйствования имеет существенные ограничения. Это обусловлено значительной неопределенностью и непредсказуемостью внешней среды. Поэтому более адекватным является подход, базирующийся на применении вероятностных моделей. Однако при использовании этих моделей возникают следующие проблемы:

- отсутствие или недостаток информации об анализируемых социально – экономических процессах;
- трудности определения законов распределения случайных величин, характеризующих внешнюю среду, а также трудности, связанные с определением параметров распределения указанных законов распределения.

Исходя из изложенного, возникает необходимость разработки и применения теорий, которые не базируются на использовании вероятностных моделей.

Сущность проблемы оценки эффективности применяемых решений в экономике в условиях полной неопределенности заключается в следующем.

1. Для достижения поставленных целей (экономических, технических, социальных и др.) формируется набор способов достижения целей:

$$X = \{X_i\}, i = \overline{1, n}.$$

В качестве X_i выступают управляемые факторы, которые являются контролируемым лицом, принимающим решение. Факторы X_i могут иметь экономическое, организационное, финансовое и иное содержание.

2. Внешняя среда характеризуется набором неуправляемых факторов:

$$Y = \{Y_j\}, j = \overline{1, J}.$$

К особенностям неуправляемых факторов относят то, что вероятности их появления неизвестны. Данные факторы не могут контролироваться лицом, принимающим решение. В качестве указанных факторов могут выступать: природные факторы, инфляционные процессы, внешнеэкономические условия, действия конкурентов и т.п.

3. Для оценки эффективности анализируемых систем формируется множество показателей

$$K = \{K_m\}, m = \overline{1, M}.$$

Показатели K_m могут иметь экономическое, инновационное, техническое и иное содержание.

4. Определяются зависимости показателей эффективности от управляемых и неуправляемых факторов, т.е. зависимости вида

$$K_m = f_m(X, Y).$$

5. Составляются матрицы эффективности

$$\|K_m(X, Y)\|, m = \overline{1, M}.$$

6. Формируются принципы оптимальности

$$G = \{G_l\}, l = \overline{1, L}.$$

В качестве принципов G_l могут выступать принципы: оптимизма, пессимизма, гарантированного результата и др.

7. Используя матрицы эффективности и сформированные принципы оптимальности, осуществляют выбор оптимального решения (x_0, y_0) .

Задача 1. Рассматривается задача определения объемов производства продукции при неопределенной величине спроса на данную продукцию.

Для решения поставленной задачи составляется матрица эффективности в виде табл. 1.

Таблица 1

q_c	q_{c1}	q_{c2}		q_{cn}
q_n				
q_{n1}	E_{11}	E_{12}		E_{1n}
q_{n2}	E_{21}	E_{22}		E_{2n}
q_{nm}	E_{m1}	E_{m2}		E_{mn}

Примечание: q_c – величина спроса; q_n – величина производства продукции; E_{ij} – показатель эффективности принимаемых решений.

Набор показателей спроса $q_c = \{q_{ci}\}, i = \overline{1, n}$ считается известным, однако при этом неизвестна конкретная величина $q_{ci} \in q_c$, определяемая в данной ситуации.

Набор $q_n = \{q_{nj}\}, j = \overline{1, J}$ также известен. При этом необходимо определить величину $q_{nj} \in q$, которая обеспечит оптимальное значение показателя E_{ij} .

Можно показать, что при использовании различных принципов оптимальности $G_l, l = \overline{1, L}$ оптимальные решения будут различными. Покажем это на конкретном примере, относящемся к рассматриваемой задаче.

Пример 1. Анализируется матрица эффективности, представленная в виде табл. 2.

Таблица 2

q_c	q_{c1}	q_{c2}	q_{c3}	E_{\max}	E_{\min}
q_n					
q_{n1}	10	8	3	10	3
q_{n2}	4	6	9	9	4
q_{n3}	5	12	7	12	5
q_{n4}	4	11	5	11	4

Допустим, что для выбора эффективного решения используются принципы оптимизма и пессимизма.

Принцип оптимизма запишется в виде

$$q_{n \text{ опт}} = \max_{q_n \in Q_n} \max_{q_c \in Q_c} E(q_n, q_c).$$

Используя данные табл. 2, получим

$$E_{\text{опт}} = 12 \text{ ед.}; q_{n \text{ опт}} = q_{n3}.$$

Принцип пессимизма определяется следующим образом:

$$E_{\text{песс}} = \min_{q_n \in Q_n} \min_{q_c \in Q_c} E(q_n, q_c) = 3 \text{ ед.}$$

Следовательно, $q_{n \text{ песс}} = q_{n1}$.

Таким образом, применение данных принципов приводит к разным выводам относительно эффективности принимаемых инновационных решений. Это существенно затрудняет адекватную оценку анализируемых систем. Можно сделать вывод о необходимости дальнейшего развития теории и практики определения эффективных решений в условиях неопределенности.

Допустим, что для выбора эффективных решений используются принципы гарантированных потерь и Сэвиджа.

Принцип гарантированных потерь формулируется следующим образом:

$$\Pi_{\Gamma} = \min_{x' \in X} \max_{y \in Y} \Pi(x', y),$$

$$\Pi(x', y) = E(x', y)_{\max} - E(x, y),$$

где x' – фиксированное значение x .

Принцип Сэвиджа определяется следующим образом:

$$Y_{\Gamma} = \min_{x \in X} \max_{y' \in Y} Y(x, y'),$$

где $Y(x, y') = \max_x E(x, y') - E(x, y')$ представляет собой ущерб, обусловленный выбором

неоптимальной стратегии x ; и y' – фиксированное значение y .

Матрица эффективности представлена в виде табл. 3.

Таблица 3

$x \backslash y$	y_1	y_2		y_n
x_1	E_{11}	E_{12}		E_{1n}
x_2	E_{21}	E_{22}		E_{2n}
x_m	E_{m1}	E_{m2}		E_{mn}

Матрица эффективности для принципа гарантированных потерь определяется в виде табл. 4.

Таблица 4

$x \backslash y$	y_1	y_2		y_m	$\max \Pi$
x_1	Π_{11}	Π_{12}		Π_{1m}	$\Pi_{1 \max}$
x_2	Π_{21}	Π_{22}		Π_{2m}	$\Pi_{2 \max}$
x_n	Π_{n1}	Π_{n2}		Π_{nm}	$\Pi_{n \max}$

Примечание: $\Pi(x, y)$ – потери, обусловленные неоптимальным выбором стратегий x .

Матрица ущербов в соответствии с принципом Сэвиджа приведена в табл. 5.

Таблица 5

$x \backslash y$	y_1	y_2		y_m	$\max Y$
x_1	Y_{11}	Y_{12}		Y_{1m}	$Y_{1 \max}$
x_2	Y_{21}	Y_{22}		Y_{2m}	$Y_{2 \max}$
x_n	Y_{n1}	Y_{n2}		Y_{nm}	$Y_{n \max}$

Используя табл. 3, строим матрицу потерь (табл.4), на основании которой получаем столбец значений максимумов потерь Π_{\max} . С помощью табл. 3 также, определяем столбец значений максимумов ущерба Y_{\max} . После нанесения данных указанных столбцов на координатные оси можно определить область оптимальных решений с использованием принципа Парето (рис. 1).

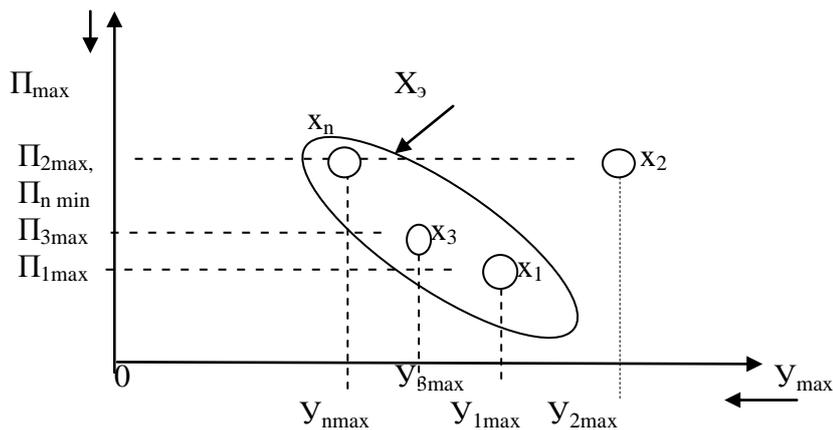


Рис.1. Область оптимальных решений по принципу Парето

В соответствии с рис. 1, эффективное решение включает набор альтернатив $X_3 = \{x_1, x_3, x_n\}$.

Пример 2. Допустим, что матрица эффективности имеет вид, представленный в виде табл. 6.

Таблица 6

$x \backslash y$	y_1	y_2	y_3
x_1	7	3	2
x_2	5	1	9
x_3	1	7	4
x_4	2	10	6

Используя данные табл. 6, строим матрицу потерь (табл. 7) и матрицу Сэвиджа (ущербов) (табл. 8).

Таблица 7

$x \backslash y$	y_1	y_2	y_3	$\max \Pi$
x_1	0	4	5	5
x_2	4	8	0	8
x_3	6	0	3	6
x_4	8	0	4	8

Таблица 8

$x \backslash y$	y_1	y_2	y_3	$\max Y$
x_1	0	7	7	7
x_2	2	9	0	9
x_3	6	3	5	6
x_4	5	0	3	5

С помощью табл. 7 и 8 определяем эффективное решение, представленное на рис. 2.

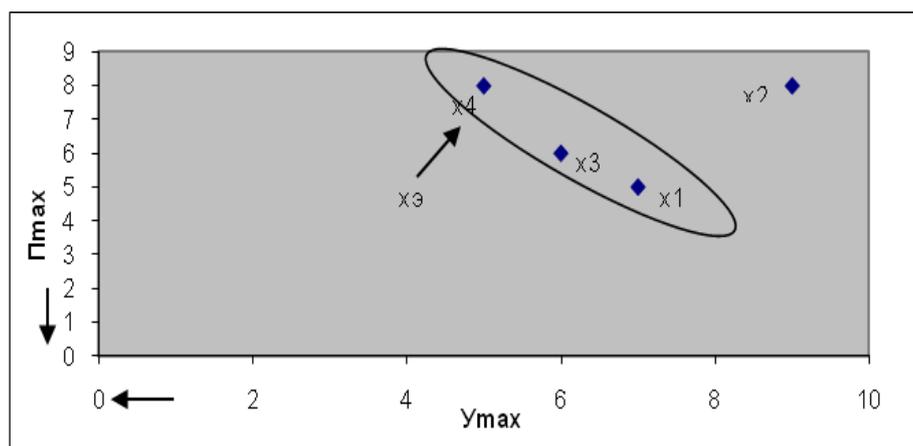


Рис. 2. Область оптимальных решений по принципу Парето

В соответствии с рис. 2, эффективное решение включает точки x_1, x_3, x_4 , т.е. $X_3 = \{x_1, x_3, x_4\}$.

Анализ принципов оптимальности показал, что их применение при выборе эффективных инновационных решений может приводить к различным результатам. Следовательно, указанные принципы необходимо применять, используя многокритериальный подход, в частности, принцип Парето. Он относительно прост в использовании и не накладывает на показатели эффективности принимаемых инновационных решений дополнительных ограничений. Принцип Парето позволяет сформировать эффективное инновационное решение.

Таким образом, применение принципов гарантированных потерь, Сэвиджа и Парето позволяет выбрать эффективное инновационное решение в условиях неопределенности и многокритериальности.

Библиографический список

1. Методологические аспекты и инструментарий принятия эффективных решений при оценке инновационной деятельности экономических систем: монография / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. – 226 с.
2. Методы и модели в экономике: учебник / Ф.Ф. Юрлов [и др.]; НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – Н. Новгород, 2010. – 243 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.01.2011*

F.F. Jurlov, V.N. Novikova

**EVALUATIONS OF EFFECTIVENES OF INNOVATIVE SOLUTIONS
IN ECONOMICS SUBJECT TO THE EXISTENCE OF INDETERMINACY**

The analysis of principles of optimality applied for the selection of preferable innovative solutions. The selection of appropriate innovative solution might be achieved only by means of overall assessment of the innovative activities of the enterprise. That is why the determination of the most preferable alternatives must be carried out on basis of multicriteria choice. The example of selection of an effective innovative solution in conditions of indeterminacy during the use of various principles of optimality is introduced in this article.

Key words: principles of optimality, Pareto's principle, indeterminacy, effective set of innovative solutions.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 159.9

Е.А. Зайцева, И.А. Савченко

ПРОБЛЕМА ЛИДЕРСТВА В ОТЕЧЕСТВЕННОЙ НАУКЕ: ЭВОЛЮЦИЯ ВЗГЛЯДОВ И ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлен анализ теоретических исследований проблемы лидерских способностей в отечественной науке. Показано, каким образом ученые определяют место лидерских качеств в системе свойств личности. Описываются различные модели структуры способностей лидера и организатора и способы выявления наиболее оптимальных условий проявления этих способностей.

Ключевые слова: лидерство, организаторские способности, вожачество, основные и опорные свойства, биологизаторские и социобиологизаторские теории, системно-деятельностный подход.

Лидерство является одной из традиционных и важнейших проблем психологической науки. На ее исследование были направлены работы многих отечественных и зарубежных психологов (А.Г. Ковалев и В.Н. Мясищев, Н.Д. Левитов, Л.С. Уманский, С. Джибб, Э. Гизелли и Э. Браун, Дж. Хемфилл и др.).

Ученые определяют место лидерских качеств в системе свойств личности, предлагают различные модели структуры способностей лидера и организатора, выявляют наиболее оптимальные условия проявления этих способностей. Анализ теоретических исследований проблемы лидерских способностей в отечественной науке представлен в данной статье.

До начала 20-х годов XX столетия в отечественной научной литературе проблема личности лидера и организаторских способностей не ставилась. Отдельные стороны проблемы обсуждались в контексте влияния одной личности на другую и решались в религиозно-идеалистическом плане, либо растворялись в свете философско-психологической дискуссии на тему глобальной гуманитарной проблемы «личности и масс», «роли личности в истории». Примером работ второго типа могут служить статьи Е. Лозинского «Вожди и толпа» [22], «Воспитание вождя» [23]. В статьях дан обзор современной ему зарубежной и отечественной литературы по рассматриваемой проблематике и приведены умозрительные заключения о взаимоотношении вождя и толпы, о тайнах «чарующего влияния вождя».

В послеоктябрьский период вопросы организаторской деятельности и организаторских способностей привлекают к себе внимание в связи с возросшей актуальностью проблем «детского вожачества», а также вопросов управления и руководства предприятиями. Остановимся лишь на некоторых работах этого периода, опубликованных преимущественно в 20-х годах. Так, видный педагог и психолог Е.А. Аркин считал, что проблема вожачества должна быть признана одной из основных проблем при изучении эволюции детского коллектива. Основываясь на многолетних наблюдениях, Е.А. Аркин сделал вывод, что вожаки оказывают влияние на психологическую атмосферу детского дошкольного коллектива «иногда в большей степени, чем дидактический материал и даже педагогический персонал» [1]. Основным качеством ребенка-вожака автор считает инициативность.

Специальной работой, посвященной детскому вожачеству, является статья В.Н. Тагомлицкой «Дети – вожаки в детских домах г. Одессы» [36]. На основе анкетного метода автор устанавливает уровень умственного развития и знаний, моральные качества, способности и другие особенности вожаков, выделяет типы вожаков и подробно описывает их деятельность. Вожачество, по мнению автора, предопределяется рядом свойств: положительной волевой установкой, развитой интеллектуальной сферой, инициативой и другими качествами.

Обобщающий материал по проблеме детского вожачества приводит П.Л. Загоровский. Руководствуясь данными зарубежных и отечественных источников, а также на основе собственных наблюдений он выделяет «центральные качества» вожаков: волю и интеллект, добавляя, что «физическая сила тоже играет роль» [8].

В первые десятилетия советского периода был собран объемный фактический материал по проблеме вожачества, разработано несколько интересных методик. Во второй половине 30-х годов эти исследования были прекращены, а их позитивные результаты в последующие два десятилетия не были использованы ни в одной педагогической или психологической работе. Авторы исследований, посвященных вопросу детского вожачества, обвиняли в заимствовании педологических идей, неправильном определении коллектива, методологически несостоятельном объяснении ряда фактов и явлений, перенесении на советскую почву положений буржуазных учений.

Необходимо, однако, отметить, что в области педагогики определенный практический материал по проблеме организаторской деятельности и способностей организатора содержится в произведениях А.С. Макаренко [25]. В контексте коммунистического воспитания он четко и настойчиво включал в проект воспитуемой личности черты организатора, умеющего приказывать товарищу и подчиняться товарищу. Для достижения этой цели в колонии им. Горького и в коммуне им. Дзержинского была разработана и проверена система организации детского коллектива и педагогического руководства. Определяющими факторами развития организаторских способностей А.С. Макаренко считал всю систему воспитания в коллективе, через коллектив и для коллектива, выделяя при этом организацию самоуправления, развитие общественной активности воспитанников, институт командиров, сводные отряды, дежурства, систему внутриколлективных зависимостей, сменяемость командиров.

Он анализирует также организаторскую деятельность воспитателя. К необходимым составляющим таланта организатора-педагога А.С. Макаренко относит: ум, рассудительность, предприимчивость, живость, бодрость, твердость характера, требовательность, умение прекрасно рассчитать работу, «расставить пацанов», найти какие-то новые способы, «новые хватки», смелость, сдержанность, «способность видеть каждого хлопца насквозь и безошибочно оценивать его настоящую сущность», энергичность, напористость, работоспособность, прекрасную память, способность «схватить сразу множество вещей», привычку к волевому напряжению и др. Педагогическая разработка проблемы формирования личности организатора в коллективе, предпринятая А.С. Макаренко, безусловно, имеет определенное практическое значение. Однако предложенная им система воспитания организаторских способностей носит идеологизированный характер и не имеет достаточного теоретического обоснования.

В период нэпа появляются отдельные работы, посвященные деятельности организатора в области промышленного руководства. Наиболее значительными из них являются обобщающие статьи и книги видного общественного деятеля П.М. Керженцева. Он первым в отечественной науке попытался внести ясность в определение основных организационных терминов – руководить, администрировать, организовать [10]. В работе «Принципы организации» [11] он выделяет способности организатора (администратора): умение заставить других людей выполнять свои задания, твердый характер, настойчивость, энергию, инициативу, склонность к систематической плановой работе.

Интересны замечания П.М. Керженцева о двух типах организаторов:

- стратегов, создающих планы и предвидящих события;
- организаторов, умеющих быстро ориентироваться в конкретной обстановке и принимать правильные и твердые решения.

Однако работы П.М. Керженцева, как и многие психолого-педагогические исследования, были забыты. Вплоть до второй половины 50-х годов к проблемам организаторских способностей и организаторской деятельности исследователи не возвращались.

В конце 50-х годов на фоне возросшего интереса психологов к феномену способностей человека возродился и научный поиск в рамках проблемы организаторских способностей. В монографии А.Г. Ковалева и В.Н. Мясищева [14] организаторские способности рассматриваются наиболее полно. Обобщив научные данные об особенностях выдающихся организаторов, авторы пришли к выводу, что организаторская деятельность требует знания того дела, на которое она направлена, высокого уровня интеллекта (наблюдательности, гибкости ума, творческой инициативы), определенных характерологических качеств личности (увлеченности делом, ответственного к нему отношения, знания людей и умелого подхода к ним, решительности и твердости воли).

В структуре организаторских способностей авторы выделяют так называемые «ведущие» (основные) и «опорные» свойства. К ведущим компонентам организаторских способностей они относят:

- гибкость ума в сочетании с творческим воображением, которое проявляется в находчивости и изобретательности, умении даже в тяжелых условиях найти выход;
- высокий уровень развития воли (особенно смелости, решительности и твердости). Развитие организаторских способностей возможно, по мнению авторов, на базе основного «опорного свойства» – целостного видения или специфической наблюдательности (интеллектуального качества личности, проявляющиеся в способности тонко ориентироваться в действительности, качествах людей и их возможностях).

Среди исследований, в которых так или иначе затрагивается проблема организаторских способностей, особое место принадлежит работам Л.С. Уманского [38], изучавшего такие вопросы, как природные предпосылки организаторских способностей, структура свойств личности организатора, специфические свойства и индивидуальные различия личности способного организатора, особенности проявления организаторских способностей в различных видах деятельности, динамическая структура личности с точки зрения ее организаторских возможностей.

На основе анализа обобщенных психологических исследований Л.И. Уманский представляет следующую структуру качеств и свойств личности способного организатора:

1. *Качества направленности личности* – целеустремленность, принципиальность, бескорыстие, правдивость, коллективизм и др..

2. *Подготовленность к деятельности* (целевой или организаторской).

3. *Общие качества* – общительность, общий уровень развития, практический ум, наблюдательность, работоспособность, активность, инициативность, настойчивость, организованность, самостоятельность, самообладание.

4. *Специфические свойства* – организаторское чутье (психологическая избирательность, практически-психологический ум, психологический такт), способность к эмоционально-волевому воздействию (общественная энергичность, требовательность, критичность), склонность к организаторской деятельности (потребность в организаторской работе, самостоятельное включение в работу, удовлетворенность в процессе организаторской деятельности и т.п.).

5. *Индивидуальные характеристики организаторских способностей* – диапазон деятельности, возрастной диапазон, стиль руководства, стиль деятельности.

На основании результатов эмпирических исследований автор делает вывод, что наличие специфических свойств является основным критерием отличия личности способного организатора от личности организатора неспособного. Из общей численности всех способных организаторов, обследованных в лаборатории Л.И. Уманского, выраженность или яркая выраженность специфических свойств была обнаружена более 90% случаев.

Концепция структуры личности способного организатора, предложенная Л.И. Уман-

ским, имеет большое как теоретическое, так и практическое значение. Особую ценность исследования Л.И. Уманского представляют прежде всего потому, что в них анализируется как содержательная (статическая), так и процессуальная (динамическая) сторона организаторских способностей.

Авторы многих исследований по проблеме организаторских способностей большое внимание уделяют организаторским способностям педагогов. Так, Н.Д. Левитов считает организаторские способности важным элементом в структуре способностей учителя. Основной составляющей организаторских способностей педагога, по его мнению, является речь, т.е. хорошее владение вербальными средствами общения. Таким образом, организаторские способности учителя – это умение организовать учащихся путем их убеждения в необходимости выполнения определенного вида деятельности.

В работе Б.З. Вульфома и М.М. Поташника [4] анализируются особенности личности организатора внеклассной и внешкольной воспитательной работы. В ряду многочисленных способностей, необходимых организатору, авторы выделяют основные:

- инструкторские (владение методикой воспитательной работы);
- агитаторские (способность убеждать, воодушевлять коллектив);
- ораторские (умение ярко и убедительно говорить).

В структуру функций организатора педагогического коллектива (директора школы) Р.Х. Шакуров включает, наряду с другими, еще и организационную функцию, содержащую следующие подфункции: целевую организацию коллектива, его активизацию, профессиональное совершенствование, политическое воспитание и сплочение. Организаторские способности автор соответственно рассматривает как способность организатора успешно выполнять данные функции. При этом Р.Х. Шакуров подчеркивает, что организатора нельзя оценивать лишь путем измерения отдельных его качеств, так как успех организаторской деятельности является интегральным результатом взаимодействия целостного «ансамбля» психических функций и образований.

В психологической литературе имеются также работы, в которых рассматриваются организаторские качества школьников, главным образом, подростков. Так, В.Л. Сопаровская [35] в диссертации «Планирование в организаторской деятельности подростков» приводит данные, показывающие, что успех организаторской деятельности определяется правильной самоорганизацией подростка. В связи этим, способность к самоорганизации рассматривается автором как основная организаторская способность. В диссертационном исследовании В.Н. Николаева [28] обобщен опыт работы учебно-воспитательного персонала школы-интерната по развитию общественной активности и самоуправления учащихся. При формировании этих качеств личности развиваются и организаторские способности. Однако автор не дифференцирует понятия «организаторские навыки», «умения», «способности», не называет ни одной конкретной способности организатора, что делает его подход достаточно поверхностным.

В учебном пособии «Психология одаренности детей и подростков» [33] перечисляются основные характеристики организатора:

- интеллект выше среднего;
- умение принимать решения;
- способность иметь дело с абстрактными понятиями, планированием будущего, временными ограничениями;
- ощущение цели, направления движения;
- гибкость, «приспосабливаемость»;
- чувство ответственности;
- уверенность в себе и знание себя;
- настойчивость; терпимость и терпение в работе с людьми;
- энтузиазм;
- умение ясно выражать мысли в устной и/или письменной форме.

Некоторыми авторами изучались организаторские качества лиц, обучающихся в специализированных учебных заведениях (военных вузах или училищах). Так, В.Н. Климовец [13] на примере курсантов военных училищ ставит задачу формирования у них организаторских умений. К их числу он относит:

- умение организовать свое время, избегать пустой траты времени;
- умение организовать свою деятельность по самовоспитанию, следить за темпом самовоспитания;
- умение организовать свое поведение – контролировать свои действия, движения, мимику, эмоции;
- способность организовывать свою общественную деятельность, приобретая в процессе ее знания и умения, необходимые в будущей профессионально-организаторской деятельности;
- умение содействовать преподавателям и офицерам-воспитателям в организации курса лекций по самовоспитанию.

Аналогичную задачу А.Н. Пахомов [29] ставит применительно к формированию профессионально важных качеств будущего военного специалиста (помощника командира подразделения по финансово-экономической работе) у курсантов военно-экономического вуза. На основании экспертных оценок автор выделяет десять таких качеств:

- профессиональную компетентность;
- требовательность, умение поддерживать дисциплину во взводе;
- способность быстро реагировать на изменение ситуации;
- умение понимать и убеждать людей;
- умение воспитывать подчиненных личным примером;
- умение организовать подчиненных на выполнение поставленных задач;
- умение доводить начатое дело до конца;
- способность принимать обоснованные решения;
- умение гибко применять методы наказания и поощрения;
- способность действовать, не ожидая подсказки.

Исследуя структуру военно-профессиональных умений командира подразделения внутренних войск и проблему их формирования у курсантов военных вузов, В.Н. Устюжанин [39] определяет организационно-управленческие способности и умения как самый важный компонент военно-профессиональных умений командира. В группу организационно-управленческих умений командира подразделения автор включает следующие специальные умения:

- определять цели управленческой деятельности;
- организовать сбор, обобщение, анализ информации для принятия решения и своевременного реагирования на изменения обстановки;
- принимать решения с учетом личных качеств подчиненных, конкретных задач и условий военно-профессиональной деятельности;
- сосредотачиваться на выполнении поставленных задач, определять главное;
- планировать мероприятия повседневной жизни подразделения, осуществлять контроль и помощь;
- распределять, стимулировать и оценивать труд отдельного военнослужащего и воинского подразделения;
- поддерживать с подчиненными деловые контакты с учетом их психологических особенностей;
- организовывать тактические действия взвода (роты), управлять подразделением и огнем;
- выполнять установленные в войсках нормативы по боевой и специальной подготовке;
- организовывать служебно-боевую деятельность подразделения;

- осуществлять подбор, подготовку личного состава к службе и контроль за ее несением;
- организовывать боевую деятельность подразделения в сложных условиях.

Кроме того, автор выделяет ряд качеств, характеризующих психологическую подготовленность к деятельности командира подразделения: эмоционально-волевую и нервно-психическую устойчивость, подготовленность к самостоятельной работе, самосовершенствованию и саморазвитию, адаптивные способности, коммуникативные способности.

Итак, в контексте теоретического обоснования и практического обеспечения учебно-воспитательного процесса проблема организаторских способностей изучалась довольно активно. Однако характер психолого-педагогических исследований по данной проблеме во многом поверхностен, поскольку не предусматривает определения особенностей и структуры организаторских способностей.

Особенно большой вклад в изучение организаторских способностей и особенностей организаторской деятельности был внесен отечественными учеными, занимавшимися проблемами социальной психологии. Детальный анализ исследований феномена организаторских способностей в отечественной социальной психологии позволяет обнаружить определенные параллели в исследовании аналогичного феномена в зарубежных работах.

Отметим, однако, что в отечественной психологической науке биологизаторские и социобиологизаторские теории в исследовании организаторских способностей представлены очень незначительным числом работ (В.Р. Дольник [7], Ю.М. Плюснин [30]) и в целом не получили широкого распространения. В значительной степени это объясняется тем, что в истории отечественной науки был такой известный всем период, когда в течение десятилетий пресекались любые биологизаторские и социобиологизаторские тенденции. Некоторые авторы были вынуждены отрицать даже сам факт наличия природных предпосылок организаторских способностей. «Организаторские способности, – писали А.Г. Ковалев и В.Н. Мясищев, – очевидно, менее всего требуют каких-то особых природных предпосылок, они формируются в деятельности» [14]. Последнее несомненно, но это не исключает возможности существования природных предпосылок и не должно противопоставляться им: любые способности формируются в деятельности, но, несмотря на это, никто не сомневается в наличии их природных основ. Собственно, и в работе А.Г. Ковалева и В.Н. Мясищева на это имеются косвенные указания. Так, перечисляя условия и свойства, которые существенны для формирования деятельности организатора, авторы включают в них особенности темперамента, быстроту реакции и ориентировки, интуицию, т.е. качества, во многом формирующиеся на основе природных данных.

