

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

ИМ. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

№ 4 (91)

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. № 4 (91). – 348 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
FEDERAL STATE BUDGET EDUCATIONAL INSTITUTION
OF HIGHER PROFESSIONAL EDUCATION
NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY
n.a. R.Y. ALEXEEV

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

№4 (91)

Nizhni Novgorod 2011

Transactions of NIZHNI NOVGOROD STATE TECHNICAL UNIVERSITY n. a. R.Y. Alexeev
/ NSTU n.a. R.Y. Alexeev. - Nizhni Novgorod, 2011. № 4 (91). – 348 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. Mikhailenko,
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
Иванов А.Е., Львов А.Е., Шишков Г.И. Поляризациянные аттенюаторы.....	11
Кузикова Н.И. Расчет обобщенных матриц рассеяния антенн в сферической системе координат и их применение для анализа взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара.....	20
Зельманов С.С. Матричный резонанс формы.....	30
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	38
Диденкулов И.Н., Мартьянов А.И., Прончатов-Рубцов Н.В., Тихонов В.А. Исследование кавитации в плоском акустическом резонаторе	38
Громов Е.М., Тютин В.В. Компенсация индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов в неоднородных средах	47
Петрухин Н.С., Пелиновский Е.Н. Моделирование водного потока в рамках одномерных уравнений мелкой воды.....	60
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	70
Дмитриенко Р.М., Емельянов А.А., Золотов С.А., Климашов В.Ю., Савихин С.А., Терентьев А.Б. Проблема точности вычислений в методе вариации фазы.....	70
Никулин Е.А. Компьютерное моделирование оптических эффектов.....	77
Кангин В.В., Ямолдинов Д.Н. SCADA для распределенной системы управления на основе промышленной сети PLCNET.....	88
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	97
Дементьев В.И., Кабалдин Ю.Г. Эргономика и информация. Квантовый подход.....	97
Букин П.Э., Фролова И.Н. Создание модифицированных поверхностей как шаг к автоматическому построению станочного приспособления.....	107
Пилипосян С.Е. Угол отклонения, период колебаний и погрешность измерения центрального момента инерции физического маятника.....	113
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	119
Митенков Ф.М. К вопросу об актуальности развития малой атомной энергетики для перспективного развития России.....	119
Александрин А.Г., Лошак Д.В., Герасимов Е.А., Кошман В.П. Опыт применения в ОАО «ОКБМ Африкантова» электронно-лучевой сварки для изготовления оборудования ЯЭУ.....	124
Тесленко Е.В., Тесленко Д.С., Андреев В.В. Прогнозирование состояния соединенной типа «вал-втулка» с помощью искусственной нейронной сети.....	129

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	136
Хармати И., Ровид А., Варлаки П. Применение метода подбора линейных переменных для расчетных исследований пассивной безопасности транспортных средств	144
Огороднов С.М., Синичкин С.Г. Эффективность тормозного управления с магнитострикционным приводом.....	150
Шапкина Ю.В., Кузьмин Н.А., Шапкин В.А. Прогнозирование спроса на услуги станции технического обслуживания автомобилей.....	157
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	165
Бимбереков П.А. Проектирование оптимальных по допускаемому прогибу балки профилей	165
Бусоргин Д.А. , Грамузов Е.М. , Зуев В.А. Программно-аппаратный комплекс для проведения опытов кренования судов.....	171
Грамузов Е.М., Тихонова Н.Е. Метод учета влияния снега на сопротивление ледокола за счет приведенной толщины сплошного ледяного покрова.....	178
Панов А.Ю., Хазова Вик. И., Хазова Вер. И. Численное исследование устойчивости движения на прямом курсе высокоскоростного катамарана с подводными крыльями.....	184
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	191
Серебряков А.С., Семенов Д.А. Тестовая диагностика корпусной изоляции распределительных трансформаторов АПК.....	191
Герман Л.А., Серебряков А.С., Дулепов Д.Е. Исследование переходных процессов в двухступенчатой установке поперечной емкостной компенсации в системе электроснабжения железных дорог	198
Плехов А.С., Титов В.Г., Бинда К.А. Учет мощности искажений при энергосберегающем управлении электроприводами.....	203
Папков Б.В., Шарыгин М.В. Анализ систем взаимоотношений субъектов электроэнергетики с целью управления уровнем надежности.....	211
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	219
Юрасов В.В., Сильченко Т.Ш., Кидалов Н.А. Исследование комплексного влияния свойств изготовленного из наноразмерных кремнеземсодержащих материалов жидкостекольного связующего на технологические показатели смесей литейного производства.....	219
Зиновьев Ю.А., Колпаков А.А., Леушин И.О., Швецов В.Д., Белявский Г.И., Тимофеев А.М. Увеличение длительной прочности жаропрочных изделий термических агрегатов.....	228
Сенопальников В.М., Сивков В.Л. О связи конвекции с развитием неоднородности в слитке спокойной стали.....	233
ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ.....	244
Исаев А.В., Михаленко М.Г., Исаев В.В. Кинетические особенности катодного осаждения никеля из сульфаматного электролита никелирования.....	244
Наумов В.И. Химическая связь в переходных металлах IV–VI периодов.....	252

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	263
Корнилов Д.А. Конкурентоспособность продукции как функция соответствия потребительских характеристик товара его стоимости.....	263
Юрлов Ф.Ф., Плеханов Н.А. Оценка эффективности принимаемых решений в условиях неопределенности и многокритериальности.....	275
Чернов А.Г. Мониторинг деятельности национальных исследовательских университетов приволжского федерального округа.....	281
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	287
Багаева О.Н. «Философская вера» Карла Ясперса как источник экзистенциальной коммуникации и возможность объединения людей.....	287
Воробьев Д.В. Онтологический статус и этимология понятия ничто в философской традиции.....	296
Глухова М.Ф. Механизм социального управления инфраструктурой молодежной политики	304
МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ.....	311
Шипунов А.Н., Гаврилов А.А. Определение передаточной функции датчика угловых ускорений.....	311
Гаврилов А.А., Шипунов А.Н. Повышение точности измерения интегрального акселерометра.....	318
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	325
Галкин В.М., Ерофеева Л.Н., Толкачев И.Н. Логистическое отображение: некоторые экспериментальные данные.....	325
Щуко О.Б., Щуко С.Д. Зависимость структуры вещества транснептунового небесного тела от содержания радионуклидов.....	334
Нужин Я.Н. Порождающие мультиплеты инволюций	341

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Ivanov A.E., Lvov A.E., Shishkov G.I. Polarization attenuators.....	11
Kuzikova N.I. Calculation of the generalized scattering matrices in the spherical system of coordinates and its application for the analysis the interaction of a loop antenna and a dielectric sphere....	20
Zelmanov S.S. From matrixer resonance.....	30
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	38
Didenkulov I.N., Martyanov A.I., Pronchatov-Rubtsov N.V., Tikhonov V.A. Study a cavitation in a plane acoustic resonator.....	38
Gromov E.M., Tyutin V.V. Stimulated raman – scattering compensation for short soliton’s propagations in inhomogeneous media.....	47
Petrukhin N., Pelinovsky E. Water flow modeling in the framework of 1d shallow-water equations.....	60
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	70
Dmitrienko R.M., Emelyanov A.A., Zolotov S.A., Klimashov V.U., Savikhin S.A., Terentev A.B. The problem of the computing precision of the phase variation method.....	70
Nikulin E.A. Computer modelling of optical effects.....	77
Kangin V.V., Yamoldinov D.N. Scada for distributed control system on base of the industrial network plcnet.....	88
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	97
Dementiev V.I., Kabaldin J.G. Ergonomics and Information. Quantum approach.....	97
Bukin P.E., Frolova I.N. Creation of the modified surfaces as a step to automatic construction machine tools adaptations.....	107
Piliposian S.E. Deviation angle, vibration period and measurement error of physical pendulum central moment of inertia.....	113
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	119
Mitenkov F.M. The question of the relevance of a small nuclear power for future development of russia.....	119
Alexandrine A.G., Hanny D.V., Gerasimov E., Koshman V.P. Using an electron beam welding for making equipment nps in okbm of afrikantov.....	124
Teslenko E.V., Teslenko D.S., Andreev V.V. Condition forecasting of connection type “shaft-bushing” with a neural network.....	129
LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	136
Harmati I.A., Rovid A., Varlaki P. Application of lpv type description for vehicle safety research modeling.....	144

Ogorodnov S.M., Sinichkin S.G. The efficiency of braking sistem with magnetostrictive actuator.....	150
Shapkina J.V., Kuzmin N.A., Shapkin V.A. Forecasting of demand for services of cars service station.....	157
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY	165
Bimberekov P.A. Designing of shapes optimal in secant modulus by allowable deflection of girder.....	165
Busorgin D.A., Zuev V.A., Gramuzov E.M. Hardware and software complex for carrying out inclining experiments of vessels.....	171
Gramuzov E.M., Tihonova N.E. Method of accounting for the influence of snow on the resistance icebreaker due reduced thickness solid ice cover.....	178
Panov A.Y., Khazova Vic. I., Khazova Ver. I. Research on longitudinal movement of high-speed hydrofoil catamaran.....	184
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	191
Serebryakov A.S., Semenov D.A. Test diagnostics of frame insulation of distributing transformers in agribusiness industry.....	191
German L.A., Serebryakov A.S., Dulepov D.E. The research of initiation transients of two-stage crossover capacitive compensation facility in railway power supply system	198
Plehov A.S., Titov V.G., Binda K.A. Accounting for power distortion at power saving control of electric drives.....	203
Papkov B.V., Sharygin M.V. Review of relations of electricity market participants for control of reliability of energy supply	211
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	219
Yurasov V.V., Silchenko T.S., Kidalov N.A. The investigation of complex influence of properties of sodium silicate binder, manufactu-red from nanosised silica containing materials, on technolo-gical parameters of foundry mixtures.....	219
Zinoviev Yu.A., Kolpakov A.A., Leushin I.O., Shvetsov V.D., Beliavsky G.I., Timofeev A.M. Increasing the long-term strength of heat-treating furnaces heatproof products.....	228
Senopalnikov V.M., Sivkov V.L. Convection relation with inhomogeneity development in killed steel ingot.....	233
CHEMISTRY, CHEMICAL AND BIOTECHNOLOGIES	244
Isaev A.V., Mihalenko M.G., Isaev V.V. Kinetic features of cathodic sedimentation of nickel from sulfamate nickeliration electrolits.....	244
Naumov V.I. Chemical bond of transition metals IV-VI periods.....	252
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	263
Kornilov D.A. Competitiveness of production as function of conformity of consumer characteristics of the goods of its cost.....	263
Yurlov F.F., Plekhanov N.A. Performance evaluation of decisions in terms of uncertainty and multicriteria.....	275
Chernov A.G. Monitor the activities of national research universities of the volga federal district.....	281

SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	287
Bagaeva O.N. Philosophical belief of karl yaspers as existential communication resource and people uniting opportunity.....	287
Vorobjev D.V. Ontological status and etymology of «nothing» category within philosophical tradition.....	296
Glukhova M.F. Philosophical belief of karl yaspers as existential communication resource and people uniting opportunity.....	304
MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS.....	311
Shipunov A.N., Gavrilov A.A. Definition of transfer function of the gauge of angular accelerations.....	311
Gavrilov A.A., Shipunov A.N. Increase of accuracy of measurement integrated gage of accelerations.....	318
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL AND SOCIAL SCIENCES.....	325
Galkin V.M., Erofeeva L.N., Tolkachev I.N. Logistic mapping: some experimental data...	325
Shchuko O.B., Shchuko S.D. The dependence trans-neptune celestial body matter structure on radionuclides abundance.....	334
Nuzhin Ya.N. Generating multiples involutions.....	341

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.8

А.Е. Иванов¹, А.Е. Львов², Г.И. Шишков²

ПОЛЯРИЗАЦИОННЫЕ АТТЕНЮАТОРЫ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц»²

Описаны принцип действия, конструкции и погрешности поляризационных аттенюаторов.

Ключевые слова: поляризационные аттенюаторы, резистивные пленки, ослабление, погрешности.

Введение

Поляризационные аттенюаторы относятся к классу плавнопеременных измерительных аттенюаторов, предназначенных для получения прямоотсчетного ослабления высокочастотных сигналов в волноводных трактах.

Измерительные поляризационные аттенюаторы отличаются высокими техническими характеристиками, основными из которых являются:

- основная погрешность по разностному ослаблению составляет от $\pm 0,01$ А до $\pm 0,05$ А дБ в зависимости от класса аттенюаторов, где А – значение ослабления аттенюатора в дБ;
- величина КСВН на входе (выходе) аттенюаторов составляет не более 1,1–1,4 в зависимости от класса аттенюатора (всего классов 5).

Отсчётные шкалы поляризационных аттенюаторов градуируются в абсолютных значениях ослабления. Погрешности градуировки оговариваются в технической документации на аттенюаторы. Установка величины ослабления поляризационных аттенюаторов разных конструкций может осуществляться в ручном либо автоматическом (программируемом) режимах.