В русле традиционно психологического направления (или теории черт) в исследовании структуры способностей и личностных качеств организатора работают многие отечественные психологи. По мнению Р.Л. Кричевского, организатор должен обладать высоким интеллектом, однако это должен быть не столько интеллект теоретический, сколько практический. Ссылаясь на Р.М. Стогдилла [78], автор выделяет важнейшие организаторские качества: доминантность, уверенность в себе, эмоциональную уравновешенность, стрессоустойчивость, креативность, стремление к достижениям, предприимчивость, ответственность, надежность в выполнении заданий, независимость, общительность [18].

А.Г. Шмелев с соавторами [46] выделяет шесть основных качеств, необходимых организатору в коммерческой и промышленной сфере: интеллект, компетентность, активность, энергию, самоконтроль, коммуникабельность.

А.У. Хараш [43] считает обязательным для организатора производства ряд черт: самостоятельность суждений и решений, способность принимать и осваивать новое, сосредоточенность на деле (деловая направленность), уважение к личности другого человека, умение найти индивидуальный подход к каждому подчиненному, готовность к содействию и сопереживанию, «диалогичность», т.е. постоянную готовность выслушать и понять другого человека, учесть его точку зрения при принятии собственного решения. Среди мешающих организатору

производства качеств перечисляются: конформность, ригидность, внушаемость, авторитарность, формализм, эгоцентризм, монологичность.

Отечественные исследования проблемы организаторских способностей в русле собственно психологического подхода обнаруживают заметное сходство с аналогичными зарубежными концепциями. Ученые выявляют различные черты личности, способствующие успеху организаторской деятельности. При этом, однако, зачастую игнорируется связь наблюдаемых организаторских черт с конкретными социальными условиями, в связи с чем рассмотрение проблемы имеет во многом абстрактный метафизический характер. Несмотря на значительный объем проведенных исследований, их результаты не позволяют составить однозначного мнения о прямой зависимости между выделяемыми качествами личности организатора и успешностью выполняемой им деятельности.

В русле функционально-ситуационного подхода к изучению проблемы организаторских способностей предпринимается попытка разработать динамическую функциональную структуру личности организатора, преодолев при этом абстрактный статичный подход. Так, Б.Б. Коссов [16] при построении функциональной модели личности организатора выделяет «личностные переменные» (обобщенные умения и отдельные черты личности организатора), которые имеют соответствующую связь с функциональными блоками: «эффективность», «механизм эффективности», «механизм повышения эффективности». Успех организаторской деятельности, по мнению автора, определяется способностью организатора с учетом особенностей конкретной ситуации приводить в действие все эти блоки и устанавливать их взаимодействие за счет целесообразного использования личностных переменных.

Несколько иной подход к построению функциональной модели личности организатора предлагается в исследованиях Т.Ю. Базарова [2] и Н.В. Бахаровой [3]. Эти авторы отождествляют функциональные блоки с групповыми явлениями: социальными ожиданиями и их формированием. Исследователи считают, что эффективность деятельности организатора обеспечивается умением организатора в зависимости от ситуации активизировать те или иные личностные переменные для целенаправленного воздействия на ожидания со стороны членов коллектива и вышестоящего руководства.

В рамках функционально-ситуационного подхода ученые преодолели абстрактное рассмотрение проблемы организаторских способностей, представив качества организатора в виде функциональных величин, получающих реальное психологическое наполнение под воздействием объективных факторов. Однако недооценка авторами субъективной стороны изучаемого вопроса способствовала утрате психологического смысла проблемы.

Комплексное изучение проблемы организаторских способностей в качестве динамической системы, формирование которой происходит в деятельности и зависит от ряда субъективных и объективных факторов, осуществлялось отечественными психологами в рамках **системно-деятельностного подхода**. Ряду ученых удалось выстроить научную теорию организаторских способностей, во многом схожую с западной концепцией системы воздействий, но получившую более глубокое теоретическое обоснование. В ее основе лежит реализация общепсихологической теории деятельности. При выявлении способностей организатора исследователи обращают особое внимание на теоретические и методологические положения теории деятельности, разработку стратегии научных исследований, принципов и методик организационно-психологического анализа деятельности, поиск исходных понятий, характеристик и единиц организаторской деятельности. Например, В.В. Давыдов [5, 6] строит свой методологический подход к исследованию проблемы организаторских способностей на определении сущности (главной цели) деятельности организатора как стремления к согласованию «индивидуальных работ», благодаря которому итог общей совместной деятельности дает наибольший эффект. Отсюда основная задача организатора – планирование путей и средств реализации требуемой согласованности. Организаторские способности, таким образом, трактуются как способности к осуществлению основных организаторских функций:

- выработки и принятия решений;

- организационной работы по выполнению решений;
- регулированию и корректировке;
- учета и контроля.

Теоретические положения В.В. Давыдова были конкретизированы в работах его сотрудников В.С. Лазарева [21], С.Д. Неверковича и А.А. Тюкова [27]. Они уточнили специфику реализации организаторских функций, выделив в структуре организаторской деятельности объективную и субъективную стороны. Организаторские способности при этом рассматривались как одна из субъективных составляющих процесса организаторской деятельности и основное «интериоризированное средство» ее осуществления.

Плодотворный подход к изучению организаторских способностей разработан Е.С. Кузьминым и его единомышленниками Ю.Н. Емельяновым, И.П. Волковым, А.Л. Свенцицким [20], [31]. Признавая необходимость наличия у организатора ряда качеств (организаторского чутья, психологического такта, умения ненавязчиво влиять на подчиненных и др.), эти авторы вводят понятие «организаторского потенциала» – «системного качества, характеризующего не только личность, но и параметры той социальной среды, в которой протекает организаторская деятельность данной личности». Это «системное качество» возникает на стыке между обществом, коллективом, индивидом и объектом его деятельности. При изучении организаторского потенциала авторы предлагают, с одной стороны, анализировать общественно-экономические, конкретно-исторические условия и вытекающую отсюда специфику организационных структур и должностных полномочий, с другой – личностную сторону организаторского потенциала, которая «проявляется в системе отношений индивида к окружающей среде и к самому себе» [31].

В русле системно-деятельностного подхода проводит свои исследования и Ю.Д. Красовский [17]. Автор выделяет три главных составляющих личности организатора - руководителя производства: управленческую позицию руководителя, управленческое самосознание руководителя и управленческую концепцию руководителя. Управленческая позиция, по мнению Ю.Д. Красовского, дает руководителю возможность анализировать те или иные формы проявления своего делового поведения в определенной системе отношений по вертикали, диагонали и горизонтали. Управленческое самосознание позволяет руководителю почувствовать, как происходит процесс познания себя через других и других через себя. Этот процесс начинается с постановки вопроса о моральном праве руководить. Управленческая концепция руководителя дает ему возможность активизировать усилия коллектива в системном достижении конечных результатов. Автор считает управленческую концепцию наиболее важным элементом личности организатора. Экспертный опрос руководителей в процессе их психолого-управленческого консультирования позволил Ю.Д. Красовскому выявить критерии эффективности их личностной управленческой концепции, которые затем были сгруппированы в три блока.

1. Организационный потенциал:

- убедительность (насколько формирует у работников установки «хотим» и «можем, если «надо»);
- оптимистичность (насколько формирует уверенность работников в решении проблем);
- сопрягаемость (насколько формирует готовность служб, подразделений, работников к коллективному сотрудничеству).

2. Мотивационный потенциал:

- оперативность (насколько помогает сокращать время решения проблем);
- надежность (насколько обеспечивает качественное решение проблем в различных ситуациях);
- комплексность (насколько обеспечивает всестороннее решение проблем).

3. Индивидуальные ресурсы:

- перспективность (в какой мере помогает руководителю осуществлять его замысел вместе с коллективом);

- стрессоустойчивость (в какой мере ослабляет тревожную напряженность ответственности руководителя при росте ее величины);
- универсальность (охватывает ли все подразделения, службы, всех работников).

Введенное в научный оборот А.И. Китовым [12] понятие управленческой концепции* рассматривается в книге Ю.Д. Красовского в новом ракурсе: в тесном единстве с руководимым коллективом. Тем самым управленческая концепция руководителя становится общественно значимой для коллектива.

В.Ф. Рубахин и А.В. Филиппов [34] уточнили особенности проявления и развития способностей организатора и распределили их по трем группам:

- 1) психофизиологическая группа, включающая особенности первичных познавательных процессов;
- 2) психологическая, состоящая из особенностей мотивационной, эмоциональной и интеллектуальной сфер, темперамента и характера организатора, его способностей и интересов, а также системы знаний, умений, навыков;
- 3) социальная, включающая морально-нравственные качества.

В более поздних работах А.В. Филиппов [40, 41] подразделяет способности организатора:

- на качества (как ценностные ориентации);
- психологические свойства;
- жизненный и профессиональный опыт.

В работах Л.Д. Кудряшовой [19] организаторские способности рассматриваются в контексте оценки руководящих кадров. Исходная посылка этих работ состоит в необходимости использования с целью такой оценки системно-психологического подхода, т.е. изучения не отдельных качеств личности, а ее общей склонности к организаторской работе. Исследовательское внимание здесь привлечено к явлению целостности личности руководителя (имеется в виду наличие у него общих способностей, не сводимых к сумме частных, специальных способностей и качеств). Действительно, если деятельность организатора в современных условиях научно-технического прогресса носит ярко выраженный системный характер, то аналогичный характер должны иметь (для обеспечения эффективности деятельности) и его качества и способности.

А.Д. Карнышев [9] отмечает, что для определения научно-практической модели качеств личности эффективного организатора (руководителя) нецелесообразно ограничиваться положениями ситуационной теории или психологической теории черт. В структуре свойств личности руководителя автор выделяет четыре группы качеств, наличие которых обеспечивает соответственно осуществление четырех основных функций управленческой деятельности:

- 1) целеполагания;
- 2) организации и координирования;
- 3) контроля и оценки;
- 4) обеспечения оптимальных контактов (сотрудничества) в процессе управления.

Организаторская функция является, с точки зрения автора, важной, но не единственной функцией организатора. К наиболее значимым для ее осуществления качествам и умениям он относит:

- умение распределять функции и поручения с учетом организаторских потенциалов исполнителей, уровня их умений и навыков;
- способность в сложных обстоятельствах принимать правильные решения по организационным вопросам;
- доверие к людям, вера в их возможности и внутренние резервы;

* А.И. Китов определяет индивидуальную управленческую концепцию как способ понимания и трактовки проблем управления, которыми занимается личность, ее основную точку зрения и руководящую идею.

- умение рационально и деловито организовывать и проводить заседания, совещания и другие мероприятия;
- умение обеспечить условия для динамического роста каждого исполнителя;
- способность работать творчески самому и стимулировать творчество всех участников деятельности;
- умение правильно подобрать лидеров или своих ближайших помощников в каждом новом деле;
- способность и готовность брать на себя ответственность за недостатки;
- личную организованность, точность, умение распределять свое время.

Автор справедливо считает качества личности руководителя (включая организаторские качества) динамической, подвижной величиной и указывает на возможность их развития посредством «разумного ориентирования» и целенаправленного тренинга.

В.М. Шепель [45], как и А.Д. Карнышев, дифференцирует понятия структуры свойств личности организатора и структуры его организаторских качеств. В структуре свойств личности организатора В.М. Шепель выделяет четыре группы свойств:

- морально-политические;
- профессиональные качества;
- психофизиологические качества;
- собственно организаторские качества.

К собственно организаторским качествам автор относит:

- умение планировать работу, подбирать и расставлять кадры;
- умение улавливать настроения людей, увлекать их своими целями;
- умение оказывать влияние на морально-психологическую атмосферу коллектива;
- умение обостренно воспринимать новое.

Особое внимание В.М. Шепель уделяет проблеме соотношения и динамики взаимодействия объективных социальных факторов, сопровождающих ход организаторской работы, и личностных качеств организатора. Автор выявляет нюансы проявления тех или иных организаторских качеств в конкретных объективных обстоятельствах, которые он называет «объективными условиями настроения» и относит к ним материальные условия жизни, психологическую обстановку в семье, социальное положение по месту жительства, близость магазинов и наличие служб сервиса, работу транспорта. Заслуга В.М. Шепеля состоит также в детальном анализе вероятностного результата взаимодействия «объективных условий настроения» и личных качеств организатора [44].

Исследования организаторских способностей в русле системно-деятельностного подхода характеризуются полнотой, четкой структурой, широким спектром изучаемых вопросов. Вместе с тем, указанные концепции в большинстве своем имеют ряд существенных недостатков. Так, пытаясь в должной мере учитывать значение объективного и субъективного факторов в социальном процессе, ряд ученых, тем не менее, допускает определенный эклектизм решения проблемы, заключающийся в нечеткости выражения связей между этими двумя факторами. Кроме того, для многих исследований характерно отсутствие строгой классификации понятий, помещение в один классификационный ряд собственно психологических, социологических и профессиональных характеристик. В результате, как это ни парадоксально, многие работы, авторы которых претендуют на внедрение системного подхода в построение научной теории, характеризуются отсутствием системности. Исключение составляют работы В.М. Шепеля и А.Д. Карнышева, в которых уточняются и разграничиваются понятия структуры личности организатора (руководителя) и структуры его организаторских способностей, определяются специфические характеристики этих способностей, обосновывается возможность их развития и целенаправленного формирования.

Итак, анализ отечественных исследований в области социальной психологии по проблеме организаторских способностей обнаруживает определенные параллели с западными концепциями лидерства. В то же время в отличие от зарубежных авторов, для отечественных психологов характерным является активное внедрение системно-деятельностного подхода в изучение психологических особенностей деятельности способного организатора и структуры его личности. Это выразилось в конкретизации отдельных сторон организаторской деятельности, а также во всестороннем анализе специфики диалектического взаимодействия объективных и субъективных факторов, обеспечивающих эффективное осуществление организаторской деятельности и плодотворную работу группы.

В отечественной социальной психологии изучались психологические особенности деятельности организатора применительно к работе руководителя, работающего в системе промышленного производства или коммерческого предприятия. Причем организаторские способности рассматривались как качества, характерные исключительно для руководящих работников. Считалось, очевидно, что в работе рядового сотрудника такие способности проявляться не могут. Кроме того, основная часть авторов исследует качества личности способного организатора в отрыве от конкретного содержания его профессиональной деятельности и ряда сопутствующих факторов. Поэтому существующие концепции свойств личности способного организатора во многом противоречивы, а большинство из них не имеет четкого экспериментального подтверждения.

Теоретический анализ литературы показывает, что проблема лидерства является одной из классических и традиционных проблем психологической науки. Ряд вопросов, касающихся организаторской деятельности, психологических особенностей и способностей личности лидера, изучен достаточно глубоко и подробно. При этом многие аспекты этой проблемы до сих пор не получили подробного освещения и требуют дальнейшей разработки.

Библиографический список

1. **Аркин, Е.А.** Детский сад в свете социальной гигиены и биологии / Е.А. Аркин. – М.: Детгиз, 1928.
2. **Базаров, Т.Ю.** Социально-психологическая ориентировка непосредственного руководителя трудового коллектива / Т.Ю. Базаров. – М.: МГУ, 1981.
3. **Бахарова, Н.В.** Значение количественных характеристик в исследовании управленческих коллективов // Человек и общество. 1972. Вып. 10.
4. **Вульф, Б.З.** Организатор внеклассной и внешкольной воспитательной работы: Содержание и методика деятельности / Б.З. Вульф, М.М. Поташник. – М.: Педагогика 1983.
5. **Давыдов, В.В.** Основные проблемы психологии управленческого труда. Методология. Эксперимент. Практика. Ч. 1. / В.В. Давыдов. – Рига: РГУ, 1980.
6. **Давыдов, В.В.** Основные проблемы психологического изучения процессов управления. Актуальные проблемы общей, социальной и педагогической психологии / В.В. Давыдов. – М.: Высш. шк., 1980.
7. **Дольник, В.Р.** Непослушное дитя биосферы: Беседы о человеке в компании птиц и зверей / В.Р. Дольник. – М.: Прогресс, 1994.
8. **Загоровский, П.Л.** Особенности поведения первого школьного детства // Работник просвещения. 1930. № 3.
9. **Карнышев, А.Д.** Очерки социальной психологии / А.Д. Карнышев. – Иркутск: ИГЭА, 1998.
10. **Керженцев, П.М.** НОТ. Научная организация труда / П.М. Керженцев. – М.: Экономика, 1926.
11. **Керженцев, П.М.** Принципы организации / П.М. Керженцев. – Л.: Экономика, 1925.
12. **Китов, А.И.** Социально-психологическая концепция руководства / Социально-психологические проблемы руководства и управления коллективами. – М.: Наука, 1974.

13. **Климовец, В.Н.** Психолого-педагогические аспекты проблемы формирования профессионально-организаторских умений курсантов военных училищ / В.Н. Климовец. – Саратов: Изд-во «Молодой ученый», 1997.
14. **Ковалев, А.Г.** Психологические особенности человека. Способности / А.Г.Ковалев, В.Н. Мясищев. – Л.: Наука, 1960. Т. 2.
15. **Коровин, В.Ф.** Основные проблемы «новой социологии» Райта Миллса / В.Ф. Коровин. – М.: Наука, 1977.
16. **Косов, Б.Б.** Профессиональная диагностика и методы исследования личности руководителя // Психологический журнал. 1981. Т. 2. № 2.
17. **Красовский, Ю.Д.** Руководитель трудового коллектива: Из опыта психолого-управленческого консультирования / Ю.Д. Красовский. – М.: Прогресс, 1987.
18. **Кричевский, Р.Л.** Если вы руководитель... / Р.Л. Кричевский. – М.: Наука, 1993.
19. **Кудряшова, Л.Д.** Системно-психологическая оценка кадров руководителей и управленческих систем / Л.Д. Кудряшова. – Кишинев: КГУ, 1983.
20. **Кузьмин, Е.С.** Руководитель и коллектив / Е.С. Кузьмин, И.П. Волков, Ю.Н. Емельянов. – Л.: Прогресс, 1974.
21. **Лазарев, В.С.** Планирование как главное направление и исходный принцип исследования в психологии управления // Вопросы психологии. 1980. № 6.
22. **Лозинский, Е.** Вожди и толпа // Вестник воспитания. 1908. № 1.
23. **Лозинский, Е.** Воспитание вождей // Педагогический сборник. 1912. № 10, 11, 12.
24. **Мазуров, Г.И.** Совершенствование взаимоотношений начальников с подчиненными в ИТУ / Г.И. Мазуров. – Л.: Наука, 1991.
25. **Макаренко, А.С.** Сочинения / А.С. Макаренко. – М.: Высш. шк., 1950-1952. Т. 2, 5.
26. **Мангутов, И.С.** Организатор и организаторская деятельность / И.С. Мангутов, Л.И. Уманский. – Л.: Наука, 1975.
27. **Неверкович, С.Д.** Теоретические проблемы исследования процесса принятия решений в организационно-управленческой деятельности / С.Д. Неверкович, А.А. Тюков // Вопросы психологии. 1981. № 1.
28. **Николаев, В.Н.** Формирование организаторских умений и навыков у подростков в процессе общественно-полезной деятельности / В.Н. Николаев. – М.: МГУ, 1963.
29. **Пахомов, А.Н.** Педагогические условия формирования качеств руководителя у курсантов военно-экономического вуза / А.Н. Пахомов. – Ярославль: ЯГУ, 1996.
30. **Плюснин, Ю.М.** Проблема биосоциальной эволюции / Ю.М. Плюснин. – Новосибирск: НГУ, 1990.
31. Промышленная социальная психология; под ред. Е.С. Кузьмина, А.А. Свенцицкого. – М.: Наука, 1982.
32. **Пряжников, Н.С.** Психологический смысл труда / Н.С. Пряжников. – М.: Эксно, 1997.
33. Психология одаренности детей и подростков; под ред. Н.С. Лейтеса. – М.: Наука, 1996.
34. **Рубахин, В.Ф.** Психологические аспекты управления / В.Ф. Рубахин, А.В. Филиппов. – М.: Прогресс, 1973.
35. **Сопаровская, В.Д.** Планирование в организаторской деятельности подростков / В.Д. Сопаровская. – Ярославль: ЯГУ, 1966.
36. Тагомлицкая, В.Н. Дети – вожаки в детских домах г. Одессы / Детский коллектив и ребенок. – М.: МГУ, 1926.
37. **Тихомиров, В.** Тайна влияния одной личности на другую // Вера и разум. Харьков. 1916. № 11, 12.
38. **Уманский, Л.И.** Психология организаторских способностей / Л.И. Уманский. – Курск: КГУ, 1967.
39. **Устюжанин, В.Н.** Формирование военно-профессиональных умений командира подразделения у курсантов ввузов внутренних войск МВД России / В.Н. Устюжанин. – СПб.: Изд-во Санкт-Петербургской академии МВД, 1997.
40. **Филиппов, А.В.** Вопросы психологии управления / Психологический журнал. 1980. Т.1. № 2.

41. **Филиппов, А.В.** Психологическая характеристика генерирования и принятия управленческих решений. Нормативно-дискретные модели принятия решений / А.В. Филиппов. – М.: Прогресс, 1981.
42. **Фролова, М.А.** Политическая стратификация / М.А. Фролова. – Воронеж: ЭКСМО, 1995.
43. **Хараш, А.Я.** Руководитель, его личность и деятельность / А.Я. Хараш. – М.: Наука, 1981.
44. **Шепель, В.М.** Настольная книга бизнесмена и менеджера (Управленческая гуманитарология) / В.М. Шепель. – М.: Наука, 1992.
45. **Шепель, В.М.** Руководитель и подчиненный: Конфликтные ситуации и их решение / В.М. Шепель. – М.: Высш. шк., 1972.
46. **Шмелев, А.Г.** Валидность теста менеджера потенциала / А.Г. Шмелев [и др.] // Вестн. МГУ. Психология. Сер. XIV. 1993. № 3.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2011*

E.A. Zaytseva, I.A. Savchenko

THE PROBLEM OF LEADERSHIP IN DOMESTIC SCIENCE: EVOLUTION AND OTHER APPROACHES

In article the analysis of theoretical researches of the problem leader abilities in a domestic science is presented. It is shown, how scientists define a place leader qualities in system of person properties. Various models of leader abilities structure and ways of optimal conditions revealing of these abilities display are described.

Key words. Leadership, organizing abilities, basic and auxiliary properties, biological and ыщсщц-biological theories, system-actibity approach.

УДК 316.65.0

Д.Г. Чуева

БОЛОНСКИЙ ПРОЦЕСС В ВОСПРИЯТИИ ПРЕПОДАВАТЕЛЕЙ ВУЗА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируются результаты социологических исследований по проблеме отношения преподавателей вуза к Болонскому процессу. Представлены результаты проведенного автором эмпирического исследования, отражающие отношение профессорско-преподавательского состава НГТУ им. Р.Е. Алексеева к реформам высшего образования. Дан анализ динамики изменения отношения преподавателей российской высшей школы к реализации основных положений Болонского процесса и сделан вывод о необходимости дальнейшего изучения готовности профессорско-преподавательского состава к реализации его положений.

Ключевые слова: социологическое исследование, профессорско-преподавательский состав, Болонский процесс, Болонская декларация, высшее профессиональное образование, двухуровневая система высшего профессионального образования, зачетная единица, европейское образовательное пространство.

Совершенствование системы управления качеством образования является необходимым условием успешного развития вуза и его вхождения в Болонский процесс. Эффективная реализация основных положений Болонского процесса возможна только при условии их полного понимания участниками образовательного процесса – представителями профессорско-преподавательского состава и студентами. Поэтому проблема отношения преподавателей к Болонскому процессу и реализации его принципов в российских вузах является актуальной как для вхождения России в мировое образовательное пространство, так и обеспечения необходимых результатов образовательного процесса.

Преподаватели являются той группой, которая непосредственно внедряет новые образовательные принципы на практике, новые формы и методы обучения. Но, учитывая разный уровень информированности о целях и методах реализации Болонского процесса, разный уровень понимания фундаментальных изменений в системе образования, преподаватели могут иметь противоречивое и не всегда адекватное отношение к реформированию системы образования. Анализ готовности профессорско-преподавательского состава к переходу на двухуровневую систему обучения является одним из элементов управления процессом формирования системы качества образования.

Многие современные исследователи занимаются изучением Болонского процесса в целом, проблемами вхождения России в этот процесс, анализом возможных позитивных и негативных последствий от реализации основ Болонского процесса для системы высшего профессионального образования (М.В. Артамонова, В.И. Байденко, С.А. Медведев, Е.И. Степанова, Т.В. Кастуева, С.Ф. Рашидов и др.). В данной работе нами прослеживается динамика изменения отношения представителей профессорско-преподавательского состава к болонским реформам с момента вступления России в Болонский процесс по сегодняшний день. Для вторичного социологического анализа данной проблемы мы обратились к эмпирическим исследованиям, проведенным рядом отечественных исследователей в период с 2004 по 2009 гг.

В 2004 г с целью выявления отношения научно-педагогической общественности к вхождению России в Болонский процесс учеными лаборатории социологического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством доктора социологических наук профессора В.Я. Нечаева было проведено мониторинговое социологическое исследование. В исследовании принимали участие эксперты – руководители различных уровней управления в вузах (1/3) и представители профессорско-преподавательского состава (2/3). Половина респондентов работает в вузах европейской части России, половина – в вузах других регионов России. Авторы данного исследования ставили перед собой следующие задачи:

- выявить информированность научно-педагогического сообщества о Болонском процессе;
 - проследить, как эксперты оценивают позиции России по отношению к Болонскому процессу;
 - определить отношение респондентов к основным положениям Болонской декларации: уровневая система обучения, система взаимного признания зачетных единиц ECTS, мобильность студентов и преподавателей и оценка качества университетского образования.
- Обратимся к основным результатам и выводам авторов данного исследования.

1. 80 % респондентов назвали основным источником информации выступления коллег на семинарах и конференциях, 46 % - публикации в периодических изданиях. 26 % - нормативно-правовые документы. 22 % опрошенных получили сведения о Болонском процессе и участии России в нем из средств массовой коммуникации, 17 % - из всемирной сети Интернет, 8 % экспертов назвали другой источник. Следовательно, практически все эксперты информированы о Болонском процессе.

2. Для ответа на вопрос: «Какой, по Вашему мнению, должна быть позиция России по отношению к Болонскому процессу?», респондентам было предложено оценить предоставленные варианты суждений по 9-балльной шкале, где 9 баллов – очень полезное положение, 1 балл – положение вредно, опасно, остальные значения промежуточные. Проведя анализ полученных результатов, авторы исследования сделали следующие выводы:

- на момент проведения исследования научно-педагогическая общественность не определилась с позицией России по отношению к Болонскому процессу, которую необходимо занять;
- ответы респондентов были распределены по четырем основным позициям отношения к Болонскому процессу: позиция настороженности - «По отношению к Болонскому процессу необходимо занять осторожную позицию. Участвовать в Болонском процессе следует только на тех условиях, при которых не будут утрачены достоинства отечественного образования» – получил самый высокий балл (6,4); позиция «вынужденного действия» – «Российское высшее образование вполне могло бы развиваться по собственному сложившемуся направлению, но в условиях глобализации объективно Россия вынуждена интегрироваться в Болонский процесс и принимать предложения партнеров Европейского сообщества» – оценено респондентами в 5,7 балла, позиция приветствия – «Болонская декларация предлагает современную динамичную модель университетского образования. Инертные действия российского правительства по участию в Болонском процессе приведут к тому, что Россия надолго утратит возможности интеграции в европейскую систему образования» – 5,5 балла, и позиция отрицания – «Выполнение положений Болонской декларации полностью разрушает отечественную систему высшего образования. Надо сохранить сложившуюся в России систему высшего образования и решительно отстраниться от Болонского процесса» - 3,8 балла.
- старшие поколения преподавателей, руководители различных уровней управления в вузе, доктора наук выразили более настороженное отношение к Болонскому процессу;
- большие опасения Болонский процесс вызвал у экспертов, работающих в вузах европейской части России, более оптимистичное отношение выразили представители вузов других регионов страны – Урала, Сибири, Дальнего Востока.