Поляризационные аттенюаторы в основном используются в качестве самостоятельных приборов как образцовые меры ослабления. Допустимая мощность на входе аттенюаторов в режиме непрерывной генерации обычно не превышает 1 Вт.

Принцип действия поляризационных аттенюаторов

Принцип действия поляризационных аттенюаторов основан на поглощении в резистивных пленках аттенюаторов тангенциальных составляющих электрической компоненты линейно-поляризованных волн, которыми можно представить основную волну H_{11} круглого волновода.

Рассмотрим круглый волновод, состоящий из состыкованных вдоль продольной оси трех секций (рис. 1). В диаметральной плоскости каждой секции размещены тонкие резистивные плёнки прямоугольной формы.

Первоначально секции расположены таким образом, что находящиеся в них пленки размещены в одной плоскости. Средняя секция (ротор) может поворачиваться вокруг про-

дольной оси. Полагаем, что в рассматриваемом устройстве каждая из резистивных плёнок имеет бесконечно большую поглощающую способность и происходит полное затухание вектора \vec{E} волны, поляризованной в плоскости плёнки. Кроме того, будем считать, что при прохождении электромагнитной волны отсутствуют отражения от торцевых краёв плёнок.

Такое устройство назовём *идеальным* поляризационным аттенуатором.

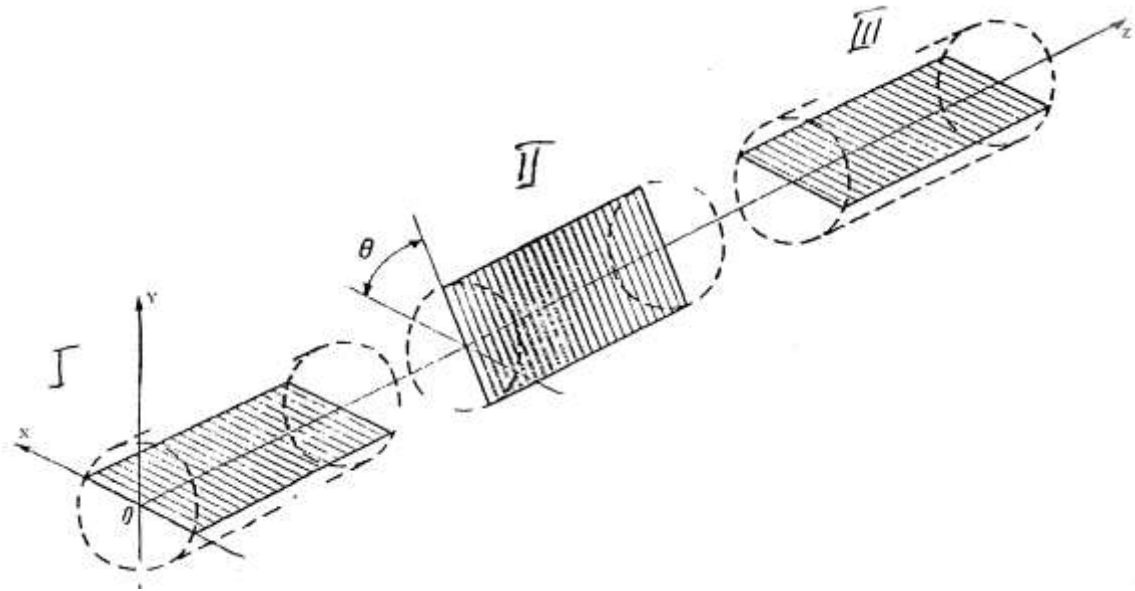


Рис. 1. Структура *идеального* поляризационного аттенуатора

Размещение в диаметральной плоскости круглого полого волновода тонкой резистивной плёнки, расположенной перпендикулярно вектору \vec{E} , существенно не изменяет структуру поля волны H_{11} .

Рассмотрим изменение величины нормальной составляющей напряжённости \vec{E} электрического поля волны H_{11} , проходящей через все три секции (рис. 2). Роль резистивных плёнок в данном случае сводится к поглощению тангенциальных составляющих вектора \vec{E} .

Если все плёнки находятся в одной плоскости, то нормальные составляющие векторов \vec{E} сохраняются при прохождении волной секций устройства.

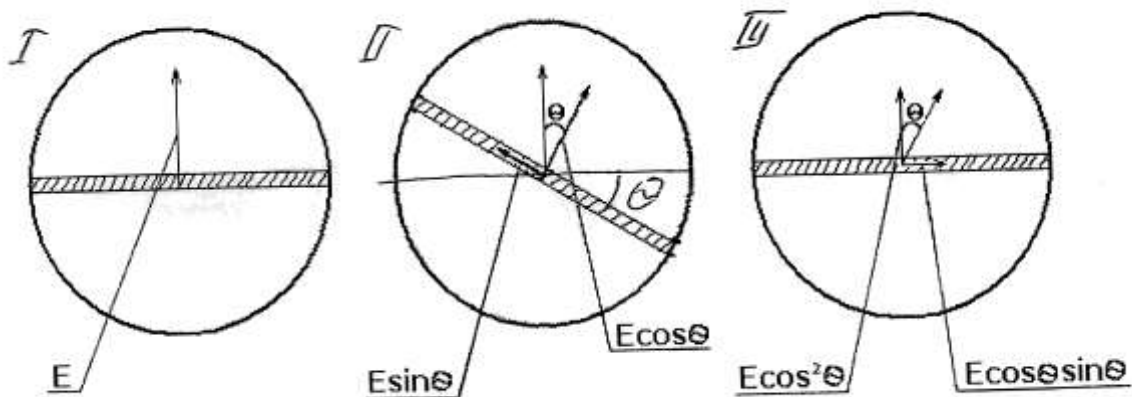


Рис. 2. Составляющие вектора \vec{E} в секциях *идеального* поляризационного аттенуатора

При повороте средней секции из начального положения на угол θ через неё пройдёт составляющая $E \cos \theta$ (в проекции на первичное *вертикальное* направление). При прохождении третьей секции на её выходе первичная составляющая поля \vec{E} будет иметь величину $E \cos^2 \theta$.

Волна на выходе рассматриваемого *идеального* поляризационного аттенюатора имеет ту же поляризацию, что и на входе в среднюю секцию, а её амплитуда пропорциональна квадрату косинуса угла поворота средней секции, т.е. $\cos^2 \theta$. Это соотношение аналогично закону Малюса при прохождении линейно-поляризованной световой волны через поляризатор.

Параметр $\cos^2 \theta$ представляет собой переменную величину ослабления аттенюатора, показывающую, что амплитуда волны, проходящей через аттенюатор, уменьшается в $\cos^2 \theta$ раз.

Ослабление, вносимое поляризационным аттенюатором в волноведущий тракт и выражаемое в дБ, записывается в виде

$$A = 20 \lg \cos^2 \theta + A_0$$

или

$$A = 40 \lg \cos \theta + A_0, \quad (1)$$

где A_0 – начальное ослабление.

Расчётная величина ослабления *идеального* поляризационного аттенюатора находится в пределах от нуля децибел при $\theta = 0^0$ до бесконечности при повороте средней секции на 90^0 .

Выбор основных конструктивных узлов и величины удельного поверхностного сопротивления резистивных плёнок

На входе (выходе) поляризационных аттенюаторов находятся волноводы прямоугольного сечения, размеры поперечных сечений которых определены соответствующим стандартом.

В рабочем диапазоне частот в прямоугольных волноводах основной волной является волна H_{10} . По структуре поля волна H_{10} похожа на волну H_{11} круглого волновода. Это обстоятельство учитывается при создании волноводных переходов между прямоугольными и круглыми волноводами, в которых указанные волны являются основными.

Расчет перехода от прямоугольного волновода к круглому первоначально сводится к определению радиуса круглого волновода при заданной ширине a прямоугольного полого волновода и необходимой длины l_1 плавного перехода для обеспечения минимального значения КСВН на входе (выходе) прямоугольного волновода.

Величину радиуса R круглого полого волновода находим из соотношения

$$\lambda_{\text{кр}}^{H_{10}} = \lambda_{\text{кр}}^{H_{11}}, \quad (2)$$

$$\text{где } \lambda_{\text{кр}}^{H_{10}} = 2a, \quad \lambda_{\text{кр}}^{H_{11}} = \frac{2\pi R}{\chi_{11}}.$$

Подставив в (2) численное значение $\chi_{11} = 1,841$, находим

$$R = 0,5865 a. \quad (3)$$

В верхней части используемого диапазона частот, который задается сечением прямоугольного волновода, в круглом волноводе средней секции аттенюатора возможно возбуждение паразитной волны H_{21} , поэтому в центральной части этого волновода создаётся фильтр в виде предельного круглого волновода для волны H_{21} [1].

При определении длины l_1 полого плавного перехода от прямоугольного волновода к

круглому исходим из того, что чем длиннее и, соответственно, плавнее переход, тем лучше согласование волноводов. Однако практика показала [2], что существуют определённые соотношения между рабочей длиной волны и длиной перехода. Так, для обеспечения величины $K_{СВН} \leq 1,1$ в узкой полосе (порядка 20-25%) рабочего диапазона частот прямоугольного волновода достаточно соотношения $l_1 \approx \lambda$.

Для обеспечения такого же согласования во всей рабочей полосе частот длина волнового перехода должна быть не менее двух-трёх максимальных длин волн для данного прямоугольного волновода [3],

$$l_1 \cong (2-3)\lambda_{\max}. \quad (4)$$

Технология изготовления волноводных плавных переходов СВЧ- и КВЧ-диапазонов была отработана в 50–60-х годах прошлого столетия. Один из способов состоит в том, что по результатам расчётов изготавливается необходимого профиля и длины оправка из алюминия, затем методом гальванического наращивания меди создаётся волновод. В дальнейшем оправка вытравляется.

Для аттенуаторов в верхней части КВЧ-диапазона, где размеры волноводов малы (порядка нескольких мм и менее) применяется электроискровой способ удаления металла из заготовки.

Важными элементами конструкции поляризационных аттенуаторов, обеспечивающих неразрывность всего волноводного тракта, недопустимость излучения электромагнитной энергии в местах стыковки волноводов, возможность свободного вращения ротора аттенуатора, являются дроссельные соединения.

Дроссельным соединениям волноводов посвящено немало теоретических исследований, созданы различные конструкции, проведены многочисленные испытания в различных условиях эксплуатации [3, 4].

Основным достоинством дроссельно-фланцевого соединения волноводов является надёжный, нечувствительный к небольшим перекосам, шероховатостям поверхностей и неплотности прилегания электрический контакт.

Одним из основных параметров, определяющих электродинамические характеристики поляризационных аттенуаторов (вносимое ослабление электромагнитного сигнала и качество согласования), является величина удельного поверхностного сопротивления R_{Π} резистивных плёнок, расположенных на одной из поверхностей плоских диэлектрических пластин (подложек) небольшой толщины с малыми значениями относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла потерь.

Пластины с плёнками расположены симметрично широким стенкам прямоугольных волноводов крайних секций и в диаметральной плоскости средней секции аттенуатора. Материалы диэлектрических пластин должны выдерживать вибрационные и ударные нагрузки, указанные в технических условиях для данного поляризационного аттенуатора.

В низкочастотной области СВЧ-диапазона волн (на частотах порядка 2-5 ГГц), в качестве материала подложек можно использовать диэлектрик гетинакс ($\epsilon \approx 5-6$, $\text{tg}\delta = 5 \cdot 10^{-2}$). На более высоких частотах в качестве подложек применяются различные стёкла ($\epsilon \approx 5-16$, $\text{tg}\delta = 1 \cdot 10^{-3}$), на крайне высоких частотах в основном применяется слюда ($\epsilon = 7$, $\text{tg}\delta \approx 1 \cdot 10^{-4}$).

Толщина применяемых подложек должна быть минимальной, например, в поляризационных аттенуаторах в диапазоне частот порядка 50-100 ГГц используются пластины слюды толщиной около 0,04 мм.

Выбор величины удельного поверхностного сопротивления резистивных плёнок для поляризационных аттенуаторов представляет собой сложную теоретическую задачу. Ориентировочно величину R_{Π} можно вычислить по формуле [5]:

$$\alpha = 8,68 \frac{240}{RR_{\Pi} \sqrt{1 - 0,086 \left(\frac{\lambda}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}, \quad (5)$$

где α - коэффициент затухания электромагнитной волны в круглом волноводе средней секции поляризационного аттенюатора, повернутой на угол $\theta = 90^\circ$; R - радиус круглого волновода; $\lambda_{\text{кр}}$ - критическая длина волны круглого волновода, λ - рабочая длина электромагнитной волны. При ориентировочных расчетах в качестве λ можно брать среднюю арифметическую длину $\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda_{\text{max}} + \lambda_{\text{min}}}{2}$ волн стандартного прямоугольного волновода.