3. В целом относительно положений Болонской декларации преобладают положительные оценки. Респонденты высоко оценили такие положения Болонской декларации, как: поддержка зарубежных контактов и работы преподавателей в зарубежных университетах (8,1); оценка качества университетского образования (7,4); поощрение обучения студентов за рубежом (7,1). Низкие оценки экспертов получили введение двухуровневой системы университетского образования (5,6) и переход на европейскую систему научной квалификации (5,3).

По итогам исследования авторы сделали вывод, что научно-педагогическая общественность в целом готова к реализации основных целей и задач Болонского процесса, но в то же время, проявляет противоречивое отношение к этому процессу [1, с. 71-76].

Следующее социологическое исследование по этой же проблеме было проведено в июне 2006 г М.В. Артамоновой. Автор организовала социологические опросы участников расширенного заседания УМО по социальной работе и VI Всероссийского социально-педагогического конгресса «Национальные проекты и социальное образование: опыт и проблемы подготовки кадров для социальной сферы». Целью опросов было «выяснение отношения вузовской академической общественности к перспективам интеграции высшей школы РФ в европейскую систему высшего образования и отношение к проблемным вопросам внедрения положений Болонской декларации в образовательную практику российских вузов». В исследовании приняли участие 368 человек (82 – представители руководства вузов и 286 – преподаватели, представители более 20 государственных и негосударственных вузов). М.В. Артамонова разработала ключевые позиции исследования, необходимые для оценивания ответов респондентов: степень информированности; оценка процесса интеграции России в Болонский процесс; оценка преподавателями основных положений Болонского процесса.

Автор делает следующие выводы:

- преподаватели вуза недостаточно информированы о целях и задачах Болонского процесса. На вопрос «Знакомы ли Вы с текстом Болонской декларации?» 82% респондентов ответили, что слышали об этом документе от коллег и средств массовой коммуникации, 10% ничего не знали о Болонской декларации, только 3% преподавателей внимательно изучили текст документа. Респонденты-администраторы, напротив, проявили высокую степень информированность по данной тематике: 63% из них внимательно читали текст Болонской декларации, 33% – слышали от коллег и средств массовой коммуникации;

- положительно относятся к процессу интеграции в Болонский процесс 40 % опрошенных преподавателей, 30 % из них выразили уверенность, что интеграция будет иметь для России больше положительных последствий, чем отрицательных. Отрицательное отношение к Болонскому процессу выразили 47 % респондентов-преподавателей, из них 17% абсолютно уверены в своем отрицательном отношении и 39% считают, что интеграция России в Болонский процесс принесет больше негативных последствий, чем возможных перспектив. Анализ ответов респондентов – администраторов позволил автору исследования сделать вывод, что эта группа респондентов была более оптимистично настроена к интеграции: 52% респондентов-администраторов выразили положительное отношение к грядущим переменам; 41% проявили уверенность в получении Россией больших преимуществ в результате интеграции, чем негативных последствий. 46% респондентов выразили отрицательное отношение; 39% полагают, что негативных последствий больше, чем возможных преимуществ от интеграции России в европейское образовательное пространство. Автор делает вывод о совпадении доли «ожидания негативных последствий» среди респондентов обеих групп – преподавателей и администраторов (почти 40 % представителей академической среды вузов не ожидают положительных результатов от присоединения России к Болонскому соглашению);

- респонденты продемонстрировали уверенность, что участие вуза в Болонском процессе в целом благоприятно отразится на конкурентоспособности вуза на рынке образовательных услуг и на конкурентоспособности выпускников на рынке труда;

- введение двухуровневой структуры обучения представители российских вузов оценили как один из наиболее важных инструментов реализации Болонских положений в своих вузах. Оценки преподавателей и респондентов-руководителей практически совпадают: средние баллы 4 и 5. При этом большинство респондентов высказалось за сохранение специалитета как национальной формы высшего образования РФ. Повышение академической мобильности для преподавателей оценивается ими – 3,5. Автор делает вывод, что такая низкая оценка связана с недостаточным ресурсным обеспечением академической мобильности. Другой вывод – это недостаточное знание иностранного языка – 58% респондентов не владеют иностранным языком, необходимым для обеспечения мобильности.

Важность мобильности студентов респонденты оценивали достаточно высоко (4 балла - преподаватели и 4,5 – администраторы). Преподаватели также недооценивают степень важности внедрения информационных технологий в организацию учебного процесса (от 1 до 3 баллов). Респонденты - администраторы в большей степени осознают необходимость перехода на электронные, компьютерные технологии, но средний балл (3,8) также свидетельствует о недооценке этого фактора в развитии вуза.

В итоге автор исследования приходит к заключению, что информированность академического сообщества о Болонском процессе недостаточна, преподаватели вузов в целом положительно оценивают возможные преимущества от включения России в Болонский процесс, в тоже время выступают за сохранение традиционных форм и методов обучения [2, с. 146-151]. Таким образом, если в 2004 г большинство преподавателей в целом поддерживали предполагаемые изменения, то по мере появления необходимости реальных усилий со стороны преподавателей, восприятие болонского процесса начинает меняться: значительная часть работников высшей школы выступают за сохранение привычных форм образовательного процесса.

Еще одно исследование, проведенное в 2009 г, было осуществлено Н.А. Лоншаковой и В.П. Моченовым в Российской международной академии туризма (РМИАТ). Целью данного исследования стало выявление готовности профессорско-преподавательского состава к реализации инновационных подходов в образовательной деятельности в контексте Болонского процесса. Рассмотрим результаты опроса, имеющие прямое отношение к нашей проблеме. Итак, среди вопросов, направленных на выявление позиций преподавателей по отношению к организации учебного процесса и развитию системы высшего образования, обратим внимание на вопрос: «Как Вы считаете, будет ли способствовать повышению качества профессионального образования переход на двухуровневую систему «бакалавр-магистр», внедрение компетентного подхода и системы зачетных (кредитных) единиц ECTS?» Согласно результатам, полученным авторами, только 16,2% преподавателей дали утвердительный ответ, около 30 % респондентов считают, что переход на двухуровневую систему образования и введение системы зачетных единиц не принесут в организацию учебного процесса сколько-нибудь заметных изменений. Четверть преподавателей (24,2 %) пребывают в уверенности, что в связи с данными преобразованиями уровень подготовки в высшем учебном заведении снизится, 29,2 % респондентов затруднились ответить на этот вопрос. Итак, большая часть представителей профессорско-преподавательского состава выразили противоречивое, даже отрицательное отношение к болонским реформам [3].

Автором статьи в ноябре–декабре 2010 года было проведено пилотажное социологическое исследование на тему «Самооценка профессиональной компетентности преподавателей технического вуза». Генеральную совокупность составили преподаватели Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. Выборочная совокупность (объем – 27 респондентов) была сформирована методом снежного кома с учетом квотности. В качестве метода исследования было выбрано полуструктурированное интервью.

Один из смысловых блоков данного опроса включал в себя вопросы, раскрывающие отношение представителей профессорско-преподавательского состава к реформам высшего образования, а также готовность преподавателей к реализации на практике основных целей и задач Болонского процесса. Полученные результаты позволили выделить три основные группы преподавателей, демонстрирующих различное отношение к проводимым преобразованиям:

1. Значительная часть респондентов (68,2%) отрицательно относится к реформам в сфере высшего образования. Они высказывают опасения потери качества отечественного образования и фундаментального характера высшей школы в связи с реализацией основ Болонского процесса. Также представители этой группы считают, что отечественное высшее образование остается лучшим в мире и не должно ориентироваться на зарубежные образцы. Данная группа преподавателей также считает, что Россия и Евросоюз преследуют различные образовательные цели. Например, Европе необходимы специалисты с дипломом бакалавра, способные в будущем корректировать выбор профессии в соответствии со своими личност-

но-профессиональными интересами. Россия же, испытывает потребность в специалистах более высокого уровня, с целью поддержания своего научного потенциала, а «бакалавры, иначе говоря «недоучки», отечественному работодателю не нужны». Часть преподавателей считает, что в результате слияния европейской и отечественной систем образования получается некий «гибрид», который будет тормозить развитие системы высшего образования.

Такая убежденность, на наш взгляд, обусловлена недостаточной информированностью значительной части преподавателей о динамике высшего профессионального образования мира и России, неполным пониманием объективности процессов вхождения России в мировое образовательное пространство. Среди факторов негативного восприятия Болонского процесса можно выделить устойчивые идеологические стереотипы, приверженность к которым морально освобождает часть профессорско-преподавательского состава от активного участия в процессах реформирования российской высшей школы и повышения собственного уровня профессиональной компетентности.

2. Вторая группа респондентов (20,7%) приветствует этот процесс, видя в нем объективную необходимость, связанную с интеграцией России в мировой рынок. Представители этой группы отмечают высокую значимость академической мобильности, которая открывает реальные возможности обучения в зарубежных вузах как для студентов, так и для преподавателей. Они выражают убеждение, что Болонский процесс сделает обучение в вузе более индивидуализированным, а это, в свою очередь, создаст благоприятные условия для развития личности студента. Преподаватели уверены, что в связи с «болонскими переменами» у отечественных студентов появятся более широкие возможности и перспективы трудоустройства. Респонденты также отмечают, что в будущем европейское приложение к диплому делает образовательные степени будущих специалистов более узнаваемыми и признаваемыми в Европе. Полученные результаты свидетельствуют о высокой степени информированности данной группы преподавателей, о понимании ими необходимости вхождения России в мировое образовательное пространство, об отчетливом представлении будущих возможностей и перспектив участников образовательного процесса.

3. Третья группа преподавателей (3,4%) безразлично воспринимают происходящие изменения в системе высшего образования. Респонденты высказывают мнение, что это реальность, от них независимая, и поэтому им абсолютно все равно. Подобная позиция, на наш взгляд, также обусловлена плохой осведомленностью преподавателей о целях и задачах происходящих перемен, смутным представлениям о конечных результатах этих процессов, а также личностной ленью и профессиональной неспособностью к развитию. Возможно, что в основе подобных оценок лежит и демотивированность к профессиональному труду в вузе, связанная с низким уровнем оплаты труда и невидением перспектив карьерного и личностного роста определенной частью работников.

Несколько респондентов уклонились от ответа на этот вопрос без объяснения причин отказа от вербализации собственной профессиональной позиции.

Сделаем выводы по результатам проведенного исследования:

1. Отрицательное или безразличное отношение представителей профессорско-преподавательского состава к реализации основных принципов Болонского процесса по нашему мнению, связано: а) с боязнью негативных последствий перемен для части преподавателей; б) с недостаточной информированностью или поверхностным пониманием сути этого процесса. Это в свою очередь оказывает негативное влияние на качество образования, так как именно преподаватели обеспечивают разработку новых учебных программ и подготовку учебно-методических пособий, организуют самостоятельную работу студентов и на своем уровне проектируют учебный процесс в целом.

2. Позитивное отношение к реформам в системе высшего образования, наоборот, оказывает положительное влияние на организацию учебного процесса, на качество обучения, и в целом на статус вуза. Преподаватели, объективно оценивающие положение высшего образования в стране, готовы к нововведениям и способствуют их активному внедрению. Они,

как показали результаты опроса, имеют более четкие перспективы профессионального роста, чем представители первой группы.

3. Результаты данного опроса представляют собой основу для проведения дальнейшего исследования по проблеме готовности представителей профессорско-преподавательского состава Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева к переходу на двухуровневую систему образования. Они могут быть использованы в системе управления качеством образовательного процесса, а также для определения содержания дополнительного профессионального образования профессорско-преподавательского состава вуза.

Выводы

1. Преподаватели вузов проявляют противоречивое отношение к реализации на практике ключевых положений Болонского процесса: у большей части работников высшей школы отсутствует однозначное восприятие участия России в Болонском процессе.

2. Значительная часть работников высшей школы негативно относятся к модернизации российского образования.

3. Уровень готовности преподавателей к реализации основ Болонского процесса на практике остается достаточно низким.

4. Проблемы, выявленные российскими исследователями в 2004, 2006 и 2009 гг., подтвердились и при анализе данных, полученных в ходе проведения социологического исследования 2010 г в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева.

Таким образом, профессионально-личностная готовность профессорско-преподавательского состава к реальному участию в процессе реформирования высшей школы нуждается в значительной коррекции. Поэтому представляется необходимой организация мониторинга готовности представителей профессорско-преподавательского состава к реальному участию в процессе интеграции России в европейского и мировое образовательное пространство.

Библиографический список

1. Григорьева, А.А. Руководители и преподаватели вузов о Болонском процессе // Мониторинг общественного мнения: экономические и социальные перемены. 2005. № 2. С. 71–76.
2. Артамонова, М.В. Преподаватели и руководители вузов об интеграции в европейское образовательное пространство // Социологические исследования. 2008. № 1. С. 146–151
3. Лоншакова, Н.А. Готовность профессорско-преподавательского состава к реализации инновационных подходов в образовательной деятельности в контексте Болонского процесса / Н.А. Лоншакова, В.П. Мочёнов. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.edu.meks-info.ru/tezis2/047.doc>

*Дата поступления
в редакцию 28.01.2011*

D.G. Chueva

THE BOLOGNA PROCESS IN THE PERCEPTIONS OF TEACHERS OF HIGHER SCHOOL

The article analyzes the results of sociological research on attitudes of teachers of higher school to the Bologna Process. The results of empirical research conducted by the author, reflecting the position of faculty staff of the NSTU named by R.E. Alekseev on reform higher education, are presented. The analysis of the dynamics of change in the attitude of teachers of Russian higher education to implement the main conditions of the Bologna process is given. The conclusion about the need for further study willingness of faculty members to implement the main conditions of the Bologna process.

Key words: sociological study, faculty, Bologna process, Bologna Declaration, higher professional education, two-level system of higher professional education, test unit, the European educational space.

УДК 316.7

Н.В. Рыбаков

**КОНЦЕПЦИЯ ДОКУМЕНТНОЙ КУЛЬТУРЫ ОРГАНИЗАЦИИ:
ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ**

ООО Компания «Август», г. Н. Новгород

Целью статьи является анализ документной культуры организации в рамках структурно-функционального, системного, синергетического и компетентностного подходов. Рассматривается значение документной культуры в управленческих и коммуникативных процессах организации. Определяются существенные признаки, структурные уровни, подсистемы, цели и функции документной культуры. Особая роль отведена рассмотрению личностного уровня документной культуры. Анализируются процессы документной коммуникации как важнейшие компоненты документной культуры. В статье обосновывается применение термина «документная культура», а также ряда других понятий.

Ключевые слова: документная культура, документная среда, коммуникация, документная система, компетенция, документ, информация.

Организация представляет собой сложную социальную систему, созданную для достижения определенных целей путем выполнения конкретных функций. Одной из важнейших функций организации является коммуникативная. Она представляет собой комплекс упорядоченных повторяющихся социальных коммуникаций, цель которых заключается в поддержании устойчивого взаимодействия между элементами самой системы, а также между системой и внешним окружением. Взаимодействие основано на снятии статуса неопределенности в состоянии системы путем передачи информации. Не вдаваясь в тонкости информационно-математической теории, под информацией будем понимать дополнительные (ранее неизвестные) сведения о внутренней и внешней среде организации, необходимые для осуществления управленческого воздействия.

В современном обществе информация становится одним из основных преобразующих факторов в развитии социальных систем. Информация включена в основную часть систем коммуникации в документированной форме. В нашем понимании «документ» – информация, структурированная особым образом и включенная в информационную систему организации. Структурированность информации в документе делает процесс коммуникации формальным, предсказуемым и оперативным. Документы в организации выполняют, помимо информационных и коммуникативных, ряд специальных функций. Комплекс документов, связанных целефункциональным единством, обозначим термином «документная система».

Вокруг документированной информации в организации создается потенциальное поле социальной деятельности. Обозначим данное поле термином «документная среда». Она включает в себя документы, документные системы, конкретную область человеческих активностей, а также сопутствующие социальные взаимодействия. Коммуникативная сфера в документной среде включает в себя деятельность по созданию, обработке, использованию и хранению документированной информации. С одной стороны, человеческая деятельность в документной среде может быть проанализирована с точки зрения обладания следующими свойствами-характеристиками: профессионализм, компетентность, эффективность, технологичность. Данный ряд можно объединить общим понятием «уровень деятельности». С другой стороны, в документной деятельности, а также в комплексе сопутствующих устойчивых социальных взаимодействий можно увидеть некоторый ценностный аспект. Итак, в документной среде необходимо обратить внимание на два важных компонента: уровень документной деятельности и ценност-

ный компонент. Обе эти характеристики выводят нас к понятию «культура». Данный термин имеет два основных значения: уровень развития социальной системы (прежде всего уровень развития технологий, материального производства) и специфичность социальной системы (сюда необходимо отнести ценностный, нормативный компоненты; нестандартизированные, творческие формы личностной и социальной активности и др.).

Таким образом, мы можем закономерно говорить о понятии «документная культура». В узком толковании «документная культура» – это уровень организации документной среды социальной системы. В широком понимании она представляет собой систему ценностных установок и представлений, традиций и технологий, утвердившихся практических образцов, которые определяют способы взаимодействия субъектов с информационно-документной и социальной средой. Документная культура – явление многоуровневое, поэтому необходимо говорить о документной культуре общества, государства, социальных институтов, социальных групп и о документной культуре отдельной личности. Уровни не являются иерархическими в строгом смысле. Динамика данных уровневых компонентов определяется их системным взаимодействием. Однако для социологического анализа наиболее сложными являются все-таки верхние уровни документной культуры. Так, развитие документной культуры общества обусловлено целым рядом внешних и внутренних факторов, неподдающихся полному выявлению и конечному анализу. Однако истоки развития данного уровня документной культуры необходимо искать в сложившейся системе государственной власти и управления, социально-исторических архетипах, менталитете народа и т.д. Документная культура общества – сложная нелинейная социальная система, поэтому она может быть рассмотрена в рамках синергетической парадигмы.

Для социологического анализа особый интерес представляет документная культура организаций. На документную культуру организации оказывают влияние три группы факторов: документная культура высших иерархических уровней, документная культура низших иерархических уровней, особенности конкретной организации (прежде всего ее социальный состав и организационная структура). Специфичность организации может быть выражена через систему следующих характеристик:

- сфера деятельности и организационно-правовая принадлежность;
- масштаб организации (количество структурных подразделений, наличие филиалов и представительств и т.д.);
- особенности формальной и неформальной организационной и управленческой структуры (организация властных взаимоотношений, уровень дисциплины и т.д.);
- состояние ресурсного обеспечения;
- характеристики человеческого капитала (квалификация, профессионализм, способность к обучению, лояльность к организации и т.д.);
- особенности факторов, определяющих социальное взаимодействие (формальные и неформальные лидеры и их влияние на организационное поведение персонала, уровень солидарности и конфликтности в трудовом коллективе, сложившаяся система социальной коммуникации, система адаптации и т.д.);
- наличие целенаправленно сформированной организационной культуры (наличие четко сформулированной философии, миссии и стратегии организации, стандартов профессионального поведения, правил клиентского обслуживания и т.д.).

Данный перечень не является закрытым и исчерпывающим: задача социологического анализа в данной области – выявить максимальное количество факторов, оказывающих влияние на документную культуру организации.

На динамику документной культуры организации значительное влияние оказывает документная культура работников, которая может быть проанализирована с двух сторон: со стороны компетентностного подхода и с позиции ценностного подхода.

Под компетенцией подразумевается заранее заданное социальное требование к образовательной, информационной и практической подготовке человека, необходимое для его качественной и эффективной деятельности в соответствующей сфере [1]. Под «документными компетенциями» мы будем подразумевать требования к профессиональным практическим навыкам специалиста, необходимые ему для эффективной деятельности в документной среде. Документные компетенции весьма обширны, однако их можно систематизировать определенным образом и выделить следующие подгруппы:

1. Общеинформационные компетенции: способность выражать свою информационную потребность, знание комплексов информационных ресурсов и умение пользоваться ими, способность самостоятельно вести информационный поиск, способность качественно оценивать информацию; способность интерпретировать, анализировать и творчески использовать информацию и т.д.

2. Компетенции в области документирования: знание основных нормативно-методических актов в соответствующей сфере, умение правильно оформлять реквизиты документов, навык составления основных видов документов, владение средствами документной лингвистики и т.д.

3. Компетенции в области документооборота: умение определять основные документопотоки в организации; навыки приема, отправки, регистрации документов; знание способов организации оперативного хранения документов; умение организовать конфиденциальный документооборот; знание основных способов оптимизации документооборота и т.д.

4. Компетенции в области документной информационно-поисковой работы.

5. Компетенции в сфере архивного хранения документов.

6. Компетенции обучения и саморазвития в профессиональной среде: знание основных информационных ресурсов в профессиональной сфере и умение их использовать (профессиональные журналы, сайты Интернета), умение взаимодействовать с профессиональным сообществом и т.д.

7. Компетенции в сфере документной коммуникации: умение определять цель и задачи единичного акта документной коммуникации; умение выбирать оптимальные каналы документной коммуникации; навыки преодоления технических, семантических, стилистических, логических барьеров документной коммуникации и т.д.

8. Компетенции в использовании технических средств, современных информационно-коммуникационных технологий для взаимодействия с документной средой.

В системе документных компетенций наблюдается постоянное перераспределение значения тех или иных компетенций для документной культуры личности. Так, в связи со становлением информационного общества, расширением виртуального пространства, развитием «экранный культуры» особое значение приобретают навыки, связанные с использованием современных информационных технологий:

- умение работать с системами электронного документооборота, с электронными базами данных, архивами;
- практический навык работы в локальных и глобальных телекоммуникационных сетях;
- знание нормативно-правовой базы в сфере использования информационных технологий (например использование электронно-цифровой подписи);
- умение взаимодействовать с IT-специалистами.

Документная культура личности определяется не только через компетентностный подход, но и через призму ценностного подхода. Так, в документной культуре личности важен не только факт обладания конкретными компетенциями, но и значение, которое придается данному факту самим сотрудником и социальным окружением. Таким образом, важны ответы на следующие вопросы: насколько для сотрудника важны данные компетенции, готов ли он их активно применять, как данные компетенции оцениваются социальным окружением.

ем, востребованы ли они в профессиональной деятельности, в конкретной организации, мотивируется ли их применение руководством организации.

Для понимания концепции документной культуры организации необходимо проанализировать ее в рамках структурного функционализма – теоретико-методологического подхода, рассматривающего социальную систему как дифференцированную и упорядоченную, структурные элементы (подсистемы) которой вносят вклад в стабильное функционирование системы. В соответствии с данным подходом в документной культуре организации можно выделить следующие подсистемы:

1. *Нормативный компонент.* Он выражен в системе организационно-распорядительной документации. Нормативная подсистема указывает на то, как должен вести себя сотрудник в документной среде организации. Данная подсистема структурирует социальные взаимодействия, позволяет в определенной степени сделать поведение сотрудников предсказуемым. Нормы документной культуры могут быть выражены в следующих актах: уставы, правила внутреннего трудового распорядка, должностные инструкции, положения о структурных подразделениях, инструкции по делопроизводству и документообороту и т.д. Выполнение данных норм подкрепляется санкциями.

2. *Деятельностный компонент.* Представляет собой комплекс конкретных образцов выполнения документных операций, утвердившихся технологий, форм поведения сотрудников в системе документных процессов. Деятельностный компонент может фиксироваться в нормативной подсистеме (посредством закрепления в организационно-распорядительной, нормативно-методической документации), однако данный факт не является гарантией того, что зафиксированные формы документной деятельности совпадут с реально существующим деятельностным компонентом. Причины данного несоответствия могут быть различными:

- наличие конкретных традиций в выполнении документных процессов;
- низкий уровень личностной документной культуры персонала;
- несоответствие норм организационной и документной культуры организации;
- отсутствие эффективных мотивационных механизмов;
- неэффективная система адаптации и обучения персонала;
- проблемы в системе контроля;
- низкий уровень исполнительской дисциплины и ответственности;
- проблемы в системе внутренних коммуникаций (например отсутствие стабильной обратной связи);
- отсутствие соответствующего материально-технического обеспечения и др.

3. *Ценностный компонент.* Данная подсистема создает личностную и социальную значимость того или иного объекта документной культуры (конкретной компетенции, профессионального качества, технологии, формы поведения, способа деятельности). В документной культуре большинство ценностей искусственно формируемые. Значимость объекта документной культуры создается посредством:

- мотивационных механизмов (создание новых ценностей путем воздействия на потребности сотрудников, путем воздействия на существующие ценности);
- обучающих и адаптационных механизмов;
- воздействия на систему социальных отношений (например через группу лидеров, экспертную власть) и т.д.

4. *Целевая подсистема документной культуры.* Она включает в себя субъекты целеполагания и объекты целеполагания (цели, задачи, стратегии, планы). Субъекты целеполагания могут быть индивидуальными и коллективными. К первой категории необходимо отнести руководителей организации различных уровней, в чьей компетенции определять оперативные, тактические и стратегические цели подсистем организации. В частности, ими формируются цели и задачи документных процессов, нормы и ценности документной культуры.

Коллективные субъекты – это формальные и неформальные социальные группы, оказывающие влияние на менеджеров организации в процессе определения ими целевого компонента документной культуры, а также способные преломлять содержание данного компонента в соответствии со своими интересами и ценностями. Что касается основной цели документной культуры, то она может быть сформулирована следующим образом – создание и поддержание оптимальной системы внутренней и внешней документной коммуникации, способствующей повышению эффективности управления. Она определяет и подчиняет другие цели:

- интегративная цель;
- создание структуры для предсказуемых и ожидаемых форм социальных взаимодействий в рамках документных процессов;
- цели социализации и адаптации и др.

5. *Вещественный компонент.* Он представляет собой определенный результат взаимодействия сотрудников с документной средой и включает в себя системы документации, технические и программные средства обработки документированной информации, а также ряд технологий.

6. *Личностный и социальный компонент.* О документной культуре в полном смысле нельзя говорить вне контекста от ее носителей. Именно отдельные сотрудники, социальные группы и в целом трудовой коллектив организации участвуют в сохранении и воспроизводстве документной культуры. Однако документная культура – открытая неравновесная система: ее внутренняя и внешняя среда крайне нестабильна и неустойчива. Они подвержены флуктуациям, что порой приводит к кризисным состояниям. В синергетической парадигме данное состояние обозначается понятием «хаос», в социологической терминологии применяется термин «анемия» - состояние дезорганизации, когда старые социальные нормы и ценности не соответствуют реальным отношениям, а новые еще не сложились. Выход из кризиса происходит в процессе самоорганизации, однако его осуществление невозможно без участия целевого компонента [2]. На личностном уровне самоорганизация есть поиск новых путей развития системы, то есть творческий процесс. Однако поле данного процесса ограничено определенной структурой, иначе нельзя было бы говорить о преемственности и сохранении документной культуры.

7. *Коммуникативный компонент.* Коммуникация является особым аспектом и продуктом любой деятельности и социального взаимодействия, следовательно, феноменом культуры. Культура существует только в рамках и посредством коммуникации. Данный компонент – важнейший в документной культуре [3].

Структурно-функциональный подход позволяет рассматривать документную культуру организации как социальную систему, являющуюся элементом системы более высокого уровня – информационной культуры, а та выступает подсистемой организационной культуры.

Теоретик структурного функционализма Т. Парсонс выявил основные жизненно важные функции любой социальной системы - это адаптация, целедостижение, интеграция, поддержание латентного образца. Однако в нашем анализе необходимо отметить еще одну важную функцию системы (документной культуры) – коммуникативную. Документная культура является социальной системой и для своего стабильного существования выполняет основные функции посредством своих подсистем [4].

Адаптация документной культуры представляет собой изменение ее свойств, структуры и способов функционирования с целью сохранения или достижения оптимального состояния при изменении внешних условий. Документная культура не является замкнутой: она постоянно изменяется под воздействием внешних по отношению к ней факторов и систем. Например, существует зависимость состояния документной культуры от социально-профессиональной и информационно-технической среды, от системы управления персоналом и общей стратегии развития организации, интеллектуального и инновационного потенциала и т.д.