Неизвестное значение погонного ослабления α , измеряемое в дБ/ед. длины, определяется из отношения

$$\alpha = \frac{A}{l_2}, \quad (6)$$

где A - величина заданного максимального ослабления проектируемого поляризационного аттенюатора; l_2 - длина резистивной пленки средней секции аттенюатора, практически равная длине этой секции (ротора).

При выборе величины l_2 исходим из того, что резистивная пленка средней секции должна обеспечить полное поглощение тангенциальной компоненты вектора \vec{E} проходящей электромагнитной волны, что возможно лишь при большой длине пленки. Практически величину l_2 берут равной $l_2 \approx 3\lambda_{\text{max}}$, увеличив её на 10–20%. В этом случае длина l_2 резистивной пленки с учетом некоторого «запаса» по длине составит $l_2 \approx 1,2l_1$ или $l_2 \approx 3,6\lambda_{\text{max}}$.

Окончательно формула для ориентировочного расчета удельного поверхностного сопротивления резистивной пленки средней секции принимает вид

$$R_{\Pi} = \frac{12787\lambda_{\text{max}}}{\alpha A \sqrt{1 - 0,086 \left(\frac{\lambda_{\text{ср}}}{\lambda_{\text{кр}}} \right)^2}}, \quad (7)$$

где α - размер широкой стенки прямоугольного волновода на входе (выходе) аттенюатора.

Во всех трех секциях поляризационного аттенюатора используются пластины с одинаковыми по сопротивлению резистивными пленками.

Следует отметить, что для поляризационного аттенюатора с входным (выходным) сечением 40×20 мм для обеспечения максимального ослабления 50дБ потребуется резистивная пленка с удельным поверхностным сопротивлением порядка 400 Ом/□.

На практике при конструировании поляризационных аттенюаторов, взяв за основу расчетные данные, приходится экспериментально подбирать величину сопротивления пленки для обеспечения заданного максимального ослабления и наилучшего согласования. В поляризационных аттенюаторах, выпускавшихся серийно отечественной промышленностью, величина R_{Π} поглощающих пленок находится в пределах (100–500) Ом/□ [6].

Для получения тонких резистивных пленок методом тонкопленочных технологий используются резистивные материалы: тантал, нихром, хром, сплавы МЛТ, РС 5406 и др. В случае использования гетинакса в качестве подложек на пластину наносился слой проводящей углеродистой массы методом толстопленочной технологии.

Для улучшения согласования поляризационных аттенюаторов на концах резистивных пленок со входа (выхода) аттенюаторов, а также со стороны стыковок секций делаются скосы в виде клиньев, «ласточкиных хвостов» и т.п., которые обеспечивают плавное изменение

волновых сопротивлений на переходных участках волноводов. Наличие скосов приводит к некоторому удлинению поглощающих пластин, что необходимо учитывать при экспериментальных отработках разрабатываемых аттенуаторов.

На рис. 3 показан общий вид поляризационного аттенуатора ДЗ-19 с приданными ему коаксиально-волноводными переходами. Сечение прямоугольных волноводов составляет 40×20 мм, диапазон частот аттенуатора 4,8–6,85 ГГц. Аттенуатор выпускался промышленностью мелкими сериями.

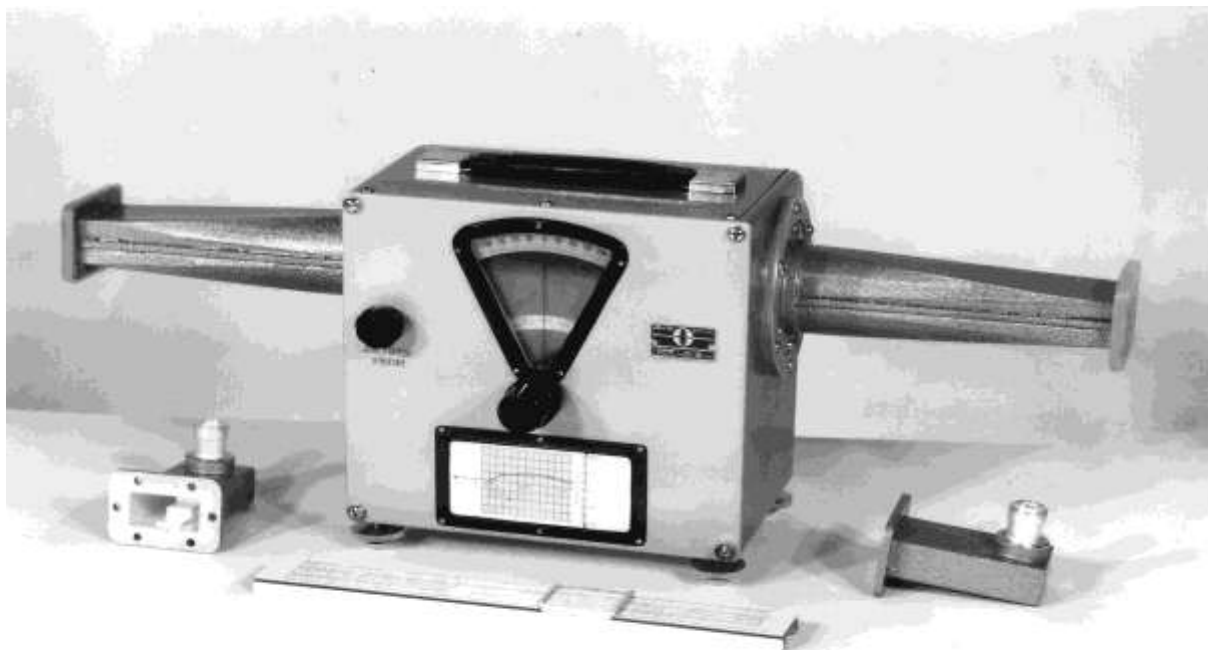


Рис. 3. Фото общего вида поляризационного аттенуатора типа ДЗ – 19

Корпус аттенуатора имеет каркасную конструкцию, с двух сторон которого закреплены волноводные переходы (статоры). Ротор посредством двух подшипников жёстко связан с корпусом аттенуатора и с помощью дроссельно- фланцевых соединений составляет со статорами единую волноведущую систему. Вращение ротора осуществляется ручкой управления, размещённой вне кожуха аттенуатора и находящейся на валу механизма вращения. В механизме вращения применена высокоточная червячная передача, снабжённая люфтовывирающим устройством. С этим механизмом связана многооборотная спиралеобразная шкала отсчёта, отградуированная в децибелах.

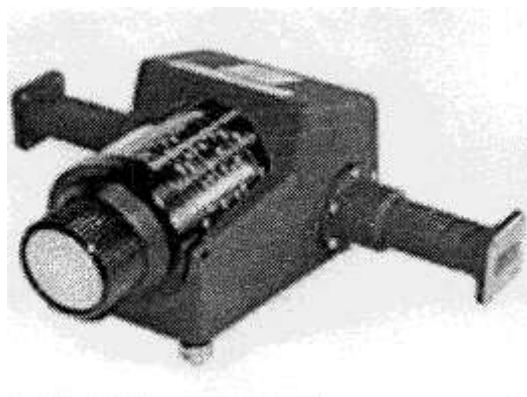


Рис. 4. Фото внешнего вида поляризационного аттенуатора КВЧ диапазона

Аналогичную конструкцию имели большинство выпускавшихся отечественной промышленностью поляризационных аттенюаторов СВЧ диапазона.

В верхней части СВЧ- и в КВЧ-диапазонах применяются компактные конструкции поляризационных аттенюаторов, в которых функции вращения ротора и отсчёта ослабления совмещены. На рис. 4 показана такая конструкция.

Погрешности поляризационных аттенюаторов. Технические характеристики

Теоретический закон зависимости ослабления поляризационного аттенюатора от угла поворота его средней секции (1) предполагает, что поглощающие пластины являются идеально плоскими и полностью поглощают тангенциальную составляющую вектора \vec{E} электромагнитной волны. При распространении в круглом волноводе волны H_{11} не возникает волн высших типов, точно известен угол между подвижной и неподвижными пластинами, отсутствуют распространение энергии по паразитным каналам, отражения волн в тракте, ошибки наблюдателя и т.д. [7].

Перечисленные требования выполняются с некоторым приближением, что приводит к возникновению погрешностей в оценке величины ослабления аттенюатора.

В [1] рассмотрены возможные величины ряда погрешностей.

Общая погрешность поляризационного аттенюатора по разностному ослаблению составляет

$$\Delta A = \Delta A_1 + \Delta A_2 + \sqrt{(\Delta A_3)^2 + (\Delta A_4)^2 + (\Delta A_5)^2}, \quad (8)$$

где величины погрешностей определяются следующим образом: ΔA_1 - эффектом неполного поглощения в резистивных пленках тангенциальной составляющей вектора \vec{E} ; ΔA_2 - неидеальной плоскостью поглощающих пластин; ΔA_3 - отражениями внутри аттенюатора; ΔA_4 - наличием небольших люфтов отсчетного механизма; ΔA_5 - ошибками наблюдателя при отсчете величины ослабления.

При работе аттенюатора во внешнем тракте необходимо учитывать дополнительную погрешность из-за рассогласования. Эта погрешность рассчитывается по формуле [8]:

$$\Delta A_p = \pm 8,7 \left[|G_q| \cdot |G_c| \cdot (K'^2 - K^2) + |G_q| \cdot |G'_1 - G_1| + |G_c| \cdot |G'_2 - G_2| \right], \quad (9)$$

где $|G_q|$, $|G_c|$ - значения модулей коэффициентов отражения элементов, стоящих на входе $|G_q|$ и выходе $|G_c|$ исследуемого аттенюатора соответственно;

$|G'_1|$, $|G'_2|$ и K' - значения модулей коэффициентов отражения входа и выхода и коэффициента передачи аттенюатора при первом отсчёте;

$|G_1|$, $|G_2|$ и K - значения модулей коэффициентов отражения и коэффициента передачи аттенюатора при втором отсчёте.

K - модуль коэффициента передачи аттенюатора, который связан с значением ослабления A в дБ соотношением

$$K = 10^{-A/20}. \quad (10)$$

Основными составляющими погрешности поляризационных аттенюаторов являются [1]: в начальном участке шкалы (0-15) дБ погрешность за счёт некоторого рассогласования аттенюатора со стороны входа и выхода, на участке (15-50) дБ за счёт механизма червячной передачи, при больших ослаблениях (более 50 дБ) - погрешностей механизма вращения,

установки шкалы отсчёта в диапазоне частот, неполного ослабления тангенциальной составляющей сигнала.

Экспериментально показано, что перечисленные погрешности могут быть существенно снижены, в результате чего погрешность поляризационного аттенюатора может составить величину порядка $\Delta A \leq (0,003 + 0,002A)$ дБ для ослаблений до 60 дБ и не более 0,3 дБ на участке (80-90) дБ.

В табл.1 приведены технические характеристики поляризационного аттенюатора типа ДЗ-19.

Таблица 1

Диапазон частот, ГГц	Начальное ослабление, дБ	Пределы измерения ослабления, дБ	Погрешность, дБ	КСВН	Сечение волновода, мм
4,8-6,85	0,5	0-50	$\pm (0,01 + 0,004A)$	1,15	40×20

Допустимая входная мощность аттенюатора 1 Вт, габаритные размеры 584×260×195 мм.

Для расширения измерительных возможностей поляризационных аттенюаторов к ним могут придаваться коаксиально-волноводные переходы, обладающие малыми потерями порядка (0,1-0,3) дБ и небольшим КСВН (не более 1,1–1,3).

На рис.3 показаны переходы от волноводов прямоугольного сечения 40×20 мм к коаксиальному тракту сечением 7,0 / 3,04 мм. Потери переходов в диапазоне частот этого волновода не превышают 0,1 дБ. Величина КСВН аттенюатора ДЗ -19 с присоединёнными переходами составляет не более 1,35.

В СССР была разработана и запущена в серийное производство широкая гамма измерительных поляризационных аттенюаторов в диапазоне частот от 2 ГГц (сечения волноводов 90,0×45,0 мм, 72,0×34,0 мм и т.д.) до нижней части КВЧ-диапазона.

Аттенюаторы типа ДЗ -32А – ДЗ-36А, предназначенные для работы в диапазоне частот от 6,85 до 37,5 ГГц (сечения волноводов 28,5×12,6 мм, 23,0×10,0 мм, 17,0×8,0 мм, 11,0×5,5 мм, 7,2×3,4 мм), имеют максимальное ослабление 95 дБ, величину КСВН не более 1,15–1,2 [9].

В табл. 2 приведены технические характеристики поляризационных аттенюаторов КВЧ диапазона [10].