Целедостижение – это определение социальной системой своих целей на данном этапе развития и мобилизация имеющихся ресурсов, средств и технологий на их достижение. Функция целедостижения тесно связана с саморефлексией системы: система должна постоянно производить мониторинг окружающей среды и своего внутреннего состояния, то есть при изменении во внешней и (или) внутренней среде в системе должны вырабатываться новые цели, направления изменений структуры и функционировать механизмы реализации этих целей. Поясним реализацию данной функции на частном примере: в организации появилась проблема оперативного поиска необходимой документированной информации для реализации последующих управленческих функций. Здесь мы видим ситуацию изменения внутренней среды организации. Посредством коммуникативного компонента информация о проблеме поступает к руководству или целевой подсистеме, отвечающей за формирование и изменение целей, задач, структурных элементов документной культуры. Принимается управленческое решение, например, утверждается новый локальный нормативный акт о правилах работы с документами, изменяется система мотивации, комплекс санкций или внедряется система электронного документооборота. На всех данных этапах активно действует личностный (индивидуальные ценности и мировоззрения отдельного сотрудника, субъективная оценка им ситуации, его страхи и переживания, структура потребностей и т.д.) и социальный (степень сплоченности коллектива, уровень конфликтности, групповое давление, структура неформальной организации и т.д.) компоненты документной культуры. Функция целедостижения воздействует на остальные подсистемы документной культуры путем:

- создания новых ценностей в работе с документами (например оперативность и пунктуальность в информационно-поисковой работе);
- формирования новых образцов деятельности и технологий работы с документами (например деятельность по маршрутизации документопотоков, работа с электронными регистрационно-контрольными карточками);
- преобразования вещественного компонента (появление новых видов документов, систем классификации документированной информации).

Функция интеграции является важнейшей функцией документной культуры: она позволяет элементам системы поддерживать устойчивые скоординированные связи, тем самым придавая системе свойство целостности. Интеграция осуществляется при участии нескольких подсистем. Целевой компонент отвечает за согласованность целей и задач всех процессов работы с документами (документирование, документооборот, архивное хранение). Гармонизация целевого компонента документальной и организационной культуры позволяет вырабатывать единые методы и механизмы формирования и управления информационно-документальной средой организации, что, безусловно, способствует интеграции подсистем документной культуры. Ценностно-нормативная и деятельностная подсистема также играют определенную роль в функции интеграции: взаимопонимание, координация и коммуникация возможны при наличии ряда общеразделяемых ценностей и форм деятельности.

Функцию поддержания латентного образца выполняют подсистемы, передающие традиции. В документной культуре эту задачу реализуют следующие подсистемы: ценностно-нормативная, деятельностная, вещественная.

Коммуникативная функция выражена в единичных актах документной коммуникации. Документная коммуникация – это средство достижения устойчивого взаимодействия между субъектами коммуникации посредством обмена документированной информацией (документами). Можно выделить следующие элементы единичного акта документной коммуникации:

1. Автор (отправитель, адресант, коммуникатор) – субъект, генерирующий идею, определяющий цель коммуникации и объем передаваемой информации. Автор может быть индивидуальным (руководитель организации, начальник структурного подразделения) и кол-

лективным (правление, совет директоров). Автор в той или иной степени зависим от своего социального окружения, так называемых групп влияния (экспертов, неформальных групп, авторитетов). Если речь идет об управленческом процессе, то немаловажное значение имеет взаимодействие руководителя как личности, принимающей управленческое решение, и специалиста в сфере документационного обеспечения управления как личности, придающей данному решению официальный статус посредством документирования. Решение руководителя должно быть правильно интерпретировано и зафиксировано специалистом по документационному обеспечению управления. Здесь немаловажное значение приобретает то, как соотносится уровень документной культуры руководителя и специалиста.

2. Документ - особый объект, представляющий собой соединение трех элементов: собственно информации, материального носителя и реквизитов (метаинформации), придающих документу официальный статус, юридическую силу и указывающих на его включенность в информационную систему организации. Документ может быть носителем ретроспективной, оперативной и перспективной информации. Данный факт позволяет рассматривать два среза документной среды: архивная документная среда, документная среда управленческой оперативной и перспективной информации. Вокруг этих пластов складываются специфичные системы социальных взаимодействий.

3. Канал документной коммуникации – способ передачи документированной информации в пространстве и времени. Каналы документной коммуникации в каждой системе неодинаковы. Тем не менее, можно выделить три типа организации каналов документной коммуникации:

а) традиционный централизованный тип. Документные процессы (согласование проектов документов, распределение корреспонденции, составление управленческих документов) концентрируются вокруг единой службы документационного обеспечения управления. Документная коммуникация происходит опосредованно через сотрудников данной службы. В этом случае от сотрудников службы требуется высокий уровень информационных, документных и коммуникативных компетенций. У данного типа организации каналов документной коммуникации есть безусловные недостатки: медленное перераспределение информации; отсутствие обратной связи между руководством и непосредственными исполнителями; концентрация документированной информации в одном звене и нехватка ее в конкретные промежутки времени в других подсистемах, что может привести к избыточному количеству слухов и конфликтных ситуаций;

б) традиционный децентрализованный тип. Его отличие от первого заключается в наличии в структурных подразделениях субъектов, ответственных за документную коммуникацию. Данное обстоятельство способствует более оперативному обращению документированной информации в организации. У первого и второго типа есть общий недостаток: при движении документов внутри системы велико влияние человеческого фактора (вероятность принятия персоналом ошибочных или алогичных решений в конкретных ситуациях);

в) организация каналов документной коммуникации, основанная на использовании сетевых информационных технологий. В данном контексте необходимо говорить об организациях, использующих системы электронного документооборота. Это, прежде всего, масштабные организации с сетевой структурой и с децентрализованной системой управления. Данный тип построения каналов документной коммуникации позволяет передавать информацию непосредственно адресатам, оперативно и конфиденциально, с минимальными искажениями. Однако он также имеет определенные недостатки: минимизируется область неформального общения между сотрудниками, что зачастую приводит к снижению уровня сплоченности коллектива.

4. Получатель (адресат, реципиент) – субъект, которому предназначен документ и

который интерпретирует его. Документная культура организации оказывает влияние на процесс интерпретации, при этом особое значение приобретают следующие факторы: уровень квалификации работников информационных служб, навыки рядовых сотрудников в эффективной обработке документированной информации, влияние непосредственных руководителей и лидеров на интерпретацию персоналом документов, роль слухов в коммуникативных процессах и т.д.

5. Контекст – внешняя среда, обстановка, конкретная ситуация, наполненная индивидуально различимыми смыслами и ассоциациями.

6. Тематика документной коммуникации. Она связывает конкретную документную коммуникацию с предыдущими и последующими коммуникациями. Посредством тем задаются смысловые границы коммуникативного ряда, создается поле социального взаимодействия [5].

6. Шумы (помехи, барьеры) – это вмешательство в процесс коммуникации на любом из его этапов, искажающее смысл документа. В осуществлении документной коммуникации всегда присутствуют определенные барьеры. Во-первых, это технические барьеры, которые выражаются в недоступности необходимых документов для реципиента. Данное обстоятельство может быть вызвано разными причинами: сбой работы технических и программных средств, отсутствие рационального документооборота, неэффективная организация информационно-поисковой и архивной систем и т.д. Во-вторых, психологические барьеры, возникающие при восприятии документов реципиентом вследствие непонимания их смысла. В-третьих, это социальные барьеры - препятствия, которые возникают в виду различных социальных статусов отправителя и получателя.

7. Обратная связь – реакция (отклик) получателя на воспринятую им документированную информацию [6].

На все элементы процесса документной коммуникации оказывает влияние уровень документной культуры.

Таким образом, посредством участия в функциях организации документная культура воздействует на общую эффективность социальной системы. Поэтому формирование и управление документной культурой на разных уровнях являются важнейшими задачами социальных институтов и конкретных организаций. Формирование эффективной документной культуры должно основываться на следующих принципах: понимание руководством значимости данного элемента в развитии общества, профессионализм и компетентность в проектировании, применение современных информационных технологий, непрерывность процесса обучения.

Важным фактором в формировании и управлении документной культурой организации является готовность персонала к восприятию новых ценностных установок и практических технологий работы с документами. В свою очередь данный компонент зависит от целого ряда параметров: уровня мотивации работников к труду; сплоченности коллектива; наличия контркультур внутри организации; ценностных установок социальных групп; уровня образования персонала; уровня конфликтности в организации. Немаловажное значение имеет и система адаптации новых сотрудников. Формирование эффективной документной культуры возможно только с привлечением инновационного потенциала квалифицированных специалистов в области документационного обеспечения управления.

Необходимо применять системный подход для управления документной культурой организации: учитывать максимальное количество элементов, способных влиять на ее изменения, а также взаимосвязи между данными элементами. Разработка моделей управления документной культурой организации должна стать предметом специального анализа.

Библиографический список

1. Зимняя, И.А. Общая культура и социально-профессиональная компетентность человека / И.А. Зимняя [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.eidos.ru/journal/2006/0504.htm

2. Синергетическая парадигма. Социальная синергетика. – М.: Прогресс-Традиция, 2009. – 688 с.
3. **Ронзина, М.Д.** Корпоративная культура как предмет системного философского исследования / М.Д. Ронзина. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: www.i-u.ru/biblio/archive/ronsina_k
4. **Парсонс, Т.** Система современных обществ / Т. Парсонс. – М.: Аспект-Пресс, 1997. – 270 с.
5. **Назарчук, А.В.** Теория коммуникации в современной философии / А.В. Назарчук. – М.: Прогресс-Традиция, 2009. – 320 с.
6. **Соколов, А.В.** Общая теория социальной коммуникации / А.В. Соколов. – СПб.: Изд-во Михайлова В. А., 2002. – 461 с.

*Дата поступления
в редакцию 28.01.20*

N.V. Rybakov

CONCEPT OF DOCUMENTARY CULTURE OF ORGANIZATION: THEORETICAL ANALYSIS

The main subject of present article analysis is documentary culture within the limits of structurally functional, system, synergetic and competent approaches. Value documentary culture in administrative and communicative processes of the organization is considered. Intrinsic signs, levels, subsystems, the purposes and functions documentary culture are defined. The special role is taken away to consideration of personal level of documentary culture. Process of documentary communications is in detail analyzed. In article attempt to prove term application «documentary culture», and also of some other concepts becomes.

Key words: documentary environment, documentary culture, communications, system of documents, competence, document, information.

УДК 82.09

Е.С. Савенкова

**ЗАПАДНИЧЕСКИЕ ИДЕИ В РУССКОМ СОЦИОКУЛЬТУРНОМ
ДИСКУРСЕ И ИХ ПЕРСОНИФИКАЦИИ В РОМАНЕ
Ф.М. ДОСТОЕВСКОГО «ИДИОТ»**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Волнующие Ф.М. Достоевского социально-философские темы нередко реализуются в его художественном творчестве с помощью персонификаций религиозно-нравственных идей в системе образов. Герои романа «Идиот» исследуются как носители определенной идеологии, что отражается в создаваемых или репродуцируемых ими словесных текстах.

На примере анализа текстов, создаваемых Аглаей Епанчиной и Ипполитом Терентьевым, а также анализа их поступков, судьбы в целом, показаны механизмы обнаружения авторской позиции, как правило, выраженной косвенно, по отношению к католицизму и атеизму – западническим идеям в современном писателю русском обществе, об опасности которых постоянно размышлял Ф.М. Достоевский. Выводы писателя сохраняют актуальность в современном социально-философском знании. Анализ образов героев проводится как в контексте романа «Идиот», так и в широком контексте русской литературы второй половины XIX в.

Ключевые слова: православие, католицизм, атеизм, нигилизм, роман «Идиот», Достоевский.

Как известно, в социологии Макса Вебера выделяются так называемые идеальные типы. Эти типы прослеживаются как в реальной жизни, так в литературных произведениях. В русской классической литературе наиболее ярко идеальные типы представлены в романах Ф.М. Достоевского. Так, в романе «Идиот» Ф.М. Достоевский поставил перед собой задачу изобразить «положительно прекрасного человека». Однако рядом с образом князя Мышкина, проповедующего и исповедующего русскую православную веру, писатель представляет читателям персонажей, чье сознание европеизировано, тем самым они идеологически противопоставляются главному герою. Цель данной статьи – рассмотреть, как воплощаются западнические идеи в образах героев романа, и дать вариант современного прочтения романа в свете социокультурных проблем начала XXI в., прежде всего, в свете проблемы духовно-нравственного развития российского общества.

События романа «Идиот» разворачиваются в Петербурге 60-х годов XIX в. Это время идейного брожения, утраты молодым поколением нравственного стержня, опоры на многовековую духовную традицию, время безверия и протеста, бездуховного и подчас бессмысленного. Почему князь Мышкин, несущий людям свет истинной веры, не способен никого спасти? Способны ли его услышать окружающие? Обратимся к некоторым образам романа.

Аглаю Епанчину, невесту князя, в полной мере можно назвать «западным» персонажем, так как в ее характере превалирует рассудочное начало, не свойственное русскому менталитету. Аглая страстна, как и Настасья Филипповна, но ее страсть головная: героиня так и не может примириться с мыслью, что избрала в женихи дурачка, «уродика». Кажется, что в героине постоянно борются между собой желание быть нежной («домашней», душевной) и эмансипированное стремление к независимости. Как известно, обе героини «Идиота» получают из уст различных персонажей романа определение «фантастических» и «невозможных». По-нашему мнению, данный эпитет указывает на то, что Достоевский создавал главные женские образы по принципу гротеска и оксюморона. Как следствие, образ Аглаи построен автором на отказе героини от духовных принципов православия, отсутствии твердого нравственного стержня.

В «Идиоте» связь между героиней и религиозными мотивами прослеживается не так явно, лишь в финальных строках романа. Думается, следует оспорить мнение М.М. Бахтина

о том, что «рассуждения о католицизме введено в роман внешне и не имеет никакой связи с основной его темой... проблема эта дана здесь фрагментарно» [1, с. 278]. Неожиданный поворот в судьбе Аглаи, воспринимаемый читателем подобно «pointe» в новелле (страстная влюбленность и замужество с графом-эмигрантом, защитником Польши, исступленное уверование в католицизм), глубоко мотивирован духовно-нравственной атмосферой произведения. Истоки такой развязки мы находим еще в середине романа, в начале второй части.

Если речь князя о католицизме на светском вечере у Епанчиных может рассматриваться как неудачная попытка нравственного диалога между Мышкиным и его невестой [2], то декламация стихотворения и предварительная лекция о «рыцаре бедном» в определенной мере мотивируют этот «провал общения». Аглая в этой сцене тоже «беседует» с князем, раскрывая перед ним нелепость слепой веры во внешнюю красоту: «он ее выбрал и поверил ее «чистой красоте», а затем уже преклонился пред нею навеки; в том-то и заслуга, что если б она потом хоть воровкой была, то он все-таки должен был ей верить и за ее чистую красоту копыя ломать» [3, с. 207]. Думается, в приведенном отрывке звучит авторская ирония по отношению к Мышкину. Аглая «деромантизирует» мотив совершенства физической красоты тем, что считает его причиной трагической судьбы лирического героя, умершего безумным. Поэтому писатель доверяет Аглае «смоделировать» на основе пушкинской баллады судьбу князя. Однако не следует полностью сводить «лекцию» героини к позиции автора.

Судя по черновикам к роману, Достоевский планировал изобразить «положительно прекрасного человека», опираясь на художественные образы зарубежной литературы (Пиквик, Жан Вальжан, Дон-Кихот). Именно Аглая «обнаруживает» связь между ними и центральным героем «Идиота»: закладывая записку от Мышкина в роман Сервантеса, она поражается мысли о сходстве характеров литературного героя и своего странного знакомого. В сознании героини образ Мышкина сливается с образом Дон-Кихота, однако для автора эти образы не тождественны. Принципиальное различие в характере веры князя Мышкина и Дон-Кихота справедливо отмечает Н.Н. Арсентьева: первый уповает на силу сострадания, второй – на меч, воплощая в себе «идеал католического Христа». «В сознании героев, – пишет исследовательница, – традиционная христианская вера преобразуется в национальные разновидности религиозного идеализма» [4, с. 74]. Достоевский показывает, как католическая концепция мира, доминирующая в сознании Епанчиной, определяет ее отношение к идеалу красоты.

Аглая, подобно Настасье Филипповне, воображает в лице Мышкина божество или хотя бы божьего посланника, но в особом свете – почти как иностранца, выходца из Швейцарии, запредельного, но интересного для мира. Сознание Аглаи европеизировано, и Мышкина она видит сквозь призму западной культурной традиции. Для героини князь – одновременно и «рыцарь бедный» крестовых походов, и Дон-Кихот Ламанчский: «Рыцарь бедный» — тот же Дон-Кихот, но только серьезный, а не комический. Я сначала не понимала и смеялась, а теперь люблю «рыцаря бедного», а главное, уважаю его подвиги» [3, с. 207]. Несмотря на то, что Епанчина упоминает вовсе не «князя Христа», а всего лишь «рыцаря», на наш взгляд, нам представляется возможным в контексте данной сцены провести аналогию между этими понятиями как определениями «идеала».

Пушкинский текст воспроизведен в романе с сокращениями, и это определяет специфику его бытования в «Идиоте», ибо историки литературы отмечают, что, по всей вероятности, Достоевский мог знать все стихотворение целиком [5, с. 403]. Сопоставление усеченного варианта с полным дает интересные результаты, так как «отрывок без начала и конца», который, по выражению князя Щ., читается на лебедевской даче, отражает позицию героини, а точка зрения автора скрыта в опущенных строках баллады.

Аглая отвечает матери, что «в стихах этих прямо изображен человек, способный иметь идеал», однако там «не сказано, в чем, собственно, состоял идеал» [3, с. 207]. Действительно, в том отрывке, который декламирует героиня, отсутствует катрены (третий и седьмой), посвященные образу «Марии девы» и любви к ней «паладина». Опуская названные

катрены, Достоевский позволяет Аглае очень вольно интерпретировать образ возлюбленной рыцаря («образ чистой красоты») в духе куртуазной средневековой поэзии. Мы видим, что мировоззрение Епанчиной, если так можно выразиться, секуляризировано: божественное начало в нем подчинено светской эстетике. Ее идеал, «князь Христос» – рыцарь прекрасной дамы («тот же Дон-Кихот»), – является воплощением католического мировоззрения, с его культом Мадонны. Существование тонкой грани между образами Мадонны и Богоматери отмечает Г. Померанц: «Богоматерь не противостоит Содому, она просто вне всего этого мира, где есть Содом. А Мадонна достаточно перекликается с культом дамы. Она не вне светской культуры, не вне отношений мужчины и женщины, а как бы на земном небе» [6, с. 178].

Не случайно, «князь долго в чрезвычайном смущении мучился одним неразрешимым для него вопросом: как можно было соединить такое истинное, прекрасное чувство с такою явною и злобною насмешкой?» [3, с. 209] Думается, что эта «насмешка» стала отражением странного (оксюморонного) сочетания веры и безверия в сознании Аглаи. Таким образом, Достоевский с помощью приема «многозрения» демонстрирует нравственную несостоятельность западных идей.

Писателю важно показать, что в католической традиции утрачивается патриархальность, культ Отца (вероятно, в связи с возвышением статуса Богоматери, которое началось в Европе еще в средние века), а значит, это происходит и в современном европеизированном обществе (не случайно Лебедев придумывает неологизм: «римская папа»). С образом Аглаи Достоевский связывает подобную потерю: в ее «мифологии» верховное божество всегда женское (Дама сердца «рыцаря бедного», Дульсинея Дон-Кихота), недостижимый для мужчины идеал. Достоевский показывает героиню как человека, который отвергает Бога как Учителя, как *высшую* силу над ней. Писатель «объясняет» противоречивые желания героини тем, что она хочет, с одной стороны, найти в Мышкине наставника («Вы все-таки будете меня руководить, потому что я вас выбрала» [3, с. 358]), а с другой, насмехается над ним («Я заметила, что вы ужасно не образованны...» [3, с. 430]). Достоевский, проецируя этико-эстетический идеал Аглаи на образ князя, демонстрирует заблуждение героини, связанное с «европеизацией» ее мировоззрения.

Однако стихотворение, декламируемое Епанчиной, и художественно, и идейно основывается скорее на отечественной, нежели на западной традиции. Пушкинская легенда апокрифична с точки зрения сюжета: тема стихотворения – жизнь праведника и его путь к смерти. Строй ее поэтического языка отнюдь не европеизированный, своей неторопливостью и напевностью близкий к стилизации под «русскую старину» (слог былин и духовных стихов). Финал стихотворения может быть прочитан как мораль, в которой осуждается слепая вера паладина: «Как безумец умер он».

Следует отметить, что для самой чтицы стихотворение наполняется сакральным смыслом, присущим молитве: «В этой важности можно было видеть теперь только безграничность и, пожалуй, даже наивность ее уважения к тому, что она взяла на себя передать. Глаза ее блистали, и легкая, едва заметная судорога вдохновения и восторга раза два прошла по ее прекрасному лицу» [3, с. 210]. Для автора романа Аглая в этом эпизоде предстает как духовная чтица, подобно избранным – слепым старцам, что пели духовные стихи. По традиции, это были люди, не способные к физическому труду. В романе же в роли «избранной», несущей духовную (пушкинскую) культуру другим героям, изображается аристократичная девушка, живущая в праздности и лишь желающая когда-нибудь сбежать из дома и «трудиться».

Итак, образ Аглаи в романе становится символом западной культуры. Героиня искаженно воспринимает Мышкина как божество в духе европейских религиозных тенденций и при этом пытается утвердить себя как божество («идол»). Достоевский раскрывает свою мысль с помощью различных сюжетных ситуаций: приема предварения, мысленного полемического диалога как «провала коммуникации», многозрения, «неожиданной» развязки в судьбе героини в духе «pointe» новелл, декламации и нестандартной интерпретации класси-

ческого стихотворения. Сцена декламации пушкинских стихов может рассматриваться как часть надсюжетного философского диалога героини с Мышкиным о романтическом каноне красоты. Баллада Пушкина, представленная в романе в усеченном варианте, выполняет задачу травестийного снижения жанра духовных стихов, и с помощью этого приема автор подспудно проводит мысль о несостоятельности мировоззренческих установок Аглаи: она не «укорена» ни в православии, ни в католицизме, что и приводит героиню к попытке самоутвердиться как божество.

Другим способом развенчания западных идей, которыми «заражена» интеллигенция в современной Достоевскому России, является образ Ипполита Терентьева. Его концепция мира представлена в рукописи «Мое необходимое объяснение». Это литературный текст, который представляет собой и по содержанию, и функционально интерпретацию жанра публицистической исповеди – жанра изначально неадекватного своей внутренней сущности, так как исповедь по своей природе интимна. Рассмотрим, каким образом это «произведение в произведении» вписывается в контекст романа.

Первое появление героя в романе предваряет «эксцентричную» ситуацию чтения рукописи. Большое значение имеет факт первого появления героя в романе: он появляется в окружении молодых «отрицателей», и это создает у читателя ощущение, что умирающий «исповедует» атеизм. Но это не совсем так. В «необходимом объяснении» герой категорически отзывается о материалистическом «бесчувствии» студента Кислородова, который «с видимым удовольствием» диагностирует его скорую смерть, а в конце чтения даже заявляет, что допускает «вечную жизнь» и «высшую силу». Данное утверждение, казалось бы, должно свидетельствовать о сочувственном отношении персонажа к религии. Однако Ипполит верит в Бога, но не верит Богу: если нигилизм предлагает человечеству «голую правду», то «христианам» свойственно смирение, оборачивающееся ханжеским умилением перед таинством смерти. Как справедливо замечает Г. Ермилова, в вере Ипполита происходит «структурная деформация» [7, с. 73], характерная для подрастающего поколения того времени. К герою можно отнести слова самого Достоевского: «кажда красоты и идеала и в то же время 40% неверие в него, или вера, но нет любви к нему» [5, с. 167]). Получается, что религиозное сознание Ипполита трагически расколото, что находит воплощение в ряде философских символов, в частности в образе дерева из апокалиптических «источников жизни».

Достоевский вводит образ Ипполита в контекст современной ему русского романа 50–60-х годов XIX в. Это, прежде всего, «Отцы и дети» И.С. Тургенева и «Война и мир» Л.Н. Толстого. Исповедь умирающего не случайно начинается и заканчивается упоминанием «павловских деревьев»: приписываемая Терентьевым князю Мышкину фраза о том, что «легче умирать между людьми и деревьями» [3, с. 321], безусловно, отсылает читателя к метаморфозе, произошедшей с Базаровым: герой Тургенева, поначалу считавший всех людей одинаковыми, подобно деревьям, постепенно приходит к обратному мнению. Перед смертью Евгений вспоминает лес, который становится для него символом качественно новых, одухотворенных отношений между людьми. По сути, подобную же идею обновления жизненных установок отражает в романе-эпопее «Война и мир» образ дуба, увиденного князем Андреем по дороге в рязанские имения его сына. Может быть, поэтому после первого появления Ипполита на романной «сцене» (в деле с «сыном Павлищева») автор предоставляет Аделаиде Епанчиной и князю Щ. возможность рассказать о «чудесном старом дереве, развесистом, с длинными, искривленными сучьями, все в молодой зелени, с дуплом и трещиной» [3, с. 252], увиденном ими в саду. Это описание – нечто вроде монтажа двух впечатлений Болконского от встреченного дерева.

В романе Достоевского образ дерева функционирует иначе, чем у И. С. Тургенева и Л. Н. Толстого, хотя так же отражает внутреннее состояние героя. В отличие от Базарова и Болконского, обреченных на смерть и готовых мудро принять свою гибель, Терентьев не способен прийти к гармонии с самим собой и с миром.

«Источники жизни», таким образом, заглушаются «источниками смерти», которые мы

рассмотрим далее. Согласно рукописи, умирающий восемнадцатилетний юноша, глядя на гольбейновского «Мертвого Христа», воспринимает мир как торжество «огромного, неумолимого и немоего зверя или ... в виде какой-нибудь громадной машины новейшего устройства, которая бессмысленно захватила, раздробила и поглотила в себя, глухо и бесчувственно, великое и бесценное существо...» [3, с. 339]. Откуда возникает такое неожиданное на первый взгляд сопоставление зверя и машины, удивляющее самого рассказчика? По мнению Д. Мартинсен два «немых» образа возникают у героя из-за невозможности адекватной коммуникации с людьми: «животный и механический образы усиливают страх Ипполита, потому что оба невосприимчивы к единому оружию, которым он может защищаться, – к речи» [8, с. 429]. Так же важно отметить отсутствие в образах зверя и машины развитого разума и способности к состраданию, то есть сферы духа и души. «Громадная машина новейшего устройства», раздробляющая и поглощающая человека, – это символ современной персонажу цивилизации, технического прогресса, который прочитывается как метафора развивающегося капиталистического общества, основанного на фабричном и мануфактурном производстве, обесценивающим труд рабочих, а более широко как метафора бездуховности. Очевидно, что писатель опирается здесь на концепцию «человека-машины», изложенную в одноименной книге французского просветителя Ж. О. де Ламетри. Эта философия применима к тем персонажам Достоевского, которые представляют собой тип «дельцов-практиков, смахивающих на деловых людей западного образца (Лужин, Епанчин, Тоцкий, Фердыщенко)» [9, с. 332]. Однако, на наш взгляд, «заражен» этой мыслью и Ипполит, оправдывающий, по словам Коли, ростовщичество и провозглашающий в своей исповеди культ Ротшильда. Его нигилизм – следствие «женевских идей», в которых прагматизм ведет к духовному оскудению. Поэтому едва лишь намеченная в «Идиоте» идея умирающего о совершении «безнаказанных» убийств вызревает в «Бесах» в логику обоснования преступлений Петром Верховенским.

Рассматривая сложную парадигму образа «громадной машины», нельзя не обратить внимание на многозначность образа «немоего зверя». Он символизирует в исповеди представление о «темной, наглой и бессмысленно-вечной силе» природы. Очевидную связь между первым текстом о «скорлупчатом гаде» и последним – о «немом звере» отмечает С. Сальвестрони: «то, что юноша видит в картине Гольбейна с мучительным отвращением, – это действие того самого отвратительного существа, пытавшегося во сне разорвать его». Заметим, что это положение не учитывает временных инверсий в рукописи Ипполита: именно сон – следствие увиденной полторы недели назад копии «Мертвого Христа», и в нем впечатление от картины переосмысливается. Поэтому, на наш взгляд, между этими образами существует не прямая, а ассоциативная связь.

На первый взгляд, воплощением «мирового Зла» в сновидении юноши оказывается «скорлупчатый гад», похожий на скорпиона или тарантула. Исследователи отмечают, что описанное персонажем чудовище имеет прямое отношение к апокалипсическим стихам: «вышла саранча на землю, и дана была ей власть, какую имеют земные скорпионы» (Ап. 9, 8-10) [10, с. 74]. Помимо библейских аллюзий, очевидна связь этого образа с концептом «сладоэротического насекомого»: «ядовитая гадина» в сознании Ипполита – разновидность паука, «символ осатаневшей самости», «олицетворение жестокой и темной природы, пожирающей порожденных ею детей, – то есть жестокое сладострастие» [11, с. 64].