Таблица 2

Тип аттенюатора	Диапазон частот, ГГц	Начальное ослабление, дБ	Пределы измерения ослабления, дБ	Погрешность, дБ	Сечение волновода, мм
ДЗ – 37	37,5-53,57	1,0	0 – 70	$\pm 2\%$ до 50 дБ, $\pm [0,9+0,05(A-50)]$ при $A > 50$ дБ	5,2 × 2,6
ДЗ–38	53,57-78,33	1,0	0 – 70	$\pm 2\%$ до 50 дБ, $\pm [0,9+0,05(A-50)]$ при $A > 50$ дБ	3,6 × 1,8

Величина КСВН аттенюаторов не более 1,15, допустимая входная мощность 0,1 Вт, габаритные размеры 149×100×78 мм.

Поляризаационные аттенюаторы нашли широкое применение в науке и технике как измерительные приборы, а часть из них была использована в качестве образцовой аппаратуры при определении ослаблений различных радиотехнических устройств и, особенно, при измерении потерь малых величин в волноведущих системах.

При обеспечении полного поглощения электромагнитной энергии тангенциальных компонент поля \vec{E} волн H_{11} и H_{10} в рабочем диапазоне частот, а также при хорошем согласовании со стороны входа (выхода) и на стыках секций поляризаационных аттенюаторов возможно получение параметров, которые позволяют использовать такие аттенюаторы в качестве эталонов ослабления [1].

Библиографический список

1. **Томашевский, А.К.** К вопросу использования поляризаационного аттенюатора в качестве эталона ослабления // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1966. вып.1. С. 35–42.
2. Линии передачи сантиметровых волн: [пер. с англ.] / под ред. Г.А. Ремеза. – М.: Сов. радио, 1951. Т. 1. – 416 с.
3. **Чернушенко, А.М.** Конструирование экранов и СВЧ устройств: учебник для вузов / А.М. Чернушенко [и др.]. – М.: Радио и связь, 1990. – 352 с.
4. **Иванов, А.Е.** Расчёт дроссельных соединений вращающихся механизмов СВЧ-устройств / А.Е. Иванов, Г.И. Шишков, С.В. Чикурина // Методы и средства измерений физических величин: тез. докладов и сообщений XVIII ВНТК. – Н. Новгород, 2007. С. 25.
5. **Семёнов, Н.А.** Техническая электродинамика / Н.А. Семёнов. – М.: Связь, 1973. – 321 с.
6. **Бушминский, И.П.** Изготовление элементов конструкций СВЧ / И.П. Бушминский. – М.: Высшая школа, 1974. – 304 с.
7. **Томашевский, А.К.** Погрешности поляризаационного аттенюатора, возникающие за счёт отражений // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1965. Вып.1. С. 48–52.
8. ГОСТ 19158-73 Аттенюаторы. Технические требования. – М.: Государственный комитет стандартов СМ СССР. – 1973.
9. **Шапиро, Х.А.** Поляризаационные аттенюаторы с оптической системой индикации / Х.А. Шапиро, В.С. Удовенчик // Вопросы радиоэлектроники. Сер. РИТ. 1971. Вып. 5. С. 40–46.
10. Техническое описание и инструкция по эксплуатации ГВ 2.243.147.ТО. – 1986.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

A.E. Ivanov, A.E. Lvov, G.I. Shishkov

POLARIZATION ATTENUATORS

The principle of operation, the design and errors of polarization attenuators are described.

Key words: polarization attenuators, resistive films, attenuation, errors.

УДК 621.372.8

Н.И. Кузикова

РАСЧЕТ ОБОБЩЕННЫХ МАТРИЦ РАССЕЯНИЯ АНТЕНН В СФЕРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ КООРДИНАТ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ АНАЛИЗА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАМОЧНОЙ АНТЕННЫ И ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ШАРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен подход к решению задач анализа антенных систем с помощью обобщенных матриц рассеяния с использованием сферических гармоник. Рассчитаны основные характеристики двухэлементной антенной системы; приведен анализ взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара.

Ключевые слова: антенные системы, обобщенные матрицы рассеяния, сферические гармоники, входное сопротивление, диаграмма направленности, рамочная антенна, диэлектрический шар.

Введение

В настоящей работе рассматривается применение метода обобщенных матриц рассеяния к решению задач антенной техники. Метод обобщенных матриц рассеяния известен достаточно давно [1]. Он аналогичен матричному методу, применяемому в теории электрических цепей, и позволяет выполнять анализ по внешним характеристикам, не интересуясь внутренней структурой цепи или антенны. Отличие обобщенной матрицы антенны от классической матрицы многополюсника заключается только в том, что, кроме прямых и обратных волн в фидерах, учитываются падающие на антенну и рассеянные ей волны свободного пространства.

Вместо термина «обобщенная матрица рассеяния» в научной литературе используются и другие названия: в [2] – термин «метод квази-виртуальных многополюсников», в [3] вместо обобщенной матрицы используется понятие дискриптора автономного блока. Далее в статье используется наиболее ранний термин – «обобщенная матрица рассеяния».

Несмотря на то, что в настоящее время разработаны удобные универсальные программы для расчета характеристик антенных систем, в ряде задач целесообразно использовать метод обобщенных матриц рассеяния. Например, при решении задачи об оптимальном размещении антенны на объекте (самолете, автомобиле и др.) представляется целесообразным вначале определить обобщенные матрицы рассеяния антенны и объекта. Затем по ним уже определять характеристики системы при различных положениях антенны. Так как матричные операции компьютер выполняет быстро, то такой путь позволит решить задачу значительно быстрее, чем многократное моделирование антенны с объектом.

Кроме этого, представляется неизбежным использование обобщенной матрицы объекта, если она определена экспериментально и электродинамическая модель объекта неизвестна.

Запись обобщенной матрицы рассеяния зависит от выбора вида волн, используемых для описания электромагнитного поля свободного пространства. Плоские электромагнитные волны имеют наиболее простую структуру поля и изучаются даже в средней школе. Однако их использование для записи обобщенной матрицы рассеяния реальных антенн конечных размеров представляется крайне затруднительным. Амплитуды плоских волн связаны с зависимостью электромагнитного поля от пространственных координат на некоторой плоскости двухмерным преобразованием Фурье [4].

Если представить, что для описания поля используется около ста пространственных гармоник по каждой из двух координат, то это означает, что обобщенная матрица рассеяния

будет иметь размер порядка $10^4 \times 10^4$. Выполнение вычислений с матрицами таких огромных размеров не представляется возможным. Поэтому в работе для описания поля свободного пространства предлагается использовать сферические гармоники. Приведенные примеры показывают, что при использовании сферических гармоник, размерность обобщенных матриц рассеяния оказывается небольшой.