Однако во сне Ипполита появляется и другой зверь, который вступает с чудовищем в противоборство, – умершая собака Норма, «огромный тернёф, черный и лохматый» [3, с. 324]. Ее миссия в кошмаре героя – убийство «гадины», которое парадоксальным образом напоминает действие «раздробляющей и поглощающей» машины: «Вдруг она медленно оскалила свои страшные зубы, открыла всю свою огромную красную пасть, приоровилась, изловчилась, решила и вдруг схватила гада зубами. Должно быть, гад сильно рванулся, чтобы выскользнуть, так что Норма еще раз поймала его, уже на лету, и два раза всю пастью вобрала его в себя, все на лету, точно глотая. Скорлупа затрещала на ее зубах...» [3, с. 324].

Описание собаки, ее страшной пасти и зубов, словно идет в разрез с ее ролью защитника человека и Добра.

В интерпретации образа собаки большую роль играет биографический контекст: писатель был достаточно равнодушен к собакам (и животным вообще). Как отмечают исследователи, сон Ипполита – «единственный случай, когда Достоевский изобразил собаку действительно другом человека», и объясняет это тем, что прототипом Нормы послужила собака князя В.Ф. Одоевского Тернев, которую писатель не раз видел в гостях [12, с. 150]. Думается, что это «исключение» на самом деле имеет особый подтекст. Как мы помним, Норма, пытаясь уничтожить гада, отравляется его ядом, и в каком-то смысле, становится причастна «мировому Злу» [13, с. 681]. По-видимому, в этой сцене представлен своеобразный вариант художественного воплощения одной из основных тем Достоевского – исследование «превращения змеборца в змея», то есть рождения зла в жестокой борьбе за свое добро [6, с. 254].

Образ собаки во сне Ипполита получает особое значение в контексте старообрядческой традиции. Так, протопоп Аввакум считал одним из воплощений антихриста бешеную собаку, которая «огнем дышет, изо рта, из ушей и из ноздрей пламя смрадное исходит» [14, с. 423]. Интересно, что «собачий мотив» в «Идиоте» связан с образом Рогожина: из рассказа героя о бегстве в Псков узнаем, что там его пьяного «собаки обгрызли» [3, с. 13]; а Лебедев признается, что Парфен его «в Москве травил, по всей улице, борзою сухой» [3, с. 166]. В бреду юноши образ тарантула и привидение Рогожина наслаиваются друг на друга. Можно предположить, что во сне Ипполита Парфен является ему в образе умершего черного тернёфа, соединяя в себе функции избавителя и мстителя. Через сновидение Достоевский показывает, насколько губителен атеизм, разрушающий веру в вечную незыблемость морально-нравственных идеалов.

Существующее в достоевковедении мнение о том, что образы зверя и машины возникают у Ипполита именно на сознательном уровне, в отличие от образов тарантула и привидения, выражающих его подсознательное [8, с. 429], представляется нам не вполне корректным. Разделение образов на «сознательные» и «бессознательные» не проясняет функции сна в структуре образа героя и его значения для романа в целом. Дело в том, что «огромный неумолимый зверь» и «громкая машина новейшего устройства» могут быть рассмотрены как два различных описания одного и того же предмета – поезда. Хотя сам Терентьев об этом не догадывается, для читателя оно очевидно. Метафорическое уподобление поезда или паровоза огромному (огнедышащему) зверю традиционно для русской литературы XIX в. (яркий пример, на наш взгляд, – реплики Феклуши в пьесе Н.А. Островского «Гроза»). Таким образом, в рукописи персонажа подспудно обыгрывается мотив железной дороги, заданный в «диссертации» Лебедева. Вспомним, что именно Ипполит вызывает Лукьяна Тимофеевича на откровение, задавая вопросы: «Что значат «источники жизни» в Апокалипсисе? Вы слышали о «звезде Полюнь, князь?» [5, с. 309] Нетрадиционное толкование Лебедевым апокалипсического образа («сети железных дорог, распространившихся по Европе» [5, с. 309]) находит неожиданный отклик в фантазиях Ипполита, и это совпадение выступает в романе как авторский прием-доказательство правомерности рассуждений обоих персонажей.

Упомянув зверя и машину, ставя их в один ряд, Ипполит будто прослеживает исторический путь человечества: от звериного состояния первобытных людей до будущего воцарения машин. Отсюда ужас и недоумение героя по поводу бессмысленности тяжелейших страданий Христа на Голгофе: трагедия не столько в «некрасивости» смерти, сколько в ненарушимости заведенного раз и навсегда мирового порядка, который уничтожает самое лучшее в жизни. Интересно, что во сне и в бреду Ипполит воспринимает Рогожина своим антагонистом – как «человека-зверя», но сам оказывается «человеком-машиной», пытаясь убить самого себя. Ведь когда он говорит про «великое и бесценное существо – такое существо, которое одно стоило всей природы и всех законов ее» [3, с. 339], имея в виду Иисуса, он говорит о душе вообще, в том числе и о себе.

Исторический мотив развития человечества в концепции человека-зверя и человека-

машины получает в исповеди Ипполита логическое завершение в образе Наполеона. Обращаем внимание, этот образ вписан в роман как лейтмотив «католического всеподчинения» мира [15, с. 336]. Мотивы европейских религиозных конфессий, прослеженные нами в образе Аглаи, получают здесь логическое завершение, ибо, по словам самого Мышкина, «атеизм от них вышел, из самого римского католичества» [3, с. 451]. Не случайно, М. Бахтин называет Ипполита «озлобленным протестантом» [1, с. 278].

Образ французского императора впервые возникает в исповеди Ипполита. Великий полководец для юноши является идеальной личностью, воспринимается им как «земной бог». Трагедия юноши, ожидающего скорой смерти, и Наполеона, заключенного на острове, сближаются Достоевским: Меерова стена (в значении тюрьма) ассоциируется с островом Святой Елены; письменная исповедь героя – с мемуарами бывшего императора. Обоих ожидает трагедия забвения.

Бахмутов сравнивает Терентьева с Наполеоном, когда тот просит бывшего школьного врага о помощи: «Как Наполеон обратился к Англии!» [3, с. 334]. Как известно, речь идет о финале военной карьеры Бонапарта, о его вынужденных переговорах с противником. В этой ситуации Наполеон предстает романтическим героем-одиночкой, поверженным гением, поэтому во фразе Бахмутова передано искреннее восхищение им. В данном эпизоде задается положительная оценка знаменитого завоевателя, которую в романе будут разделять потом все персонажи, затрагивающие тему Наполеона. Заметим, что в скрытом виде наполеоновский мотив пронизывает весь текст «Необходимого объяснения» Ипполита. Вне прямого упоминания имя Бонапарта оказывается символом великого человека, «слагаемого» из двух образцов для подражания: миллионера Ротшильда, сумевшего заработать «горы золотых импералов и наполеондоров», и первооткрывателя Нового Света Колумба, дело жизни которого заключалось в «беспрерывном и вечном «открывании» [3, с. 327]. Наконец, рассуждение героя по поводу важности «единичного добра» завершается мыслью об «участии, которое человек может «иметь в будущем разрешении судеб человечества» [3, с. 336]. В ней, безусловно, звучит отголосок мечты о славе и могуществе французского императора.

Эта идея в преломлении нигилистически настроенного молодого поколения оборачивается желанием Ипполита «четверть часа в окошко с народом разговаривать, чтобы «все за ним пошли» [3, с. 245]. «Мое необходимое объяснение» по сути своей не исповедь, а проповедь, требующая определенной аудитории. Она принципиально публична. Из нее мы узнаем, что Ипполит хочет быть учителем (не религиозного знания, а атеизма), но ведь именно «учителем» он называет Христа на гольбейновской картине. Получается, что Ипполит кощунственно отождествляет себя, приговоренного к гибели, с мертвым Христом.

Важным оказывается то, что князь Мышкин в сознании юноши также приближен к божеству. Ипполит признается, что лишь ради Льва Николаевича приезжает в Павловск, любит и ненавидит его, называет то «Человеком», то «иезуитской, паточной душонкой». Собственно, таково же отношение юноши и к самому Христу. Отрицание в божьем сыне человеческой слабости, «смирения» приводит его к искажению веры, близкому, по мнению Г. Ермиловой, к «гностическому манихейству» [7, с. 70]. Заметим, что между Мышкиным и Ипполитом существует важное сходство – не врожденные, а приобретенные качества характера, обусловленные тяжелой неизлечимой болезнью; восприятие себя в мире как «выкидыша». Именно такой трагичный взгляд на собственное существование и порождает в обоих активное желание преобразовать действительность. Не случайно князь заявляет в романе, что социализм мог родиться именно в России. Но пути создания новой реальности у обоих принципиально отличны, что порождает в умирающем юноше зависть и вражду по отношению к князю.

Как отмечалось ранее, исповедь Ипполита необычна с жанровой точки зрения. Помимо отказа от интимности, мы наблюдаем в ней и отказ от собственно исповедальности, самобичевания. Героем руководит не смиренное желание открыть тайны и муки души другим людям, но гордыня, тщеславие. В центре внимания Терентьева его скорая смерть, ею он лю-

буется и, по сути, дает читателям назидательные советы о том, как следует жить и умирать. Образ автора не «ничтожен и неразумен», но пафосен: себя он представляет и как «мученика» (умирающего, но не сдающегося смерти), и как «учителя». Можно предположить, что Достоевский, создавая «встроенный» текст, опирается на жанровые постулаты так называемого мартирия – разновидности агиографии, описывающей мученическую смерть подвижника во имя веры, житие мученика, причем переиначивает основные принципы этого жанра. Сохраняя традиционную канву сюжета (обстоятельства смерти) и цели мартирия – назидательность и занимательность, объяснение христианских реликвий (в исповеди Ипполита этому служит обращение к апокалипсическим образам и картине Гольбейна), Достоевский полностью изменяет образ автора и объект повествования. Так, в этом мартирии образ святого мученика замещается антигуманным образом Наполеона; образ Бога (Христа) – образом Мышкина, «паточной душонки»; деревья – библейские символы жизни – воплощаются в виде прозаических саженцев в кадках, образы смерти – машина и зверь – появляются лишь в галлюцинациях героя. Мы наблюдаем своеобразное «снижение» жанра. Получается «ложный мартирий» – авторская иллюстрация философских заблуждений Ипполита, ведущих от нигилизма к идее богоборчества: князь предстает перед героем хриstopодобным существом, «учителем», с которым умирающий юноша готов вступить в «конкурентную» борьбу.

Выводы

Аглая и Ипполит – молодые люди из разных слоев общества, но оба отказываются от основ православия в пользу «враждебных» ему, с точки зрения писателя, конфессий (католицизма или нигилизма). Достоевский на примере текстов, создаваемых или интерпретируемых этими персонажами, доказывает несостоятельность их идей и показывает трагизм положения Мышкина как проповедника возрождения истинно православной веры в России: в одиночку противостоять нравственно заблудшему обществу – задача непосильная для человека.

Проблема, которую исследует автор «Идиота», сохраняет свою актуальность и в наши дни: увлекаясь западными идеями и конфессиями, русское общество теряет духовную основу – многовековую православную традицию, благодаря которой Россия шла по своему собственному, уникальному пути развития.

Библиографический список

1. **Бахтин, М.М.** Записки лекций по истории русской литературы / М.М. Бахтин // Собр. соч. в 2 т. – М., 2000. Т. 2.
2. **Буянова, Е.Г.** Романы Достоевского / Е.Г. Буянова. – М., 2002. – 104 с.
3. Достоевский, Ф.М. Идиот / Ф.М. Достоевский // Собр. соч. в 30 т. – Л.: Наука, 1972. Т. 8. – 512 с.
4. **Арсентьева, Н.Н.** Проблема национального идеала в творчестве Сервантеса и Достоевского / Н.Н. Арсентьева // Достоевский и национальная культура. – Челябинск, 1996. Вып. 2. С. 65–87.
5. **Достоевский, Ф.М.** Идиот / Ф.М. Достоевский // Собр. соч. в 30 т. – Л.: Наука, 1972. Т. 9. – 528 с.
6. **Померанц, Г.С.** Открытость бездне. Встречи с Достоевским / Г.С. Померанц. – М., 1990. – 384 с.
7. **Ермилова, Г.Г.** Восстановление падшего слова, или о филологичности романа «Идиот» / Г.Г. Ермилова // Достоевский и мировая культура. 1999. № 12. С. 73.
8. **Мартинсен, Д.А.** Повествования о самообослблении: литературные самоубийства в творчестве Достоевского / Д.А. Мартинсен // Роман Ф.М.Достоевского «Идиот»: современное состояние изучения: сб. ст.; под ред. Т.А. Касаткиной. – М., 2001. - С. 425-434.
9. **Бачинин, В.А.** Достоевский: метафизика преступления (художественная феноменология русского постмодерна) / В.А. Бачинин. – СПб. : Изд-во. С.-Петербург. ун-та, 2001. – 412 с.
10. **Сальвестрони, С.** Библейские и святоотеческие источники романов Достоевского / С. Сальвестрони. – СПб., 2001. – 186 с.

11. **Касаткина, Т.А.** Роль художественной детали и особенности функционирования слова в романе Ф.М. Достоевского «Идиот» / Т.А. Касаткина // Роман Ф.М. Достоевского «Идиот»: современное состояние изучения: сб. ст.; под ред. Т.А. Касаткиной. – М., 2001. – С. 60–99.
12. **Левина, Л.А.** Два князя (Владимир Федорович Одоевский как прототип Льва Николаевича Мышкина) / Л.А. Левина // Достоевский. Материалы и исследования. – СПб., 1997. Т.14. С. 343–468.
13. **Касаткина, Т.А.** Комментарии к роману «Идиот» / Т.А. Касаткина // Достоевский Ф.М // Собр. Соч. в 9 т.; под ред. Касаткиной Т.А. – М., 2003. С. 594–688.
14. Сочинения Аввакума // Памятники литературы Древней Руси: XVII век. Книга вторая; сост. и общая ред. Л. Дмитриева, Д. Лихачева. – М., 1989. С. 351- 454.
15. **Кирпотин, В.Я.** Мир Достоевского / В.Я. Кирпотин. – М., 1983. – 472 с.

*Дата поступления
в редакцию 29.01.2011*

E.S. Savenkova

**WESTERN-IDEAS IN RUSSIAN SOCIOCULTURAL
DISCOURSE AND IT'S PERSONIFICATION IN THE
DOSTOEVSKY'S NOVEL "IDIOT"**

Exciting Dostoyevsky socio-philosophical themes are often realized in his artistic creativity with personifications of religious and moral ideas in the system images. Characters of the novel "Idiot" investigated as carriers of a particular ideology that is reflected in newly created or reproducible of verbal texts. An analysis of texts produced by Aglaia Yepanchin and Hippolytus Terent'ev, as well as analysis of their actions, the fate of the whole, the author shows the detection mechanisms position, usually expressed indirectly, in relation to Catholicism and atheism Western-ideas in contemporary Russian society writer the danger is constantly thinking Fyodor Dostoyevsky. The conclusions of the writer are still valid in today's socio-philosophical knowledge. Analysis of the images is carried out as heroes in the context of the novel "The Idiot", and in the broader context of Russian literature of the second half of XIX century.

Key words: Orthodoxy, Catholicism, atheism, nihilism, the novel «The Idiot», Dostoyevsky.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 531.768.082.14

В.Д. Вавилов

ЗАЩИТА МИКРОСИСТЕМНЫХ ПРИБОРНЫХ СРЕДСТВ ОТ ВИБРАЦИОННОЙ И УДАРНОЙ НАГРУЗКИ

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

В статье рассмотрен вопрос виброзащиты микросистемных приборных средств на примере объемного блока, установленного в корпусе на амортизаторах. Получена математическая модель системы виброзащиты в виде передаточной функции шестого порядка и ее реализация в виде компьютерной программы.

Ключевые слова: микросистема, виброзащита, амортизаторы, точка резонанса, спад АЧХ.

Проведем оценку динамической системы по рис. 1 при следующих оговорках. В задачах с настроенным демпфером колебания в виброизолируемой системе возбуждаются не только от внешних сил и моментов, но и от объекта, на котором она закреплена посредством амортизаторов. Допускаем симметричность системы относительно оси z и смещение центра масс относительно двух осей: относительно оси x на величину ε_z и относительно оси z на величину ε_x . При этом от действия возмущающей силы по осям x или z будем иметь два разных режима, которые независимо друг от друга могут привести к опасным ситуациям. То же можно сказать и о случае их совместного действия, только режим становится более интенсивным и опасным.

На рис. 2 приведена конструкция пластинчатого амортизатора. При действии вибрационной или ударной нагрузки по оси y упругие подвижные пластины воздействуют на аналогичные неподвижные, при этом те и другие пластины изгибаются и одновременно скользят относительно друг друга. Изгиб обеспечивает жесткость амортизатору, а скольжение с трением - коэффициент гистерезисных потерь. Для достижения необходимой виброзащиты, приборного блока система с амортизаторами должна отвечать трем требованиям: 1) иметь резонанс в заданной точке амплитудно-частотной характеристики; 2) заданную величину резонансного пика; 3) заданный спад амплитудно-частотной характеристики выше рабочих частот. Резонансная частота системы с амортизаторами как фильтра нижних частот определяется зависимостью

$$\omega_{\text{рез}} = \sqrt{\frac{k_y(\eta+1)n}{2m}}, \quad (1)$$

где $\omega_{\text{рез}}$ - резонансная частота системы с амортизаторами; k_y - осевая жесткость амортизаторов; η - безразмерный коэффициент гистерезисных потерь в амортизаторе; n - число амортизаторов в системе виброзащиты; m - масса виброзащищаемого приборного блока.

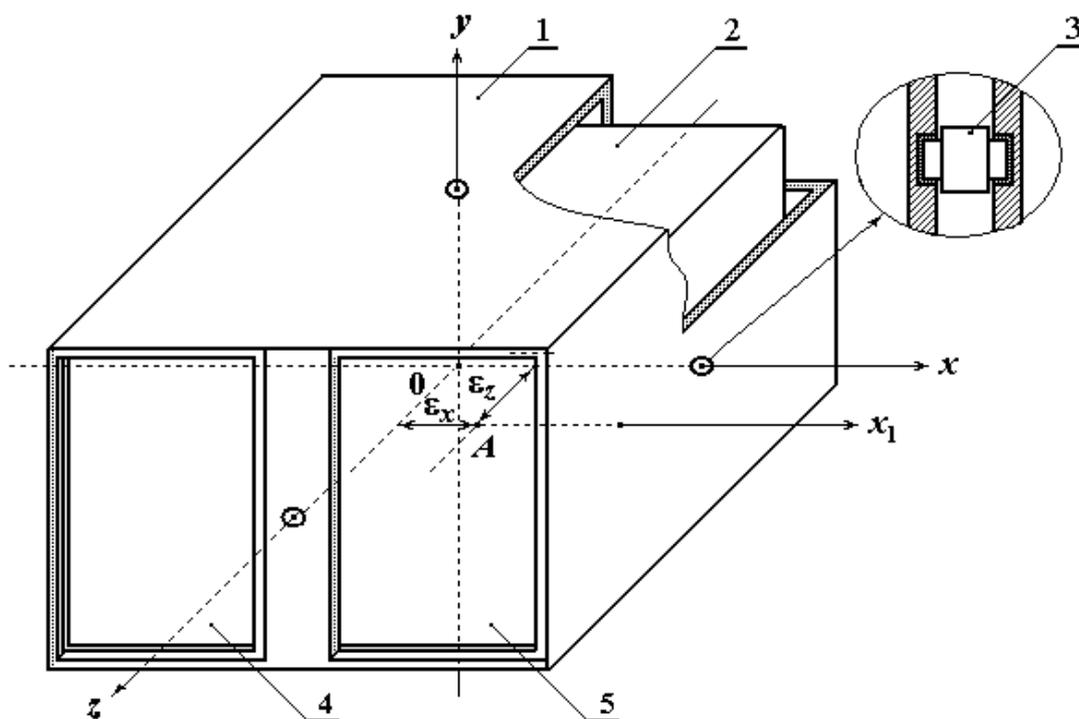


Рис. 1. Кинематическая схема приборного блока:

1 – корпус; 2 – платформа с приборами; 3 – амортизатор; 4 – панель индикации; 5 – панель управления

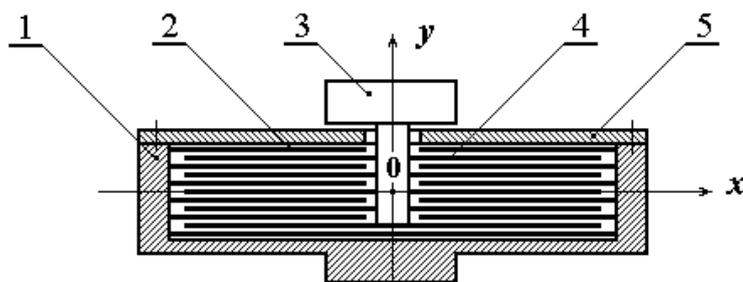


Рис. 2. Амортизатор:

1 – обойма; 2 – неподвижная пластина; 3 – шток;
4 – подвижная пластина; 5 – крышка

Безразмерный коэффициент гистерезисных потерь η в амортизаторе определяется несколькими факторами; во-первых, при упругом изгибе пружинных пластин основное значение коэффициента гистерезисных потерь определяется свойствами материала и приводится в справочной литературе по конструированию; во-вторых, добавочная часть к коэффициенту гистерезисных потерь зависит от характеристик конструкции, например, для конструкций с трением - эта добавка определяется коэффициентом трения.

При боковом воздействии вибрационных и ударных нагрузок (по осям x и z) заявляемый амортизатор также защищает приборные блоки за счет трения между пластинами.

Рассмотрим наиболее сложное движение. Так, при действии возмущения по оси y имеем три степени свободы: линейную вдоль оси y и угловые: α - вращение относительно оси x и β - вращение относительно оси z . Соответственно положение подвижного узла определяется тремя координатами y , α и β .

Запишем уравнение Лагранжа второго рода в следующем виде:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{y}} - \frac{\partial T}{\partial y} = Q_y, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\alpha}} - \frac{\partial T}{\partial \alpha} = Q_\alpha, \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\beta}} - \frac{\partial T}{\partial \beta} = Q_\beta, \quad (1)$$

где T – кинетическая энергия подвижной платформы.

Кинетическая энергия подвижного узла соответственно определяется

$$T = \frac{1}{2} m v^2 + \frac{1}{2} J_x \dot{\alpha}^2 + \frac{1}{2} J_z \dot{\beta}^2, \quad (2)$$

где m – масса подвижной платформы совместно с виброизолируемыми приборами; J_x – момент инерции подвижного узла относительно оси x ; J_z – момент инерции подвижного узла относительно оси z ; $v = \dot{y}$ – линейная скорость относительно оси y ; $\dot{\alpha}$ и $\dot{\beta}$ – угловые скорости относительно осей x и z .

Обобщенные силы (моменты) Q_y , Q_α и Q_β представляют собой внешние силы возмущения и сопротивления. Моменты образуются парами сил при переносе внешних сил из произвольной точки O_1 в точку O начала координат центральных осей.

Пусть воздействия на приборный блок передаются от корпуса в виде виброперемещений y_0 и виброускорений \dot{y}_0 , имеющих произвольный закон. Силы сопротивления в данном случае определяются упругостью амортизаторов и диссипативной гистерезисной потерей на них энергии от линейного и углового движений. Записать обобщенные силы можно так:

$$\left. \begin{aligned} Q_y &= -k_{gy} \dot{y}_0 - k_y y_0, \\ Q_\alpha &= -k_{g\alpha} \dot{\alpha}_0 - k_\alpha \alpha_0, \\ Q_\beta &= -k_{g\beta} \dot{\beta}_0 - k_\beta \beta_0, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $k_{gy} = G\eta/\dot{y}$, $k_{g\alpha} = k_{gy} \varepsilon_z^2$, $k_{g\beta} = k_{gy} \varepsilon_x^2$ - осевой и угловые гистерезисные коэффициенты амортизаторов; η - коэффициент гистерезисных потерь; k_y , k_α , k_β - осевая и угловые жесткости амортизаторов; y_0, α_0, β_0 - линейное и угловые перемещения основания, воздействующие на платформу через амортизаторы.

В общем случае осевой и угловой гистерезисные коэффициенты амортизаторов являются комплексными величинами. Здесь будем иметь дело только с их действительной частью, предполагая пренебрежимо малыми мнимые составляющие [2]. В реальных конструкциях кинетическая энергия и все ее составляющие являются действительными.

Подставляя выражения (2) и (3) в исходное уравнение (1), получим

$$\left. \begin{aligned} m\ddot{y} + m\varepsilon\ddot{\alpha} + k_{gy}\dot{y} + k_y y &= -k_{gy}\dot{y}_0 - k_y y_0, \\ (J_x + m\varepsilon_z^2)\ddot{\alpha} + k_{g\alpha}\dot{\alpha} + k_\alpha \alpha &= -k_{g\alpha}\dot{\alpha}_0 - k_\alpha \alpha_0, \\ (J_z + m\varepsilon_x^2)\ddot{\beta} + k_{g\beta}\dot{\beta} + k_\beta \beta &= -k_{g\beta}\dot{\beta}_0 - k_\beta \beta_0. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Уравнения (4) можно записать в операторной форме

$$\left. \begin{aligned} (ms^2 + k_{gy}s + k_g)y &= -(k_{gys} + k_y)y_0, \\ \left[(J_x + m\varepsilon_z^2)s^2 + k_{g\alpha}s + k_\alpha \right] \alpha &= -(k_{g\alpha}s + k_\alpha)\alpha_0, \\ \left[(J_z + m\varepsilon_x^2)s^2 + k_{g\beta}s + k_\beta \right] \beta &= -(k_{g\beta}s + k_\beta)\beta_0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

где s - оператор Лапласа; J_x и J_z - моменты инерции платформы относительно центральных осей координат; $(J_x + m\varepsilon_z^2)$ и $(J_z + m\varepsilon_x^2)$ - моменты инерции платформы относительно смещенных осей координат.

Левые части уравнений (5) не зависят от внешних возмущений и определяют свойства системы однородных уравнений. Определим передаточную функцию платформы по линейному перемещению относительно центральных осей координат:

$$W_y(s) = - \frac{(k_{gys} + k_y)(J_z s^2 + k_{g\alpha}s + k_\alpha)(J_x s^2 + k_{g\beta}s + k_\beta)}{(ms^2 + k_{gy}s + k_y) \left[(J_z + m\varepsilon_x^2)s^2 + k_{g\alpha}s + k_\alpha \right] \left[(J_x + m\varepsilon_z^2)s^2 + k_{g\beta}s + k_\beta \right]}. \quad (6)$$

В частном случае при $\varepsilon = 0$ передаточная функция (6) переходит в передаточную функцию для системы с одной степенью свободы.

Установленная математическая модель системы виброзащиты позволяет теоретически определить статическую и все динамические характеристики: АЧХ, ФЧХ, вектор частот сопряжения и переходный процесс.

Выводы

1. Установлена математическая модель системы виброзащиты, позволяющая теоретически определить статическую и все динамические характеристики: АЧХ, ФЧХ, вектор частот сопряжения и переходный процесс.

2. Разработана компьютерная программа, позволяющая теоретически определить статическую и все динамические характеристики: АЧХ, ФЧХ, вектор частот сопряжения и переходный процесс.

3. Разработана компьютерная программа, позволяющая задавать любые законы вибровозмущений в соответствии с техническим заданием.

4. Разработана компьютерная программа, позволяющая изучать влияние ударов на платформу.

Библиографический список

1. **Бабаков, И.М.** Теория колебаний / И.М. Бабаков. – М.: Наука, 1968. – 560 с.
2. **Ильинский, В.С.** Защита РЭА и прецизионного оборудования от динамических воздействий / В.С. Ильинский. – М.: Радио и связь, 1982. – 206 с.
3. **Нашиф, А.** Демпфирование колебаний / А. Нашиф, Д. Джоунс, Д. Хендерсон. – М.: Мир, 1988. – 448 с.
4. **Александровская, Л.Н.** Теоретические основы испытаний и экспериментальная отработка сложных технических систем / Л.Н. Александровская. – М.: Лотос, 2003. – 736 с.
5. **Тимошенко, С.П.** Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.
6. **Коновалов, С.Ф.** Теория виброустойчивости акселерометров / С.Ф. Коновалов. – М.: Машиностроение, 1991. – 270 с.
7. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 504 с.
8. **Харрис, С.М.** Справочник по ударным нагрузкам / С.М. Харрис, Ч.И. Крид. – Л.: Судостроение, 1980. – 360 с.
9. **Самсаев, Ю.А.** Вибрации приборов с опорами качения / Ю.А. Самсаев. – М.: Машиностроение, 1984. – 126 с.

Приложение

Программа для моделирования и расчета контура системы виброзащиты
с тремя степенями свободы

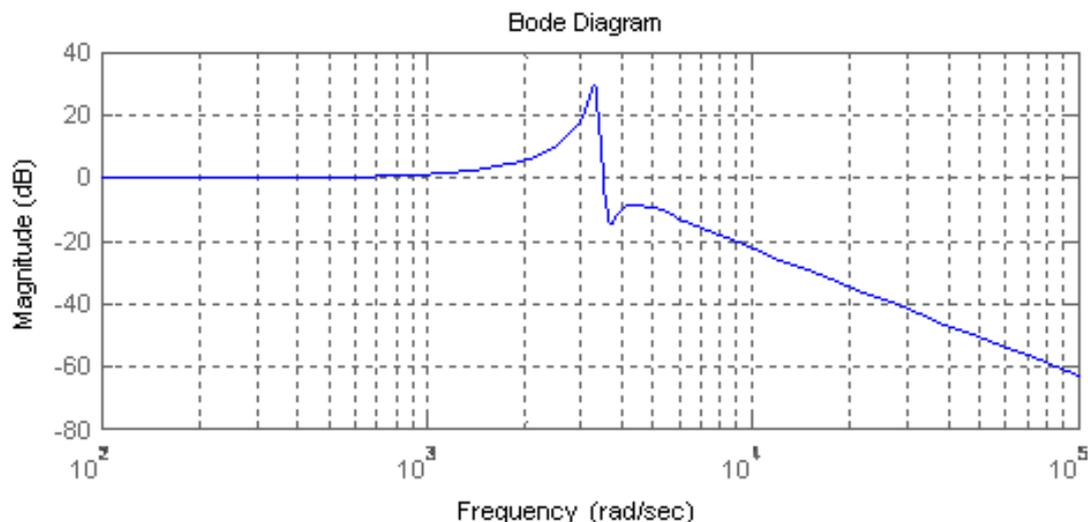
```

clc
i=1;
%for epsz=1e-3:1e-3:9e-3
    epsz=0e-3;
    epsx=25e-3;
%weight of a rolling node
m=0.75;
%sizes of the platform
a=80e-3;
b=80e-3;
c=35e-3;
l=60e-3
%moments to inertias
Jx=m*((c^2)/12+(a^2)/3)
Jax=Jx+m*epsz^2
Jz=m*((c^2)/12+(b^2)/3)
Jaz=Jz+m*epsx^2
R=7.5e-3;
r=3.5e-3;
Ea=5e6;
%displaced center of gravity
n=4;
S=pi*(R^2-r^2)*n;
L=15e-3;
%axial acerbity
ky=Ea*S/L;

%angular acerbity
kalfa=Ea*S*((1/4+epsz)^2)/L;
kbeta=Ea*S*((1/4+epsx)^2)/L;
%own frequencies
w=sqrt(ky/m)
w0= sqrt(kalfa/Jx)
%factor of the losses
eta=sqrt((-ky-m*w0^2)^2)/(m^2*w0^4-ky^2)
Q=1/eta
%number shock absorber
kgy=ky*eta/w
kgbetta=(ky*eta*(epsz)^2)/w0
kgalfa=(ky*eta*(epsx)^2)/w0
%The closed transfer function
Wy=tf([kgy ky],[m kgy ky])
Wa=tf([Jx kgalfa kalfa],
[Jax kgalfa kalfa])
Wb=tf([Jz kgbetta kbeta],
[Jaz kgbetta kbeta])
W=Wy*Wa*Wb
%K=dcgain(Wo)
K=dcgain(W)
%vector of the frequencies
damp(W/K)
figure(1)
%subplot(3,3,i)
bode(W/K),grid

```

Работа программы поясняется диаграммой Бode. Два горба на диаграмме означают, что центр тяжести защищаемого блока смещен (см. в данных программы)



Частоты сопряжения: Freq. (rad/s)	
3.25e+003	3.29e+003
3.25e+003	3.29e+003
3.29e+003	3.29e+003

*Дата поступления
в редакцию 08.02.2011*

V.D. Vavilov

**PROTECTION MICROSEISMS INSTRUMENT REMEDIES
FOR VIBRATORY AND STRIKING LOAD**

Question vibration microseisms of the instrument facilities is considered In article on example three-dementional-go block, installed on shock absorber housed. Mathematical system model вибро-protection is Received in the manner of transmission function of the sixth order and her(its) realization in the manner of computer program.

Key words: microseism, vibration, shock absorbers, point of the resonance, decline АСНН.

УДК 534.2:533;УДК 531.768.082.14

А.В. Ермолаев

**ИССЛЕДОВАНИЕ АКУСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК
МИКРОСИСТЕМНЫХ ПРИБОРНЫХ СРЕДСТВ
ПРИ ВИБРАЦИОННОЙ И УДАРНОЙ НАГРУЗКЕ В БЕЗЭХОВОЙ КАМЕРЕ**

ООО «Оптолинк», Арзамасское отделение

Рассмотрена возможность использования безэховой камеры для исследования акустических характеристик микросистемных приборных средств при вибрационной и ударной нагрузке. Использование в безэховой камере мембранного резонансного звукопоглотителя позволяет снизить ее габариты до уровня миникамеры. Показан результат применения двух мембранных резонансных звукопоглотителей в объеме $1,5\text{ м}^3$ для получения нижней граничной частоты 100,0 Гц.

Ключевые слова: безэховая камера, граничная частота, мембрана, резонансный звукопоглотитель, заглушенный объем

Для измерения акустических характеристик применяются акустические заглушенные камеры. По нормативным документам: ОСТ4.475.008-79 «Камеры звукомерные заглушенные для излучателей звука», ГОСТ23941-79, ГОСТ12.1.026-80, ГОСТ12.1.024-81, «Рекомендации по расчёту и проектированию акустических камер для измерения шумовых характеристик источников шума» акустические заглушенные камеры подразделяются на пять классов от четырех до нулевого. Один из основных параметров заглушенной камеры - нижняя граничная частота, частота, выше которой нормируется ошибка измерения звукового давления, изменяется в зависимости от класса камеры от 31,5 Гц для нулевого класса до 100 Гц для четвертого класса. Камеры с нижней граничной частотой ниже 31,5 Гц требуют больших капиталовложений как на этапе проектирования, так и на этапах строительства и аттестации.

Фирмы идут на затраты. Все автомобильные фирмы имеют акустические камеры для исследования акустических характеристик автомобилей и их узлов в большинстве режимов работы. Авиационными фирмами исследуются акустические характеристики работающих двигателей. База ВВС США «Эдвардс» имеет безэховую камеру заглушенными размерами 76,0 x 80 x 21 м, что позволяет проводить исследования акустических характеристик самолетов с работающими двигателями. Оказались также востребованными акустические камеры с нижней граничной частотой 100 Гц и выше. Фирмами миникамеры с нижней граничной частотой 250–350 Гц поставляются как метрологическое оборудование. Фирмой США Eckel предлагается портативная безэховая камера с нижней граничной частотой 250 Гц внешними размерами 2337x2337x2413 мм и внутренними размерами 1499x1499x1499мм, которая по инструкции собирается из трех секций на полу лаборатории.

В Арзамасском ОКБ «Импульс» в 1980 году была построена акустическая заглушенная камера. Предполагалось, прежде всего, по отведенному объёму под строительство и используемым материалам (толщина звукопоглощающего слоя 0,65 м и толщина стены, разделяющая акустическую камеру и аппаратную, 0,18 м), что строящаяся камера, хотя бы по некоторым параметрам, будет удовлетворять звукомерной заглушенной камере четвертого класса:

- нижняя граничная частота 100,0 Гц;
- расстояние от излучателя звука до измерительного микрофона 0,5 м.

Камеру предполагалось использовать для предварительной проверки и исследования акустических характеристик разрабатываемых приборов с излучателями звука: магнитофонов, радиоприёмников, магнитол. А так как аттестацию акустической камеры проводить не

планировалось, то строительство её велось по проекту, не согласованному с организациями, ответственными за его утверждение и согласование, и изменения в проект акустической камеры, способные, по мнению авторов, ускорить строительство и улучшить параметры камеры проводились без оглядки на вышестоящие организации.

- стена камеры, разделяющая её с аппаратной, была выполнена из двойной строительной гипсоплиты толщиной 0,18 м, вместо требуемой кирпичной стены толщиной 0,51 м;
- дверь камеры, а это участок стены, который должен выкатываться наружу, в аппаратную, открывалась внутрь камеры;
- электромагнитный экран, обязательный для всех акустических камер, так как необходим при проверке излучателей звука, содержащих радиоприемник, изготавливающийся обычно из стального листа толщиной 3 мм, был изготовлен из двойной металлической сетки с ячейкой от 0,05 мм до 0,5 мм, с расстоянием между сетками 150 мм и заполненным стекловатой марки 150.

А когда камеру проверил и аттестовал ВНИИРПА им. А.С. Попова, то оказалось, что на третьем этаже здания получена акустическая заглушенная звукомерная камера второго класса со следующими основными параметрами:

- размеры после нанесения заглушающего слоя 4,14 x 2,58 x 2,4м;
- нижняя граничная частота 63 Гц;
- расстояние от излучателя звука до измерительного микрофона 1,0 м;
- общий уровень акустических помех 52 дБ.

Мелкоячеистая металлическая сетка, выполняющая функцию электромагнитного экрана и прижимающая 150 мм слой стекловаты к ограничивающим поверхностям камеры, оказалась в совокупности с ним резонансным, звукопоглотителем эффективным в диапазоне частот 50,0–100,0 Гц [1].

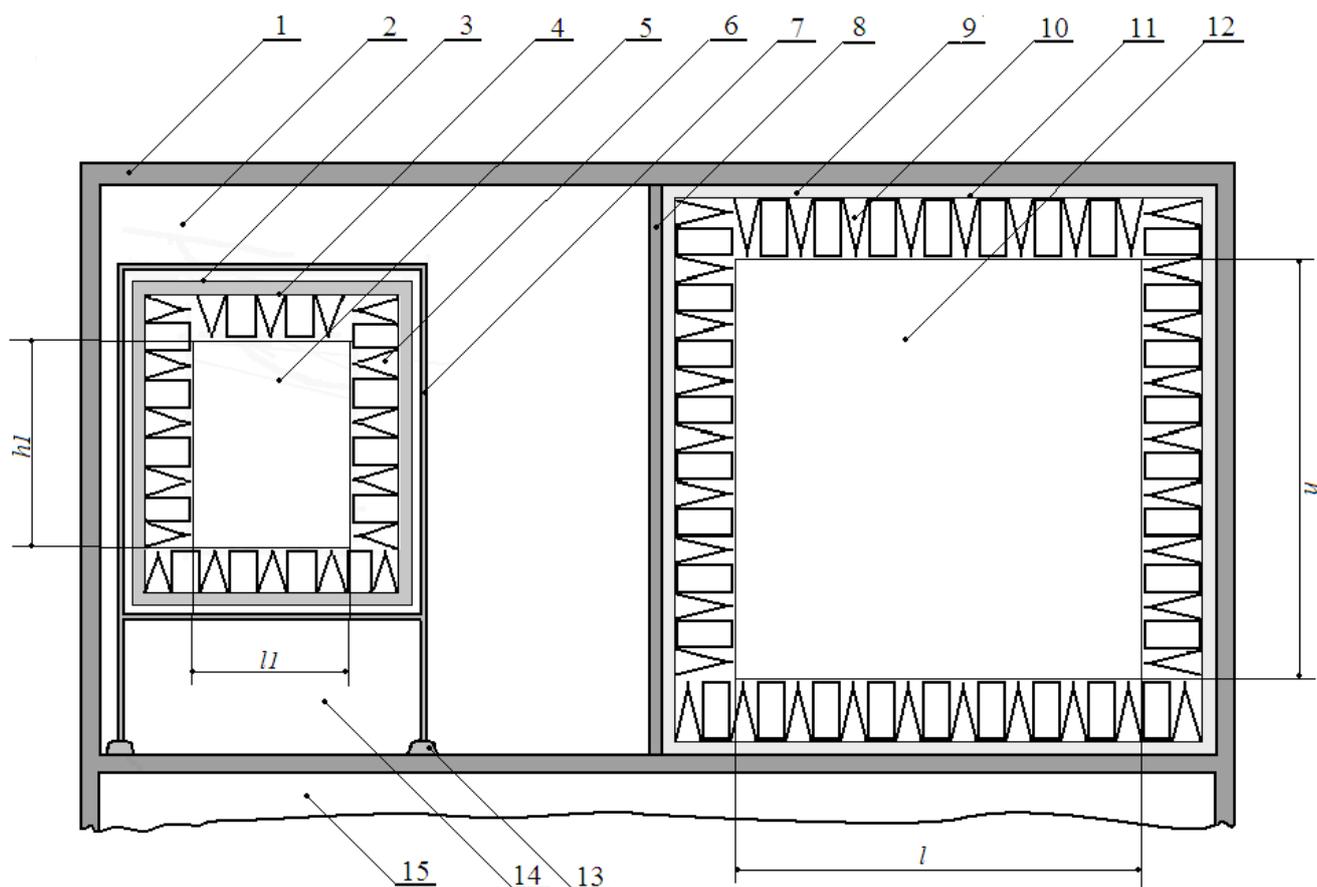
Акустическая заглушенная звукомерная с площадью звукопоглощающих поверхностей – 110 кв. м должна иметь нижнюю граничную частоту 100 Гц, аттестована с нижней граничной частотой 63 Гц (по паспорту допускает проводить большинство измерений до 50 Гц), для которой по нормирующим документам выделяется площадь звукопоглощающих поверхностей в 280 кв. м. Результат достигнут прежде всего за счет использования сеток как электромагнитного экрана, так и в качестве мембранных резонансных звукопоглотителей.

Полученный результат использован автором в качестве прототипа при оформлении патента на группу изобретений [2], в которых используются одновременно два типа резонансных звукопоглотителей: объемный резонатор Гельмгольца и мембранный резонатор Бекеша и их сочетание, минимальная длина звукопоглощающих клиньев 500 мм – одинаковая для всех классов камер. Авторы изобретения [3], взявшие за прототип [2] вариант с двумя мембранными звукопоглотителями из двух параллельных сеток в заглушенном объеме 1,5 м³ камеры для исследования акустических характеристик газовых струй, получили нижнюю граничную частоту 100 Гц. Фирмы производители предлагают аналогичное оборудование с нижней граничной частотой 250–450 Гц.

Собственные резонансные частоты помещения прямоугольной формы рассчитывают по формуле

$$f_n = \frac{c_0}{2} \sqrt{\frac{n^2}{l^2} + \frac{m^2}{h^2} + \frac{q^2}{d^2}},$$

где c_0 – скорость звука в воздухе; m, n, q – целые числа 0, 1, 2, ...; l, h, d – размеры камеры после нанесения на ее внутренние поверхности звукопоглощающего слоя. При $n=m=q=1$ – первая резонансная частота, ниже которой в помещении только стоячие волны. Нижняя граничная частота $f_{гр}$ безэховой камеры, выше которой в камере существует безэховое, свободное звуковое поле (в литературе ее часто называют частотой среза): $f_{гр} \approx f_{n1}$.



**Рис. 1. Акустические безэховые камеры
(миникамера и стационарная на 3 этаже здания):**

1 - ограждающие конструкции (пол, потолок, стены); 2 - аппаратная, помещение в котором размещается вторичная аппаратура и обслуживающий персонал и миникамера; 3 - вторая мембрана резонансного звукопоглотителя; 4 - первая мембрана резонансного звукопоглотителя; 5 - заглушенный объем миникамеры; 6 - слой из звукопоглощающих клиньев, покрывающий внутренние поверхности миникамеры; 7 - ограждающие конструкции миникамеры; 8 - стена, разделяющая аппаратную и стационарную камеру; 9 - слой стекловаты резонансного звукопоглотителя, покрывающий внутренние поверхности стационарной камеры; 10 - слой из звукопоглощающих клиньев, покрывающий внутренние поверхности стационарной камеры; 11 - мембрана резонансного звукопоглотителя стационарной камеры; 12 - заглушенный объем стационарной камеры; 13 - виброизолирующие опоры миникамеры; 14 - свободный объем под миникамерой; 15 - смежное помещение под стационарной камерой и аппаратной

Расчет толщины звукопоглощающего слоя проводят из условия равенства нулю акустического сопротивления: $z = j\rho_0 c_0 \text{ctg}kl$ гребенчатой структуры из совокупности узких каналов «труб» по формуле

$$l_T = \frac{c_0}{4f_1} = \frac{\lambda_1}{4}, \text{ задавая } f_1 = f_n,$$

где c_0 – скорость звука в воздухе; ρ_0 – плотность воздуха; $k = \frac{\omega}{c_0}$; l_T – толщина звукопогло-

щающего слоя; λ_1 – длина волны первой резонансной частоты [4].

За слоем звукопоглощающих клиньев 10 (рис. 1) через воздушный зазор на слой стекловаты 9 был нанесен слой резонансного мембранного звукопоглотителя 11, мелкоячеистой металлической сетки с ячейкой 0,071 мм. При резонансной частоте амплитуда изгибных

колебаний мембраны резко возрастает, добротность падает, потери растут. Резонансную частоту мембраны рассчитывают по формуле[5]:

$$f_{mn} = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{gS}{w} \left(\frac{m^2}{a^2} + \frac{n^2}{b^2} \right)},$$

где w – вес единицы площади мембраны, S – равномерное натяжение на единицу длины контура; a и b – длины сторон мембраны; m и n – целые числа $0, 1, 2, \dots$.

Звукопоглощающий слой минакамеры 7 из звукопоглощающих клиньев 6 первого мембранного звукопоглотителя 4, второго мембранного звукопоглотителя 3 в заглушенном объеме $1,5 \text{ м}^3$ позволил получить нижнюю граничную частоту 100 Гц. Свободный объем 14 под минакамерой 7 позволяет оперативно размещать и обслуживать оборудование для исследования акустических характеристик (вибростенд, ударный стенд, узел подачи газовой струи ...). Сравнительные характеристики камер приведены в таблице.

Таблица

Безэховая камера	размеры $l \times h \times d$, м	заглушенный объем, м^3	$f_{гр}$ без резонансного поглотителя, Гц	$f_{гр}$ с резонансным поглотителем, Гц	толщина поглощающего слоя без резонансного поглотителя, м	толщина поглощающего слоя с резонансным поглотителем, м
Стационарная	4,1x2,6x2,4	25,6	100,0	50,0	0,65	0,65
Минакамера	1,0x1,0x1,5	1,5	270,0	100	0,32	0,5

Выводы

Мембранные резонансные звукопоглотители в безэховых камерах позволяют снизить нижнюю граничную частоту камеры более чем вдвое без увеличения толщины звукопоглощающего слоя. Акустические камеры с нижней граничной частотой выше 100 Гц переходят из разряда сложных метрологических стендов в разряд оборудования [3], изготавливаемого в лабораторных условиях.

Применение двух мембранных звукопоглотителей в безэховой минакамере с нижней граничной частотой 250 – 350 Гц позволяет получить ее заглушенный объем $\approx 0,5 \text{ м}^3$ с размерами $\approx 0,6 \times 0,7 \times 1,0$ м. Такие камеры с небольшими габаритами оптимально подходят для испытания МЭМС.

В стационарной безэховой камере с объемом $\approx 30,0 \text{ м}^3$ применение двух резонансных звукопоглотителей позволяет получить нижнюю граничную частоту, равную или меньшую 40,0 Гц, это параметр камеры первого класса.

Библиографический список

1. Ермолаев, А.В. Акустическая заглушенная звукомерная камера с расширенным диапазоном измеряемых частот // Прогрессивные технологии в машиностроении и приборостроении «ПТ-2004»: межвуз. сб. ст. по материалам Всерос. конф. – М., 2004.
2. Пат. РФ № 2196206, Кл. E04B 1/82, 1999. А.В. Ермолаев. Камера акустическая заглушенная звукомерная (варианты).
3. Пат. РФ № 2387761, Кл. E04B 1/82, 2010. А.И. Кох, А.Н. Крючков, Р.Б. Сейфетдинов. Шахматов Е.В. Камера акустическая заглушенная.

4. **Вахитов, Я.Ш.** Теоретические основы электроакустики и электроакустическая аппаратура / Я.Ш. Вахитов. – М.: Искусство, 1982. – 415 с.
5. **Тимошенко, С.П.** Колебания в инженерном деле / С.П. Тимошенко. – М.: Наука, 1967. – 444 с.

*Дата поступления
в редакцию 08.02.2011*

A.V.Ermolaev

RESEARCH OF ACOUSTICS CHARACTERISTIC MICROSEISMS INSTRUMENT MEANS FOR VIBRATORY AND STRIKING LOAD IN ANECHOIC CHAMBER

The possibility of using an anechoic chamber for researching acoustic microsystem instrument means characteristics in vibration and striking load is discussed. Using the membrane resonance sound absorber in anechoic chamber allows to low its sizes up to the size of minimum chamber level. The result of using two membrane resonance sound absorbers (volume $1,5 \text{ m}^3$) for receiving the low boardering frequency of 100 Hz is demonstrated.

Key words: anechoic chamber, microchamber, the boundary frequency, membrane, resonant sound absorbers, the muffled volume in chamber.

УДК 539.67

В.И. Обухов

**ПРОЕКТНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ДАТЧИКА МОМЕНТА
В МИКРОМЕХАНИЧЕСКИХ АКСЕЛЕРОМЕТРАХ**

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

Рассмотрены теоретические аспекты возможности использования электромагнитного датчика момента для микросистемных измерительных устройств, в частности для микромеханического акселерометра. Использование таких датчиков позволит существенно снизить массогабаритные характеристики измерительных устройств. На основе выполненного анализа определены допустимые плотности токов в тонкопленочных проводниках электромагнитного преобразователя.

Ключевые слова: микромеханический акселерометр, электромагнитный датчик, плотность тока, полупроводниковый кремний, чувствительный элемент, упругий подвес, тонкие пленки.

Особенностью современного приборостроения стало создание измерительных устройств (ИУ), обладающих малыми массогабаритными характеристиками и небольшим энергопотреблением. Главным импульсом в этом направлении послужили тенденции, которые нашли свое отражение в приборостроении в 60-х годах XX столетия, когда в качестве основного конструкционного материала в приборостроении стал использоваться полупроводниковый кремний, а технология микроэлектроники стала базовой для производства ИУ. Единство материала и технологии микроэлектроники позволили на одном кристалле реализовывать микромеханическую и микроэлектронную составляющие ИУ. Технология микроэлектроники, в том числе тонкопленочная, позволила создавать элементы и узлы ИУ по планарной технологии. В настоящее время промышленностью освоен широкий спектр датчиков и приборов на основе микроэлектронной технологии: датчики давления, температуры, гироскопические приборы, акселерометры и т.д. Такие датчики и приборы принято называть микромеханическими [3].

Современные микромеханические акселерометры в качестве датчиков перемещения используют емкостные преобразователи, преобразователи на полевом эффекте, магниторезистивные, оптоэлектронные и т.д. Для компенсационных вариантов микромеханических акселерометров в качестве обратных силовых преобразователей (датчиков моментов) используются: электростатические, диамагнитные, магнитоэлектрические, электромагнитные и т.д. [1]. В частности, широкое применение магнитоэлектрических преобразователей обусловлено достаточно линейной его характеристикой и большой величиной развиваемого усилия. Однако в микроэлектронном исполнении такие датчики имеют все еще большие размеры и массу, в какой-то мере теряют свои преимущества.

В предлагаемой статье рассматривается вопрос использования электромагнитного преобразователя в качестве датчика момента для компенсационных микромеханических акселерометров, микрогироскопов, который значительно проще в изготовлении и имеет меньшие габариты и массу. При этом важно обосновать его надежность и силовые характеристики. Принцип работы такого преобразователя основан на том, что при протекании постоянного тока через параллельно расположенные проводники между ними возникает магнитная сила взаимодействия. Каждый из проводников находится в магнитном поле другого, и если направление токов в проводниках совпадает, то проводники притягиваются, и наоборот. Чем ближе друг к другу расположены проводники, тем больше эта сила. Сила притяжения или отталкивания между параллельно расположенными проводниками может быть определена по формуле

$$F = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 l}{\pi h}, \quad (1)$$

где μ_0 - магнитная постоянная, равная $1,257 \cdot 10^{-5}$ Гн/м; μ - относительная магнитная проницаемость для среды, в которой находятся проводники; I_1, I_2 - сила тока в первом и втором проводниках соответственно; l - длина проводника; h - расстояние между проводниками.

Рассмотрим вариант микромеханического акселерометра, состоящего из чувствительного элемента (рис. 1) и содержащего подвижную чувствительную массу 2 в виде несимметричного маятника, закрепленного на упругих подвесах 5.

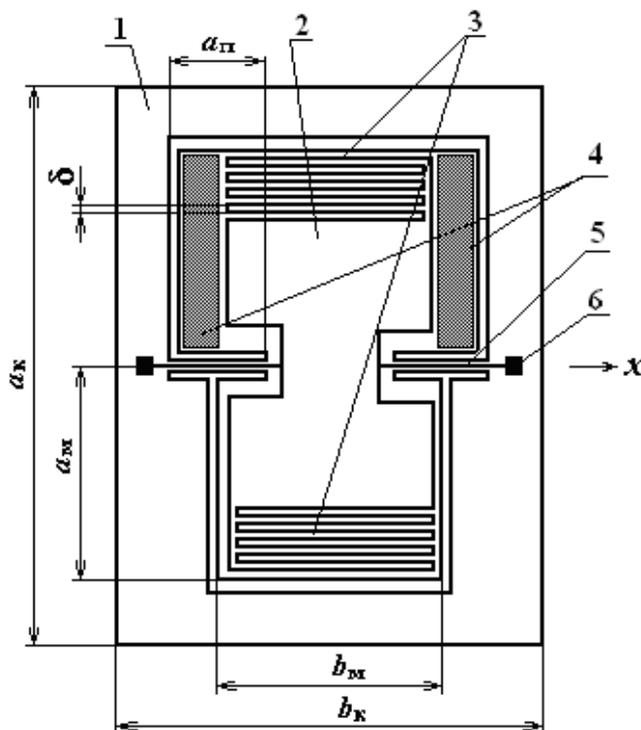


Рис. 1. Чувствительный элемент микромеханического акселерометра:

1 – жесткая рамка; 2 – подвижная чувствительная масса; 3 – тонкопленочные проводники электромагнитного преобразователя; 4 – обкладки датчика перемещения; 5 – упругий подвес; 6 – контактные площадки для подвода тока

Электромагнитный преобразователь выполнен в виде меандра тонкопленочных проводников 3, расположенных на подвижном маятнике 2. Витки тонкопленочных подвижных проводников могут быть запитаны опорным напряжением. Неподвижные тонкопленочные проводники выполнены на двух одинаковых обкладках-крышках (рис. 2), жестко соединенных с кремниевой пластиной, витки которой расположены строго против витков подвижной обмотки. На неподвижные обмотки подается ток с выхода акселерометра таким образом, чтобы по одним виткам (рис. 2, верхние) ток протекал в одном направлении, а по другим (нижние) в другом. Величина шага между витками обмотки и величина зазора между подвижными и неподвижными обмотками должны отвечать соотношению

$$h/\delta \leq 10, \quad (2)$$

где h – зазор между подвижными и неподвижными обмотками; δ – шаг между витками обмотки. Это необходимо для снижения влияния электрического поля силовых электродов на поле электродов преобразователя перемещений.

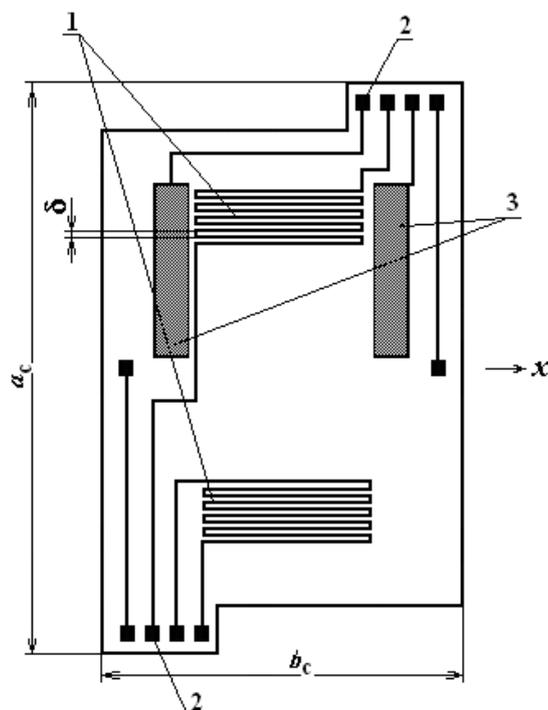


Рис. 2. Обкладка-крышка:

1 – тонкопленочные неподвижные проводники электромагнитного преобразователя;
2 – контактные площадки; 3 – неподвижные обкладки датчика угла

Число зигзагов меандра определяется из расчета создания необходимого усилия силового преобразователя. На обеих сторонах маятника проводники расположены идентично, как и на обкладках-крышках. Реализация демпфирования подвижного узла в компенсационном акселерометре с электромагнитной силовой обработкой возможна как с заполнением ЧЭ газом, например, азотом, так и в электрическом контуре для случая вакуумирования чувствительного элемента.

Работа микромеханического акселерометра осуществляется следующим образом. При отсутствии ускорения маятник 2 находится в среднем положении между неподвижными электродами 3 (см. рис. 2) емкостного датчика перемещений. На выходе акселерометра напряжение равно нулю. Поскольку неподвижные тонкопленочные проводники питаются выходным напряжением, сила электромагнитного преобразователя равна нулю, и никакого влияния на маятник 2 не оказывается.

При действии ускорения возникает сила инерции, отклоняющая маятник. Эта сила определяется произведением небаланса чувствительной массы на действующее ускорение:

$$F_{\text{ин}} = m_{\text{неб}} a, \quad (3)$$

$m_{\text{неб}}$ – масса небаланса (рис. 1, затененные участки); a – действующее ускорение.

Угол отклонения маятника пропорционален действующему ускорению. Соответственно выходной сигнал является пропорциональным углу отклонения маятника. Датчик угла и электронный блок формирует сигнал, пропорциональный углу отклонения маятника, который поступает на проводники отработки 1, расположенные на обкладке-крышке (рис. 2). Возникающая электромагнитная сила $F_{\text{эл}}$ имеет противоположное направление по сравнению с направлением силы инерции

$$F_{\text{эл}} = \frac{\mu_0 \mu I_1 I_2 n l}{\pi h}, \quad (4)$$

где I_1 – сила тока в первом проводнике (в проводнике на маятнике); I_2 – сила тока во втором проводнике (в проводнике на стеклянной обкладке); n – число волн меандра.

Сила тока в первом проводнике задается нагрузочным резистором и напряжением источника опорного напряжения, которое в основном влияет на точность задаваемого тока. Поскольку сила тока в первом проводнике является величиной постоянной, то этим обеспечивается линеаризация характеристике. Сила тока во втором проводнике задается нагрузочным резистором и выходным напряжением акселерометра.

Под действием ускорения относительно подвесов возникает инерционный момент, который определяется соотношением

$$M_{\text{ин}} = F_{\text{ин}} l_{\text{цм}} = m_{\text{нес}} a l_{\text{цм}}, \quad (5)$$

где $l_{\text{цм}}$ - плечо, или расстояние от точки подвеса маятника до центра расположения несбалансированной массы. Для уравнивания инерционного момента необходимо приложить усилие электромагнитного датчика на соответствующем плече, относительно точки подвеса маятника, то есть

$$F_{\text{эл}} l_{\text{д}} = M_{\text{ин}}, \quad (6)$$

где $l_{\text{д}}$ - плечо, на котором приложена сила электромагнитного преобразователя.

Подставим в равенство (6) значение инерционного момента (5) и значение силы электромагнитного преобразователя (4) и решим равенство относительно токов по шинам электромагнитного датчика:

$$I_1 I_2 = a \frac{\pi m_{\text{нес}} l_{\text{цм}} h}{\mu_0 \mu_{\text{н}} l_{\text{д}} l_{\text{п}}}. \quad (7)$$

Уравнение (7) позволяет определять необходимую величину токов I_1 , I_2 для принятой величины измеряемого ускорения акселерометром.

Эффективность работы электромагнитного преобразователя будет определяться величинами токов I_1 и I_2 , а их максимально допустимая величина, в свою очередь будет ограничиваться допустимыми плотностями токов по тонкопленочным проводникам (шинам). При этом важен размер плеча, на котором будет приложена сила преобразователя. Из опыта производства микромеханических акселерометров известно, что токоведущие дорожки изготавливаются шириной 50–100 мкм и толщиной 0,6–1,0 мкм. Следовательно, площадь поперечного сечения шины составляет

$$S = bt, \quad (8)$$

где b – ширина токоведущей дорожки; t – толщина.

Для принятых предельных размеров $S = 100 \cdot 1,0 = 100 \text{ мкм}^2$. Следовательно, для тока 10 мА плотность тока может оставить

$$j = \frac{I}{S} = \frac{1 \cdot 10^{-2} \text{ А}}{1 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2} = 1 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2 = 1 \cdot 10^2 \text{ А/мм}^2.$$

Для мелкозернистых алюминиевых пленок, полученных на холодных подложках полупроводникового кремния при толщине 0,7 мкм, длиной 1370 и шириной 13 мкм при плотности тока от 0,5 до $2,88 \cdot 10^4 \text{ А/мм}^2$ наработка на отказ составила до 850 ч. Обычно в пленках, полученных из Al на подложках из полупроводникового кремния, не используется ток плотностью более 100 А/мм^2 [2].

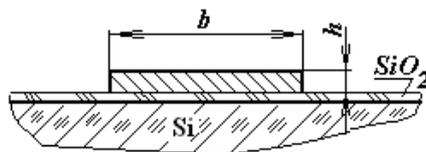


Рис. 3. Токоведущая дорожка шириной b , нанесенная на предварительно окисленную полупроводниковую пластину

Покрытие пленки кварцевым стеклом, которая наносится пиролитическим способом до толщины 0,7 мкм, чтобы снизить поверхностную диффузию, способствует повышению ее надежности более чем в три раза [2].

Напряжённость электрического поля вдоль шины

$$E = \frac{I}{\sigma} j. \quad (7)$$

Для Al: $\sigma = 3 \cdot 10^7$ 1/Ом·м. При $j = 10^8$ А/м² получаем $E = 3$ В/м. Для микромеханического акселерометра это приведет к ничтожно малому падению напряжения.

Плотность мощности на единицу поверхности шины толщиной t :

$$P_{\text{пог}} = \frac{j^2}{\sigma} \cdot t = \frac{10^{16}}{3 \cdot 10^7} \cdot 10^{-6} = 300 \text{ Вт/м}^2 = 0.3 \text{ Вт/см}^2.$$

Такой поток мощности легко отводится за счет теплопроводности кремния.

Как показывают наши расчеты по уравнению (7), с учетом ограничений по плотности тока для тонкопленочных алюминиевых проводников электромагнитные преобразователи вполне пригодны в качестве датчиков моментов в цепи обратной связи микромеханических акселерометров.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Пасынков, В.В.** Материалы электронной техники / В.В. Пасынков. – М.: Высш. шк., 1980.
3. **Распопов, В.Я.** Микромеханические приборы / В.Я. Распопов. – М.: Машиностроение, 2007. – 400 с.

Дата поступления
в редакцию 08.02.2011

V.I. Obuchov

PROCESS ENGINEERING ESTIMATE OF THE USAGE OF ELECTROMAGNETIC MOMENT DETECTOR IN MICROMECHANICAL ACCELERATION INDICATORS

The article deals with theoretical aspects of the usage of electromagnetic moment detector in micro measuring devices, particularly in a micromechanical acceleration indicator. The use of these sensors will essentially lower mass-dimensional specifications of measuring devices. Admissible current densities in thin-film conductors of electromagnetic transducer are calculated.

Key words: micromechanical acceleration indicator, electromagnetic sensor, current density, semiconductor silicon, sensing element, elastic suspension, thin-films.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 512.554.31

Н. Г. Чебочко

ДЕФОРМАЦИИ КЛАССИЧЕСКИХ АЛГЕБР ЛИ ТИПА D_1 НАД ПОЛЕМ ХАРАКТЕРИСТИКИ 2

Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского

Описание глобальных деформаций алгебр Ли представляет интерес в связи с нерешенной задачей классификации простых алгебр Ли над полями малой характеристики.

В статье исследуются глобальные деформации классических алгебр Ли типа D_l над алгебраически замкнутым полем K характеристики 2. Доказана жесткость алгебр Ли типа \bar{D}_l при нечетном $l > 3$ и построены некоторые глобальные деформации алгебр Ли типа D_l при четном $l > 4$.

Ключевые слова: модулярные алгебры Ли, когомологии, деформации.

Классическими алгебрами Ли над полем ненулевой характеристики p называют алгебры Ли, полученные редукцией по модулю p решетки Шевалле комплексной простой алгебры Ли и их факторалгебры по центру.

Пусть L - алгебра Ли над полем K , L_t - расширение поля скаляров $L \otimes K((t))$. Предположим, что билинейное отображение $f_t : L_t \times L_t \rightarrow L_t$ имеет вид

$$f_t(x, y) = [x, y] + tF_1(x, y) + t^2F_2(x, y) + \dots, \quad (1)$$

где F_i - билинейные отображения над K .

Если отображение f_t удовлетворяет условию антисимметричности и условию Якоби, то алгебры Ли L_t с умножением f_t являются семейством глобальных деформаций алгебры Ли L , а F_1 называют интегрируемым. Условия, накладываемые на f_t , означают в частности, что отображение F_1 принадлежит пространству коциклов $Z^2(L, L)$. Причем когомологичные коциклы дают изоморфные алгебры Ли. Поэтому в качестве F_1 берут представителей когомологических классов и называют вторую группу когомологий с коэффициентами в присоединенном модуле $H^2(L, L)$ пространством локальных деформаций. Если алгебра Ли не имеет нетривиальных глобальных деформаций, то она называется жесткой.

Классические алгебры Ли над полями характеристики 2 и 3 имеют глобальные деформации. Г. Браун заметил, что над полем характеристики 3 корневую систему типа C_2 могут иметь неизоморфные алгебры Ли [1]. В 1970 г. А.И. Кострикин построил параметрические семейства неизоморфных простых алгебр Ли характеристики 3, которые являются гло-

бальными деформациями алгебры Ли C_2 [6]. А.С. Джумадильдаев [2] доказал, что среди алгебр Ли серий A_n, B_n, C_n, D_n только алгебра Ли C_2 допускает нетривиальные деформации при $p=3$. А. И. Кострикин и М.И. Кузнецов в [7] полностью описали глобальные деформации алгебры Ли C_2 . Предложенный ими подход к исследованию глобальных деформаций, основанный на изучении орбит действия группы автоморфизмов алгебры на пространстве ее когомологий, используется в данной статье.

А.Н. Рудаковым [9] установлено, что над полем характеристики $p > 3$ все классические алгебры Ли являются жесткими. В работах [5] и [8] М.И. Кузнецовым и Н.Г. Чебочко предложена новая схема исследования жесткости и доказана жесткость классических алгебр Ли всех типов, кроме алгебры Ли типа C_2 при $p=3$, над полем характеристики $p > 2$. При $p=2$ некоторые деформации алгебры Ли типа G_2 были построены китайским математиком Гуанжу Шень [4]. Пространства локальных деформаций классических алгебр Ли с однородной системой корней над полем характеристики 2 найдены в [10].

Пусть R - система корней типа D_l , $\{\alpha_1, \dots, \alpha_{l-2}, \alpha_{l-1}, \alpha_l\}$ - система простых корней, здесь корни занумерованы так, что α_l связан в схеме Дынкина с α_{l-2} . Через $\langle \alpha, \beta \rangle$ будем обозначать число Картана для корней α, β . Векторы базиса Шевалле в алгебре Ли будем обозначать $H_i = H_{\alpha_i}$ и E_α , $\alpha \in R$.

В [10] получено описание пространства локальных деформаций алгебр Ли типа D_l над полем характеристики 2.

Деформации алгебры Ли типа \bar{D}_l при нечетном $l > 3$

Пусть L - алгебра Ли типа \bar{D}_l при нечетном $l > 3$. Алгебра Ли типа D_l при нечетном $l > 3$ имеет одномерный центр $H_l + H_{l-1}$, алгебра Ли типа \bar{D}_l - ее факторалгебра по центру.

Нам понадобится следующее описание \bar{D}_l в характеристике 2. Согласно [3], группа автоморфизмов алгебры Ли L типа \bar{D}_l изоморфна группе Шевалле типа B_l . Пусть V - векторное пространство над K размерности $2l$ с симплектической формой $(,)$. Группа автоморфизмов алгебры Ли L содержит группу $G = Sp(2l)$ - симплектическую группу, ассоциированную с формой $(,)$. Выберем симплектический базис $\{e_1, \dots, e_l, e_{-1}, \dots, e_{-l}\}$ в V , состоящий из собственных векторов относительно действия максимального тора T группы G . Пусть e_i имеет вес ε_i , e_{-i} имеет вес $-\varepsilon_i$, $i=1, \dots, l$. Факторалгебра внешней алгебры $\wedge^2 V$ по идеалу $I = \langle e_1 e_{-1} + \dots + e_l e_{-l} \rangle$ изоморфна алгебре Ли L (это верно только при нечетном l).

Основной комплекс когомологий раскладывается в прямую сумму весовых подкомплексов относительно естественного действия максимального тора группы Шевалле $G(L)$. Соответствующие группы когомологий являются весовыми подпространствами в группе когомологий основного комплекса. Весовые подпространства коцепей, коциклов, кограниц и когомологий будем обозначать $C_\mu^n(L, L)$, $Z_\mu^n(L, L)$, $B_\mu^n(L, L)$, $H_\mu^n(L, L)$ соответственно.

В [10] показано, что $H_0^2(L, L) = 0$, $H^2(L, L)$ является прямой суммой ненулевых пространств $H_\mu^2(L, L)$, где μ имеет вид $\gamma + \delta$, для $\gamma, \delta \in R$, таких что $\langle \gamma, \delta \rangle = 0$. Любой вес μ сопряжен относительно группы Вейля с $\alpha_l + \alpha_{l-1}$. Всего таких весов $2l$: $\{\pm(\alpha_l - \alpha_{l-1}), \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1}), \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1} + 2\alpha_{l-2}), \dots, \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1} + 2\alpha_{l-2} + \dots + 2\alpha_1)\}$ и

$\dim H^2(L, L) = 2l$. Также в [10] получено естественное описание второй группы когомологий $H^2(L, L)$ как модуля над группой $Sp(2l) \subset Aut(L)$. А именно, доказано, что для алгебры Ли типа \bar{D}_l ($l > 3$ нечетное) $H^2(L, L)$ как модуль над $Sp(2l)$ изоморфен V с точностью до морфизма Фробениуса, где V - стандартное представление $Sp(2l)$. Опишем подробно данную реализацию $H^2(L, L)$.

Построим гомоморфизм модуля V в модуль $H^2(L, L)$.

Определим сначала $\Phi : V \rightarrow C^2(L, L)$. Пусть $v \in V$, $w_1 w_2, w_3 w_4 \in \wedge^2 V / I \cong L$. Положим $\Phi(v) = \varphi$, где

$$\begin{aligned} \varphi(w_1 w_2, w_3 w_4) = & (v, w_1)(v, w_3)w_2 w_4 + (v, w_2)(v, w_3)w_1 w_4 + \\ & + (v, w_1)(v, w_4)w_2 w_3 + (v, w_2)(v, w_4)w_1 w_3 + (v, w_1)(w_3, w_4)vw_2 + \\ & + (v, w_2)(w_3, w_4)vw_1 + (v, w_3)(w_1, w_2)vw_4 + (v, w_4)(w_1, w_2)vw_3. \end{aligned} \quad (2)$$

С помощью скобки Пуассона $\{v_1 v_2, v\} = (v_1, v)v_2 + (v_2, v)v_1$, $\Phi(v)$ можно записать компактнее:

$$\Phi(v)(w_1 w_2, w_3 w_4) = \{w_1 w_2, v\} \{w_3 w_4, v\} + v \{v, (w_3, w_4)w_1 w_2 + (w_1, w_2)w_3 w_4\}. \quad (3)$$

Отображение φ корректно определено на элементах $\wedge^2 V$, линейно и кососимметрично, т.е. является элементом $C^2(L, L)$. Также Φ перестановочно с действием $Sp(2l)$:

$$\Phi(gv)(w_1 w_2, w_3 w_4) = g(\Phi(v)(g^{-1}w_1 g^{-1}w_2, g^{-1}w_3 g^{-1}w_4)) \quad (4)$$

для любого $g \in Sp(2l)$.

Используя скобку Пуассона в $\wedge^2 V$:

$$[v_1 v_2, v_3 v_4] = \{v_1 v_2, v_3 v_4\} = (v_1, v_3)v_2 v_4 + (v_1, v_4)v_2 v_3 + (v_2, v_3)v_1 v_4 + (v_2, v_4)v_1 v_3, \quad (5)$$

вычисление $d\varphi$ на произвольных элементах $w_1 w_2, w_3 w_4, w_5 w_6$ показывает, что $\varphi \in Z^2(L, L)$.

Отображение Φ индуцирует отображение V в группу когомологий $H^2(L, L)$, которое мы также будем обозначать Φ . Таким образом, $\Phi(e_{\pm 1}), \dots, \Phi(e_{\pm l})$ определяют $2l$ нетривиальных коциклов различных весов. Так как $\Phi(kv) = k^2 \Phi(v)$ для любого скаляра $k \in K$, то действие симплектической группы на $H^2(L, L)$ отличается от действия на V морфизмом Фробениуса.

Необходимым условием продолжаемости произвольного коцикла ψ до глобальной деформации является тривиальность коцикла $\psi \cup \psi$ из $Z^3(L, L)$, где

$$\psi \cup \psi(x, y, z) = \psi(\psi(x, y), z) + \psi(\psi(y, z), x) + \psi(\psi(z, x), y) \quad (6)$$

для любых x, y, z из L .

В алгебре Ли типа \bar{D}_l ($l > 3$ нечетное) нетрудно найти такой коцикл ψ , что $\psi \cup \psi \neq 0$ и $\psi \cup \psi$ имеет вес μ , для которого $C_\mu^2(L, L) = 0$. Покажем это.

Так как $l > 3$ нечетное, то в базисе $\{e_1, \dots, e_l, e_{-l}, \dots, e_{-1}\}$ есть векторы e_4, e_5, e_{-5}, e_{-4} . Рассмотрим коцикл $\psi = \Phi(e_4)$. Имеем

$$\begin{aligned} \psi \cup \psi(e_{-4} e_{-5}, e_{-4} e_5, e_3 e_{-4}) = & \psi(\psi(e_{-4} e_{-5}, e_{-4} e_5), e_3 e_{-4}) + \psi(\psi(e_{-4} e_5, e_3 e_{-4}), e_{-4} e_{-5}) + \\ & + \psi(\psi(e_3 e_{-4}, e_{-4} e_{-5}), e_{-4} e_5) = \psi(\psi(e_{-4} e_{-5}, e_{-4} e_5), e_3 e_{-4}) = \psi(e_5 e_{-5}, e_3 e_{-4}) = e_3 e_{-4}. \end{aligned} \quad (7)$$

Видим, что $\psi \cup \psi$ ненулевой коцикл из $Z_{4\varepsilon_4}^3(L, L)$. Так как пространство $C_{4\varepsilon_4}^2(L, L)$ нулевое, то $B_{4\varepsilon_4}^3(L, L) = 0$. Следовательно, $\psi \cup \psi$ не является кограницей. Таким образом, ψ неинтегрируемый коцикл.

Группа G действует транзитивно на V , поэтому никакой коцикл из $H^2(L, L)$ не продолжается до глобальной деформации и алгебры Ли типа \bar{D}_l ($l > 3$ нечетное) являются жесткими.

Деформации алгебры Ли типа D_l при четном $l > 4$

Пусть L – алгебра Ли типа D_l при четном $l > 4$. Алгебра Ли L имеет двумерный центр: $\langle H_l + H_{l-1}, H_{l-1} + H_{l-3} + \dots + H_3 + H_1 \rangle$. Пространство $H^2(L, L)$ в этом случае также является прямой суммой ненулевых пространств $H_\mu^2(L, L)$, где μ имеет вид $\gamma + \delta$ для $\gamma, \delta \in R$, таких что $\langle \gamma, \delta \rangle = 0$. Любой такой вес сопряжен относительно группы Вейля с $\alpha_l + \alpha_{l-1}$. Всего таких весов $2l$: $\{\pm(\alpha_l - \alpha_{l-1}), \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1}), \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1} + 2\alpha_{l-2}), \dots, \pm(\alpha_l + \alpha_{l-1} + 2\alpha_{l-2} + \dots + 2\alpha_1)\}$. Соответствующие весовые пространства когомологий одномерны и $\dim H^2(L, L) = 2l$.

Будем использовать изоморфизм $C^n(L, L) \cong \underbrace{L^* \wedge \dots \wedge L^*}_n \otimes L$.

Так как все веса сопряжены, то достаточно описать пространство $H_{\alpha_l + \alpha_{l-1}}^2(L, L)$.

Коцикл

$$\psi = \sum_{\gamma + \delta = \alpha_l + \alpha_{l-1}} E_{-\gamma}^* \wedge E_{-\delta}^* \otimes z, \quad (8)$$

где $z = H_{l-1} + H_{l-3} + \dots + H_3 + H_1$ порождает пространство $H_{\alpha_l + \alpha_{l-1}}^2(L, L)$.

Рассмотрим условие (6) для данного коцикла ψ :

$$\psi \cup \psi(x, y, z) = 0 \quad (9)$$

для любых x, y, z из L .

Следовательно, коцикл ψ является интегрируемым. А именно, отображение

$$f_t(x, y) = [x, y] + t\psi(x, y) \quad (10)$$

будет давать глобальную деформацию алгебры Ли L .

Так как для любого коцикла $\psi \in H^2(L, L)$ значение $\psi(x, y)$ содержится в центре алгебры Ли L для всех x, y из L и ψ принимает ненулевое значение только на нецентральных элементах алгебры, то условие (10) выполняется для всех элементов из $H^2(L, L)$. Таким образом, любой коцикл из $H^2(L, L)$ для алгебры Ли типа D_l при четном $l > 4$ является продолжаемым.

Выводы

Основные результаты работы сформулируем в следующей теореме

Теорема.

Пусть L – алгебра Ли над алгебраически замкнутым полем характеристики 2.

- (1) Если L имеет тип \bar{D}_l при нечетном $l > 3$, то L – жесткая алгебра Ли.
- (2) Если L имеет тип D_l при четном $l > 4$, то любой коцикл из $H^2(L, L)$ является интегрируемым.

Автор выражает благодарность М.И. Кузнецову за внимание к работе и полезные замечания.

Работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы “Научные и научно-педагогические кадры инновационной России”, шифр проекта НК-13П-13, контракт №П945”.

Библиографический список

1. **Brown, G.** Lie algebras of characteristic three with non degenerate Killing form / G. Brown // Trans. Amer. Math. Soc. 1969. V. 137. P. 259–268.
2. **Джумадильдаев, А.С.** К деформациям классических простых алгебр Ли / А.С. Джумадильдаев // УМН. 1976. Т. 31. N.3 (189). С. 211–212.
3. **Frohardt, D.E.** Automorphisms of modular Lie algebras / D.E. Frohardt, R.L. Griess (Jr.) // Nova J. Alg. Geom. 1992. V. 1. P. 339–345.
4. **Shen Guangyu.** Variations of the classical Lie algebra G_2 in low characteristics / Guangyu Shen // Nova J. Alg. Geom. 1993. V.2. № 3. P.217–243.
5. **Кириллов, С.А.** О деформациях алгебры Ли типа G_2 характеристики три / С.А. Кириллов, М.И. Кузнецов, Н.Г. Чебочко // Изв. вузов. Сер. Математика. 2000. №3(454). С. 33–38.
6. **Кострикин, А.И.** Параметрическое семейство простых алгебр Ли / А.И. Кострикин // Изв. АН СССР. Сер. математика. 1970. Т. 34. С. 744–756.
7. **Кострикин, А.И.** О деформациях классических алгебр Ли характеристики три / А.И. Кострикин, М.И. Кузнецов // Докл. РАН. 1995. Т. 343. N.3. С. 299–301.
8. **Кузнецов, М.И.** Деформации классических алгебр Ли / М.И. Кузнецов, Н.Г. Чебочко // Математический сборник. 2000. Т.191. N8. С. 69–88.
9. **Рудаков, А.Н.** Деформации простых алгебр Ли / А.Н. Рудаков // Изв. АН СССР. Сер. Математика. 1971. Т. 35. С. 1113–1119.
10. **Чебочко, Н.Г.** Деформации классических алгебр Ли с однородной системой корней в характеристике 2. I / Н.Г. Чебочко // Математический сборник. 2005. Т. 196. N9. С.125–156.

Дата поступления
в редакцию 25.01.2011

N.G. Chebochko

THE DEFORMATIONS OF CLASSICAL LIE ALGEBRAS OF TYPE D_l OVER THE FIELD OF CHARACTERISTIC 2

Description of global deformations of Lie algebras is very important since it is related to unsolved problem of classification of simple Lie algebras over the field of small characteristic.

In this article we study global deformations of classical Lie algebras of type D_l over the algebraically closed field K of characteristic 2. It is proved that classical Lie algebras of type D_l are rigid for odd $l > 3$. Also some global deformations of Lie algebras of type D_l for even $l > 4$ are constructed.

Key words: modular Lie algebras, cohomology, deformations.

УДК 513.015.2

М. Е. Елисеев¹, Е. М. Елисеев²**О НЕКОТОРЫХ КОЛЛИНЕАЦИЯХ КОНЕЧНЫХ ПРОЕКТИВНЫХ ПЛОСКОСТЕЙ**Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева¹,
Арзамасский государственный педагогический институт им. А. П. Гайдара²

В данной работе описывается методика нахождения некоторых коллинеаций конечных проективных плоскостей. Определяется подгруппа группы коллинеаций для новой конечной проективной плоскости порядка $9 - J$ -плоскости.

Ключевые слова: конечная проективная плоскость, коллинеация, латинский квадрат.

1. Изотопные преобразования ЛК (квазигрупп)

Известно [1], что таблица Кэли квазигруппы является латинским квадратом (ЛК) в силу того, что уравнения $a \circ x = b$ и $x \circ a = b$ решаются однозначно. Латинские квадраты называются изотопными, если $a * b = \gamma(\alpha(a) \circ \beta(b))$, где преобразование α – перестановка строк, β – перестановка столбцов, γ – переобозначение элементов, $*$ и \circ – операции в квазигруппах, соответствующих ЛК.

Каждому ЛК порядка n можно взаимно однозначно сопоставить упорядоченный набор из n подстановок, по следующему правилу:

1) находим все решения уравнений $x_i \circ y_i = a_k$;

2) элементу a_k сопоставляем подстановку $S_k = \begin{pmatrix} x_1, x_2, \dots, x_n \\ y_1, y_2, \dots, y_n \end{pmatrix}$, далее для краткости

будет использоваться запись $y_i = S_k(x_i)$.

Понятно, что по набору подстановок S_1, S_2, \dots, S_n можно восстановить ЛК: если $y_i = S_k(x_i)$, то на месте (x_i, y_i) записывается a_k (в терминах квазигрупп это следующее соответствие: $x_i \circ y_i = a_k$). Далее будем говорить, что упорядоченный набор S_1, S_2, \dots, S_n порождает ЛК и будет называться диаграммой ЛК. Понятно, что разному порядку S_i отвечают ЛК, отличающиеся переобозначением элементов – γ .

Пример 1. Латинскому квадрату соответствует набор подстановок

$x_i \setminus y_j$	1	2	3	4	5
1	1	2	3	4	5
2	4	1	2	5	3
3	5	3	1	2	4
4	3	5	4	1	2
5	2	4	5	3	1

$S_1 = (1)(2)(3)(4)(5)$, $S_2 = (12345)$, $S_3 = (13254)$, $S_4 = (14352)$,
 $S_5 = (153)(24)$. ■

Приведем несколько простых, но важных для дальнейшего изложения утверждений.

Лемма 1. Умножению подстановок S_i , порождающих ЛК A , на подстановку α^{-1} слева соответствует перестановка строк ЛК α , на подстановку β справа – перестановка столбцов β .

Доказательство. Пусть подстановка β представлена в цикловом виде

$\beta = (y_1 y_2 \dots y_k)(y_{k+1} \dots y_m) \dots$. Тогда $x_1 \circ y_1 = a_i \mapsto x_1 \cdot y_2 = a_i$, $x_2 \circ y_2 = a_i \mapsto x_2 \cdot y_3 = a_i$, ...

$x_k \circ y_k = a_i \mapsto x_k \cdot y_1 = a_i$, то есть столбцы ЛК переставляются в порядке β . Для строк доказательство аналогично. ■

Цикловым видом подстановки далее будем называть набор длин циклов ей соответствующих.

Лемма 2. Пусть подстановка S_i представлена в виде произведения циклов, тогда $\alpha S_i \alpha^{-1}$ имеет тот же цикловый вид, причем элементы из S_i переставляются в порядке α .

Доказательство этого простого утверждения можно найти, например, в [2].

2. Коллинеации проективной плоскости

Известно [3], что по полной системе попарно ортогональных латинских квадратов порядка n можно построить инцидентностную схему конечной проективной плоскости со стандартным выбором бесконечно удаленной прямой. Через каждую точку бесконечно удаленной прямой проходит пучок прямых, причем ЛК соответствуют $(n - 1)$ из этих пучков.

Напомним, что преобразование проективной плоскости, сохраняющее отношение принадлежности точки прямой, называется коллинеацией. Рассмотрим коллинеации проективной плоскости, сохраняющие бесконечно удаленную прямую и пару точек на ней, причем берутся точки, пучки прямых, проходящие через которые, не соответствуют латинским квадратам. Коллинеации этого вида индуцируются преобразованиями $a * b = \gamma(\alpha(a) \circ \alpha^{-1}(b))$, описанными выше. По лемме 2 такие преобразования сохраняют цикловые виды подстановок из диаграммы ЛК.

Последнее влечет несколько простых утверждений, позволяющих находить коллинеации указанного вида:

- 1) пучки прямых, соответствующие ЛК, могут переходить друг в друга при коллинеации, если подстановки одного ЛК имеют те же цикловые виды, что и у другого;
- 2) если один из пучков имеет набор цикловых видов подстановок, отличающийся от остальных, то он инвариантен относительно коллинеаций указанного типа;
- 3) прямые внутри пучка могут меняться местами (при сохранении пучка), если они имеют одинаковые цикловые виды.

Эти соображения позволяют легко определить указанную подгруппу в группе коллинеаций для плоскостей небольших порядков. Для больших порядков нетрудно использовать компьютерные программы.

3. Подгруппа группы коллинеаций J-плоскости

Теория, изложенная в п. 2, была использована при определении подгруппы группы коллинеаций J-плоскости. Последняя описана в [4], полная система ЛК, ей соответствующая, приведена в табл. 1. Для справок приводится также полная система ЛК для плоскости Хьюза (табл. 2)

Нетрудно заметить (см. таблица 3), что второй ЛК имеет отличный от остальных набор цикловых видов подстановок, поэтому он переходит в себя под действием коллинеаций. Кроме того, три подстановки из девяти имеют цикловый вид $(\cdot)(\cdot)(\cdot)(\cdot)(\cdot)$, поэтому соответствующие прямые либо переходят в себя, либо друг в друга, остальные шесть прямых этого пучка также переставляются.

Непосредственная проверка показывает, что так действуют только 6 подстановок, образующие группу Σ_3 со следующими представителями: $z_1=(2)(4)(6)(08)(15)(37)$, $z_2=(2)(4)(6)(17)(03)(58)$, $z_3=(2)(4)(6)(35)(78)(01)$.

Информация об этой подгруппе используется при нахождении третьей подплоскости J-плоскости и при доказательстве теоремы отличия этой плоскости от остальных известных четырех плоскостей порядка 9.

Таблица 1

Латинские квадраты J-плоскости

012345678	048731256	071856432	064572183
120453786	172684503	147560328	185306247
201534867	237146085	258407613	246085731
345678012	306257148	380742561	327814650
453786120	460825317	426371805	408163572
534867201	581073624	562138740	573421068
678012345	623508471	614283057	632750814
786120453	715462830	703615284	751248306
867201534	854310762	835024176	810637425
025187364	057623841	036418527	083264715
104728635	138275460	163047852	156832074
213870546	270368154	284651370	265713408
352061487	361480275	318526704	374105826
431602758	482517036	475230681	417058263
540216873	516704382	507382416	528640137
687435102	605841723	650174238	641327580
768354021	724036518	742803165	730581642
876543210	843152607	821765043	802476351

Таблица 2

Латинские квадраты плоскости Хьюза

012345678	012345678	012345678	012345678
201534867	120453786	678012345	867201534
120453786	201534867	345678012	453786120
678012345	345678012	120867534	534120867
867201534	453786120	786534201	120678453
786120453	534867201	453201867	678534012
345678012	678012345	201786453	786453201
534867201	786120453	867453120	345012786
453786120	867201534	534120786	201867345
012345678	012345678	012345678	012345678
786120453	345678012	534867201	453786120
534867201	678012345	786120453	867201534
867534120	201786453	453201786	786453201
345012867	534120786	678453012	201867345
120786345	867453120	201678534	345012786
453201786	120867534	867534120	534120867
201678534	453201867	120786345	678534012
678453012	786534201	345012867	120678453

Таблица 3

Подстановки соответствующие латинским квадратам J-плоскости

012345678=(0)(1)(2)(3)(4)(5)(6)(7)(8)	057623841=(0)(15368)(274)	064572183=(0)(16)(247835)
120453786=(012)(345)(678)	138275460=(01328)(476)(5)	185306247=(01874)(256)(3)
201534867=(021)(354)(687)	270368154=(02)(175846)(3)	246085731=(02673)(148)(5)
345678012=(036)(147)(258)	361480275=(03485)(162)(7)	327814650=(038)(12754)(6)
453786120=(048)(156)(237)	482517036=(04186)(2)(357)	408163572=(046531)(28)(7)
534867201=(057)(138)(246)	516704382=(054)(1)(26378)	573421068=(05176)(234)(8)
678012345=(063)(174)(285)	605841723=(067251)(38)(4)	632750814=(06845)(137)(2)
786120453=(075)(183)(264)	724036518=(071243)(56)(8)	751248306=(07)(158632)(4)
867201534=(084)(165)(273)	843152607=(087)(14523)(6)	810637425=(08572)(1)(364)

025187364=(0)(125763)(48) 104728635=(01)(24)(37)(58)(6) 213870546=(023865)(1)(47) 352061487=(03)(15)(2)(46)(78) 431602758=(04)(136752)(8) 540216873=(056832)(14)(7) 687435102=(061827)(34)(5) 768354021=(072816)(3)(45) 876543210=(08)(17)(26)(35)(4)	071856432=(0)(17382)(456) 147560328=(014635)(27)(8) 258407613=(02834)(157)(6) 380742561=(037652)(18)(4) 426371805=(047)(12685)(3) 562138740=(058)(16743)(2) 614283057=(06)(1)(248753) 703615284=(07841)(236)(5) 835024176=(08613)(254)(7)	083264715=(0)(185467)(23) 156832074=(01526)(384)(7) 265713408=(02537)(164)(8) 374105826=(031724)(5)(68) 417058263=(04583)(1)(276) 528640137=(05)(128736)(4) 641327580=(06578)(142)(3) 730581642=(07482)(135)(6) 802476351=(081)(2)(34756)
048731256=(0)(14375)(286) 172684503=(017)(2)(36548) 237146085=(027856)(13)(4) 306257148=(03261)(457)(8) 460825317=(042)(16387)(5) 581073624=(053)(18472)(6) 623508471=(064)(12358)(7) 715462830=(073468)(1)(25) 854310762=(082415)(3)(67)	036418527=(0)(134)(26587) 163047852=(016823)(4)(57) 284651370=(024518)(36)(7) 318526704=(03567)(1)(284) 475230681=(04325)(178)(6) 507382416=(05271)(3)(486) 650174238=(062)(15473)(8) 742803165=(07614)(2)(385) 821765043=(083746)(12)(5)	

Библиографический список

1. **Белоусов, В.Д.** Латинские квадраты, квазигруппы и их приложения / В.Д. Белоусов, Г.Б. Белявская. – Кишинев: Штиинца, 1989. – 250 с.
2. **Супруненко, Д.А.** Группы подстановок / Д. А. Супруненко. – Мн.: Наука и техника, 1996. – 366 с.
3. **Елисеев, Е. М.** Проективная геометрия: учеб. пособие / Е. М. Елисеев. – Арзамас: АГПИ, 2003. – 255 с.
4. **Елисеев, М. Е.** Новая проективная плоскость порядка 9 // Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании '2010: сб. науч. тр. материалов междунар. научно-практ. конф. Т. 8. Физика и математика. – Одесса: Черноморье, 2010. С. 42–45.

*Дата поступления
в редакцию 25.01.2011*

М.Е. Eliseev, Е.М. Eliseev

ON THE SOME COLLINIATIONS OF THE FINITE PROJECTIVE PLANES

In this paper method of some colliniations finding for the finite projective plane is described. The subgroup of the group colliniations for new finite projective plane of the order 9 (J-plane) is represented.

Key words: finite projective plane, colliniation, latin square.

УДК: 519.81/.83

Е.И. Верещагина

О ЕДИНСТВЕННОСТИ РЕШЕНИЯ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ АНТАГОНИСТИЧЕСКОЙ ИГРЫ С РАЗЛИЧНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ ПЛАТЁЖНОЙ МАТРИЦЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассматривается обратная задача для $m \times n$ - антагонистической игры двух игроков. Предполагается, что платёжная матрица имеет различные элементы. Также предполагается, что вероятности выигрышей известны. Вводится понятие эквивалентности решений и даётся метод вычисления числа классов эквивалентности. Разобран случай 2×3 игры.

Ключевые слова: антагонистическая игра, обратная задача, платёжная матрица, вероятности выигрышей, классы эквивалентности.

Классическая постановка построения матричной игры с заданным решением и описание множества всех $m \times n$ - игр с заданными множествами оптимальных стратегий игроков была дана Х. Боненблостом, С. Карлином и Л. Шепли [1]. Соответствующие рассуждения в более наглядной форме, принадлежащей Д. Гейлу и С. Шерману, проведены у Н.Н. Воробьёва [2]. В данной работе автором рассматривается обратная задача для антагонистической игры при неоптимальном поведении игроков. Сформулируем её: из достаточно длинной серии игр сторонний наблюдатель имеет возможность узнать частоту (вероятность) появления определённого выигрыша. Требуется по этой информации восстановить платёжную матрицу.

Предполагается, что игроки применяют смешанные стратегии, и все чистые стратегии используются с положительными вероятностями. Будем предполагать, что все выигрыши различны. В этом случае статистика позволяет найти вероятность каждого из них. Значение выигрышей, поскольку вопросы оптимальности игры здесь не рассматриваются, в дальнейшем просто нумеруются: 1,2,3 и т.д. В частности, не вызывает недоразумения обозначения

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix}, \quad A' = \begin{pmatrix} 3 & 1 & 2 \\ 6 & 4 & 5 \end{pmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix}$$

$q_1 \quad q_2 \quad q_3 \qquad \qquad \qquad q_3 \quad q_1 \quad q_2$

для платёжных матриц 2×3 - игр, где p_i, q_j ($i = 1,2; j = 1,2,3$) вероятности выбора стратегий игроками, если последние нужно явно указать.

В этой работе не излагается известный автору алгоритм нахождения решений обратной задачи, поскольку больший интерес представляет вопрос, с какой точностью решения определяются.

Итак, мы исходим из какого-либо решения $m \times n$ игры

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ a_{m1} & a_{m2} & \cdots & a_{mn} \end{pmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \\ \cdots \\ p_m \end{matrix}$$

$q_1 \quad q_2 \quad \cdots \quad q_n$

с известной матрицей вероятностей $B = (b_{ij})$. Конечно, по матрице B вероятности выбора стратегий p_i и q_j легко определяются: $p_i = \sum_j b_{ij}$, $q_j = \sum_i b_{ij}$ ($i = \overline{1, m}$; $j = \overline{1, n}$).

Любое другое решение задачи о восстановлении платёжной матрицы $A' = (a'_{ij})$ отличается от исходного перестановкой элементов матрицы A : $a'_{i',j} = a_{ij}$ где $(i, j) \rightarrow (i', j')$ - биекция. В матрице вероятностей $B' = (b'_{ij}) = (P_i Q_j)$, конечно же, $b'_{i',j} = b_{ij} = p_i q_j$:

$$P_{i'} Q_{j'} = p_i q_j. \tag{1}$$

Данное уравнение будем называть *первым основным уравнением*.

Особо отметим некоторые решения, получаемые из исходного. Во-первых, это решения, где A' получается из A перестановкой строк и столбцов, это равносильно изменению нумераций стратегий игроков. Кроме того, в случае $n \times n$ игр, когда нам неизвестно, какого игрока считать первым, допустимо транспонирование платёжной матрицы A (замена первого игрока вторым и наоборот). Во-вторых, в A возможна перестановка равновозможных выигрышей.

Решения, получаемые из исходного таким образом, будем считать эквивалентными. Довольно обширные вычисления, проведённые автором, позволяют выдвинуть предположение, что число классов эквивалентности невелико и, «вообще говоря», равно единице.

В основе вычислений – первое основное уравнение (1), которое переходом к логарифмам вероятностей ($x_i = \ln p_i$, $y_j = \ln q_j$, $X_{i'} = \ln P_{i'}$ и $Y_{j'} = \ln Q_{j'}$) переписывается в виде

$$x_i + y_j = X_{i'} + Y_{j'}. \tag{2}$$

Это соотношение можно рассматривать как однородную систему уравнений относительно x, y, X и Y , если временно не обращать внимания на условия нормировки $\sum p_i = \sum q_j = \sum P_{i'} = \sum Q_{j'} = 1$. Их выполнения можно добиться после решения (2), вводя подходящий нормирующий множитель в экспоненты.

Уравнение (2) инвариантно относительно сдвигов x, y, X, Y на фиксированную величину, это позволяет считать

$$n \sum_i x_i + m \sum_j y_j = n \sum_{i'} X_{i'} + m \sum_{j'} Y_{j'} = 0. \tag{3}$$

Что в дальнейшем и будет предполагаться выполнимым.

Исключение из (2) величин x, y даёт предложение (*второе основное уравнение*)

$$mn(X_{i'} + Y_{j'}) = m \left(\sum_j X_{i'} + \sum_j Y_{j'} \right) + n \left(\sum_i X_{i'} + \sum_i Y_{j'} \right). \tag{4}$$

Для доказательства следует просуммировать (2) по i и j , что даёт $nx_i + \sum_j y_j = \sum_j (X_{i'} + Y_{j'})$ и $\sum_i x_i + my_j = \sum_i (X_{i'} + Y_{j'})$.

Затем выразить отсюда x_i, y_j и подставить их в (2), используя (3).

Применение (2) и (4) проиллюстрируем на примере 2×3 игры. При переходе от матрицы A к A' обязательно найдутся два элемента в строчке из A , остающиеся в строчке и в A' . Перестановкой строк и столбцов можно добиться того, чтобы эта пара элементов осталась неподвижной. Без ограничения общности можно считать, что это элементы 1 и 2.

Итак,

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix} \begin{matrix} p_1 \\ p_2 \end{matrix}, \quad A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot \end{pmatrix} \begin{matrix} P_1 \\ P_2 \end{matrix}.$$

$$q_1 \quad q_2 \quad q_3 \qquad \qquad Q_1 \quad Q_2 \quad Q_3$$

Имеется $4! = 24$ варианта расположения элементов 3, 4, 5 и 6 на месте точек в A' . Ограничимся несколькими из них.

$$1. A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}, \quad A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 3 & 6 & 5 \end{pmatrix}.$$

Первое основное уравнение даёт систему:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1 \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2 \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_1 \\ x_2 + y_1 = X_1 + Y_3 \\ x_2 + y_2 = X_2 + Y_3 \\ x_2 + y_3 = X_2 + Y_2 \end{cases}.$$

Из неё получаем $x_1 - x_2 = Y_1 - Y_3 = X_1 - X_2 + Y_2 - Y_3 = Y_1 - Y_2$,

откуда следует $Y_2 = Y_3$ и $X_1 + Y_3 = X_2 + Y_1$.

Вероятности выигрышей 3 и 4, 5 и 6 оказываются равными, следовательно A , A' эквивалентны.

$$2. A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}, \quad A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 5 \\ 3 & 6 & 4 \end{pmatrix}.$$

Первое основное уравнение:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1; \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2; \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_1; \\ x_2 + y_1 = X_2 + Y_3; \\ x_2 + y_2 = X_1 + Y_3; \\ x_2 + y_3 = X_2 + Y_2. \end{cases}$$

Учитывая выкладки из доказательства второго основного уравнения

$$\begin{cases} 3x_1 + (y_1 + y_2 + y_3) = 2X_1 + X_2 + 2Y_1 + Y_2; \\ 3x_2 + (y_1 + y_2 + y_3) = X_1 + 2X_2 + Y_2 + 2Y_3; \\ \left\{ \begin{array}{l} (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_1 = X_1 + X_2 + Y_1 + Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_2 = 2X_1 + Y_2 + Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_3 = 2X_2 + Y_1 + Y_2, \end{array} \right. \end{cases}.$$

оно запишется в виде

$$I. \begin{cases} 6(x_1 + y_1) = 6(X_1 + Y_1) = 7X_1 + 5X_2 + 7Y_1 + 2Y_2 + 3Y_3; \\ 6(x_1 + y_2) = 6(X_1 + Y_2) = 10X_1 + 2X_2 + 4Y_1 + 5Y_2 + 3Y_3; \\ 6(x_1 + y_3) = 6(X_2 + Y_1) = 4X_1 + 8X_2 + 7Y_1 + 5Y_2; \end{cases}$$

$$\text{II. } \begin{cases} 6(x_2 + y_1) = 6(X_2 + Y_3) = 5X_1 + 7X_2 + 3Y_1 + 2Y_2 + 7Y_3; \\ 6(x_2 + y_2) = 6(X_1 + Y_3) = 8X_1 + 4X_2 + 5Y_2 + 7Y_3; \\ 6(x_2 + y_3) = 6(X_2 + Y_2) = 2X_1 + 10X_2 + 3Y_1 + 5Y_2 + 4Y_3. \end{cases}$$

Добавив к нему условие (3) и отбросив уравнения, являющиеся линейной комбинацией других, получим ответ, который определяется с точностью до постоянного множителя:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = 1; \\ x_1 + y_2 = -1; \\ x_1 + y_3 = -3; \\ x_2 + y_1 = 3; \\ x_2 + y_2 = 1; \\ x_2 + y_3 = -1. \end{cases}$$

Итак, матрица вероятностей равна $B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^1 & \lambda^{-1} & \lambda^{-3} \\ \lambda^3 & \lambda^1 & \lambda^{-1} \end{pmatrix}$, где знаменатель нормирующего множителя (μ) есть сумма всех элементов матрицы.

Исходная матрица вероятностей тогда примет вид $B = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^1 & \lambda^{-1} & \lambda^3 \\ \lambda^{-1} & \lambda^{-3} & \lambda^1 \end{pmatrix}$.

Матрицы A и A' эквивалентны, так как B' получается из B перестановкой строк и столбцов, что равносильно изменению нумераций стратегий игроков.

$$3. A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}, A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}.$$

Первое основное уравнение:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1; \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2; \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_1; \\ x_2 + y_1 = X_2 + Y_2; \\ x_2 + y_2 = X_2 + Y_3; \\ x_2 + y_3 = X_1 + Y_3. \end{cases}$$

Проведём выкладки из доказательства второго основного уравнения:

$$\begin{cases} 3x_1 + (y_1 + y_2 + y_3) = 2X_1 + X_2 + 2Y_1 + Y_2; \\ 3x_2 + (y_1 + y_2 + y_3) = X_1 + 2X_2 + Y_2 + 2Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_1 = X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_2 = X_1 + X_2 + Y_2 + Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_3 = X_1 + X_2 + Y_1 + Y_3. \end{cases}$$

Вследствие чего оно запишется в виде

$$\text{I. } \begin{cases} 6(x_1 + y_1) = 6(X_1 + Y_1) = 7X_1 + 5X_2 + 7Y_1 + 5Y_2; \\ 6(x_1 + y_2) = 6(X_1 + Y_2) = 7X_1 + 5X_2 + 4Y_1 + 5Y_2 + 3Y_3; \\ 6(x_1 + y_3) = 6(X_2 + Y_1) = 7X_1 + 5X_2 + 7Y_1 + 2Y_2 + 3Y_3; \end{cases}$$

$$\text{II. } \begin{cases} 6(x_2 + y_1) = 6(X_2 + Y_2) = 5X_1 + 7X_2 + 3Y_1 + 5Y_2 + 4Y_3; \\ 6(x_2 + y_2) = 6(X_2 + Y_3) = 5X_1 + 7X_2 + 5Y_2 + 7Y_3; \\ 6(x_2 + y_3) = 6(X_1 + Y_3) = 5X_1 + 7X_2 + 3Y_1 + 2Y_2 + 7Y_3. \end{cases}$$

Добавив к нему условие (3) и отбросив уравнения, являющиеся линейной комбинацией других, получим ответ, который определяется с точностью до постоянного множителя:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = 5; \\ x_1 + y_2 = 1; \\ x_1 + y_3 = -3; \\ x_2 + y_1 = 3; \\ x_2 + y_2 = -1; \\ x_2 + y_3 = -5. \end{cases}$$

Итак, матрица вероятностей равна $B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^{-3} \\ \lambda^3 & \lambda^{-1} & \lambda^{-5} \end{pmatrix}$, где знаменатель нормирующего множителя μ есть сумма всех элементов матрицы.

$$\text{Исходная матрица вероятностей тогда примет вид } B = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^3 \\ \lambda^{-1} & \lambda^{-5} & \lambda^{-3} \end{pmatrix}.$$

Из данного примера видно, что матрицы A и A' не эквивалентны, так как перестановкой строк и столбцов в B , элементы λ и λ^{-1} , стоящие в одном из столбцов матрицы B' , невозможно свести к их соответствующему расположению в B .

При рассмотрении последующих 21 варианта расположения элементов 3,4,5 и 6 на месте точек в A' , было обнаружено ещё два случая неэквивалентности платёжных матриц. Отдельно приведём их:

$$4. A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}, A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 5 & 3 & 4 \end{pmatrix}.$$

Первое основное уравнение

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1; \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2; \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_2; \\ x_2 + y_1 = X_2 + Y_3; \\ x_2 + y_2 = X_2 + Y_1; \\ x_2 + y_3 = X_1 + Y_3. \end{cases}$$

Учитывая

$$\begin{cases} 3x_1 + (y_1 + y_2 + y_3) = 2X_1 + X_2 + Y_1 + 2Y_2; \\ 3x_2 + (y_1 + y_2 + y_3) = X_1 + 2X_2 + Y_1 + 2Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_1 = X_1 + X_2 + Y_1 + Y_3; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_2 = X_1 + X_2 + Y_1 + Y_2; \\ (x_1 + x_2 + x_3) + 2y_3 = X_1 + X_2 + Y_2 + Y_3, \end{cases}$$

получим второе основное уравнение

$$\text{I. } \begin{cases} 6(x_1 + y_1) = 6(X_1 + Y_1) = 7X_1 + 5X_2 + 5Y_1 + 4Y_2 + 3Y_3; \\ 6(x_1 + y_2) = 6(X_1 + Y_2) = 7X_1 + 5X_2 + 5Y_1 + 7Y_2; \\ 6(x_1 + y_3) = 6(X_2 + Y_2) = 7X_1 + 5X_2 + 2Y_1 + 7Y_2 + 3Y_3. \end{cases}$$

$$\text{II. } \begin{cases} 6(x_2 + y_1) = 6(X_2 + Y_3) = 5X_1 + 7X_2 + 5Y_1 + 7Y_3; \\ 6(x_2 + y_2) = 6(X_2 + Y_1) = 5X_1 + 7X_2 + 5Y_1 + 3Y_2 + 4Y_3; \\ 6(x_2 + y_3) = 6(X_1 + Y_3) = 5X_1 + 7X_2 + 2Y_1 + 3Y_2 + 7Y_3. \end{cases}$$

Запишем ответ, который определяется с точностью до постоянного множителя:

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = 1; \\ x_1 + y_2 = 5; \\ x_1 + y_3 = -3; \\ x_2 + y_1 = -1; \\ x_2 + y_2 = 3; \\ x_2 + y_3 = -5/ \end{cases}.$$

Итак, матрица вероятностей и соответствующая ей исходная матрица вероятностей примут вид $B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^1 & \lambda^5 & \lambda^{-3} \\ \lambda^{-1} & \lambda^3 & \lambda^{-5} \end{pmatrix}$ и $B = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^1 & \lambda^5 & \lambda^3 \\ \lambda^{-5} & \lambda^{-1} & \lambda^{-3} \end{pmatrix}$, где знаменатель нормирующего множителя μ есть сумма всех элементов матрицы.

Учитывая замечание к предыдущему примеру можно сделать вывод, что матрицы A и A' не эквивалентны.

$$5. A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}, A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 5 & 6 & 3 \end{pmatrix}.$$

Первое основное уравнение

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = X_1 + Y_1; \\ x_1 + y_2 = X_1 + Y_2; \\ x_1 + y_3 = X_2 + Y_3; \\ x_2 + y_1 = X_1 + Y_3; \\ x_2 + y_2 = X_2 + Y_1; \\ x_2 + y_3 = X_2 + Y_2. \end{cases}.$$

Второе основное уравнение:

$$\text{I. } \begin{cases} 6(x_1 + y_1) = 6(X_1 + Y_1) = 10X_1 + 2X_2 + 5Y_1 + 2Y_2 + 5Y_3; \\ 6(x_1 + y_2) = 6(X_1 + Y_2) = 7X_1 + 5X_2 + 5Y_1 + 5Y_2 + 2Y_3; \\ 6(x_1 + y_3) = 6(X_2 + Y_3) = 4X_1 + 8X_2 + 2Y_1 + 5Y_2 + 5Y_3; \end{cases}$$

$$\text{II. } \begin{cases} 6(x_2 + y_1) = 6(X_1 + Y_3) = 8X_1 + 4X_2 + 5Y_1 + 2Y_2 + 5Y_3; \\ 6(x_2 + y_2) = 6(X_2 + Y_1) = 5X_1 + 7X_2 + 5Y_1 + 5Y_2 + 2Y_3; \\ 6(x_2 + y_3) = 6(X_2 + Y_2) = 2X_1 + 10X_2 + 2Y_1 + 5Y_2 + 5Y_3 / \end{cases}$$

Запишем ответ с точностью до постоянного множителя

$$\begin{cases} x_1 + y_1 = 5; \\ x_1 + y_2 = 1; \\ x_1 + y_3 = -3; \\ x_2 + y_1 = 3; \\ x_2 + y_2 = -1; \\ x_2 + y_3 = -5. \end{cases}.$$

Отсюда, матрица вероятностей равна $B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^{-3} \\ \lambda^3 & \lambda^{-1} & \lambda^{-5} \end{pmatrix}$, следовательно, соответствующая ей исходная матрица вероятностей примет вид $B = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^3 \\ \lambda^{-1} & \lambda^{-5} & \lambda^{-3} \end{pmatrix}$.

Из данного примера также видно, что матрицы A и A' не эквивалентны.

Рассмотрение всех 24-х вариантов расположения элементов 3, 4, 5 и 6 на месте точек в A' в антагонистической игре 2×3 при неоптимальном поведении игроков показало, что наряду с такими преобразованиями матрицы игры как: перестановка строк, столбцов и равновозможных выигрышей были обнаружены три случая неэквивалентности платёжных матриц. Отдельно приведём их: $A' = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 2 & 6 \\ 5 & 3 & 4 \end{pmatrix}; \begin{pmatrix} 1 & 2 & 4 \\ 5 & 6 & 3 \end{pmatrix}$ и соответствующие им

матрицы вероятностей $B' = \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^{-3} \\ \lambda^3 & \lambda^{-1} & \lambda^{-5} \end{pmatrix}; \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^1 & \lambda^5 & \lambda^{-3} \\ \lambda^{-1} & \lambda^3 & \lambda^{-5} \end{pmatrix}; \frac{1}{\mu} \begin{pmatrix} \lambda^5 & \lambda^1 & \lambda^{-3} \\ \lambda^3 & \lambda^{-1} & \lambda^{-5} \end{pmatrix}$.

В заключении отметим, что автором были также проведены более ста вариантов расчётов для антагонистической 3×3 игры двух игроков, среди которых не обнаружилось случаев неэквивалентности платёжных матриц и которые позволили сделать вывод о единственном классе эквивалентности.

Библиографический список

1. Матричные игры: сб. переводов; под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 280 с.
2. **Воробьев, Н.Н.** Основы теории игр. Бескоалиционные игры / Н.Н. Воробьев. – М.: Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984. – 496 с.
3. **Петросян, Л.А.** Теория игр / Л.А. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.А. Семина. – М.: Высш. шк., 1998. – 304 с.

Дата поступления
в редакцию 25.01.2011

E.I. Vereshagina

ON THE UNICITY OF THE SOLUTION OF THE INVERSE PROBLEM FOR ANTAGONISTIC GAME WITH DIFFERENT ELEMENTS OF PAYOFF MATRIX

In this paper the inverse problem two player antagonistic $m \times n$ - game is considered. It is suggested that the payoff matrix has different elements. It is suggested too that the win probabilities are known. The definition of the solutions equivalence is given. The calculation method of the quantity equivalence classes also given. The case two player antagonistic 2×3 - game is analyzed.

Key words: antagonistic game, inverse problem, payoff matrix, win probability, equivalence classes.

**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

№ 1 (86)

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 22.03.2011. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 44,25. Уч.-изд. л. 42. 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»