Далее приведены краткие сведения по сферическим гармоникам и рассмотрен физический смысл элементов обобщенной матрицы рассеяния при использовании сферических гармоник. Получены формулы для расчета входного сопротивления системы из двух антенн и диаграммы направленности по обобщенным матрицам рассеяния элементов.

Предложена методика расчета обобщенных матриц рассеяния проволочных антенн. Приведены результаты численного анализа взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара.

Структура обобщенной матрицы рассеяния и физический смысл ее элементов

Как уже упоминалось ранее, электромагнитное поле антенной системы будет характеризоваться суммой полей сферических гармоник. Различные составляющие электромагнитного поля удобно определить через электрический и магнитный потенциалы для волн Е - и Н - типа соответственно. Зависимость электрического потенциала U от пространственных координат может быть записана в виде [5]

$$U(r, \theta, \varphi) = \frac{r}{k} \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_{n,m} h_n^{(2)}(kr) P_n^{(m)}(\cos\theta) e^{jm\varphi}, \quad (1)$$

где $k = \omega(\epsilon\mu)^{0.5}$ - волновое число; ϵ , μ - диэлектрическая и магнитная проницаемость среды (вакуума); ω - круговая частота гармонических источников; $h_n^{(2)}(kr)$ - сферические функции Ганкеля второго рода; $P_n^{(m)}(\cos\theta)$ - присоединенная функция Лежандра.

Аналогичное выражение может быть записано и для магнитного потенциала волн Н - типа. Производные по пространственным переменным от потенциалов дают различные компоненты электрического и магнитного полей. Приведем используемое далее в статье выражение для компоненты E_θ электрического поля волн типа Е.

$$E_\theta = \frac{1}{kr} \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{m=-n}^n c_{n,m} \frac{d(kr h_n^{(2)}(kr))}{d(kr)} \frac{d(P_n^{(m)}(\cos\theta))}{d\theta} e^{jm\varphi}. \quad (2)$$

Двухиндексная нумерация волн в выражениях (1 и 2) удобна для пояснения структуры поля, но неудобна при численных расчетах, поэтому полагаем в дальнейшем изложении, что вместо двухиндексной нумерации применена сквозная одноиндексная нумерация всех сферических гармоник, которые фигурируют в расчетах.

Полагаем, что антенная система может быть заключена между двумя сферическими поверхностями, схематично показанными пунктиром на рис. 1.

Все волны, падающие извне на антенну объединим в вектор \mathbf{c}^+ , а волны, рассеянные ей, – в вектор \mathbf{c}^- . Матрицу, определяющую вектор \mathbf{c}^- через \mathbf{c}^+ , и будем называть *обобщенной матрицей рассеяния*. Запись $\mathbf{c}^- = \mathbf{SG} \cdot \mathbf{c}^+$ позволяет указать физический смысл элемента $\mathbf{SG}_{m,n}$ обобщенной матрицы рассеяния.

Он определяет комплексную амплитуду рассеянной волны с номером m , если на антенную систему падает одна волна единичной амплитуды с номером n . Вектор \mathbf{c}^+ объединяет волны фидеров антенной системы \mathbf{c}_0^+ и падающие на антенную систему волны свободно-

го пространства \mathbf{c}_S^+ . Такое представление вектора \mathbf{c}^+ и аналогичное представление вектора \mathbf{c}^- позволяет записать обобщенную матрицу рассеяния в виде четырех подматриц:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^- \\ \mathbf{c}_S^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma} & \mathbf{R} \\ \mathbf{G} & \mathbf{S} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^+ \\ \mathbf{c}_S^+ \end{bmatrix}. \quad (3)$$

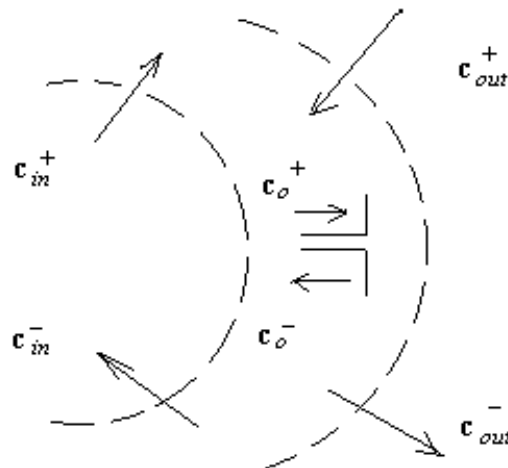


Рис. 1. Структурная схема антенной системы

Подматрицы $\mathbf{\Gamma}$, \mathbf{S} , \mathbf{G} , \mathbf{R} имеют следующий физический смысл. $\mathbf{\Gamma}$ связывает между собой волны антенных фидеров и являются обычной матрицей рассеяния, рассматриваемой в теории СВЧ-устройств, если антенную систему представлять как электрическую цепь [6]. Матрица \mathbf{S} связывает волны свободного пространства и характеризует рассеивающие свойства антенной системы. Матрица \mathbf{G} может быть названа *матрицей излучения*. Она определяет комплексные амплитуды излучаемых волн при возбуждении антенной системы через фидеры. \mathbf{R} целесообразно назвать *приемной матрицей*, она, наоборот, определяет комплексные амплитуды волн, возникающие в фидерах антенной системы при облучении ее волнами свободного пространства.

Заметим, что для одноходовой антенны матрица излучения становится вектором столбцом \mathbf{G} . Элементы этого вектора – комплексные амплитуды сферических гармоник, возбуждаемые антенной в режиме излучения. Матрица \mathbf{R} становится вектором строк. Матрица $\mathbf{\Gamma}$ в этом случае связывает отраженную от входа антенны волну с падающей, т.е. становится коэффициентом отражения $\mathbf{\Gamma}$.

Рис.1 показывает, что вектор \mathbf{c}_S^+ целесообразно разделить на внутренние \mathbf{c}_{in}^+ и внешние \mathbf{c}_{out}^+ подвекторы. Такое подразделение определяет представление обобщенной матрицы рассеяния в виде большего числа подматриц. Для одноходовой антенны представление имеет вид

$$\begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^- \\ \mathbf{c}_{in}^- \\ \mathbf{c}_{out}^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{\Gamma} & \mathbf{R}_{in}^T & \mathbf{R}_{out}^T \\ \mathbf{G}_{in} & \mathbf{S}_{ii} & \mathbf{S}_{io} \\ \mathbf{G}_{out} & \mathbf{S}_{oi} & \mathbf{S}_{oo} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{c}_0^+ \\ \mathbf{c}_{in}^+ \\ \mathbf{c}_{out}^+ \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Здесь использована сокращенная запись индексов у подматриц рассеяния, например,

S_{io} вместо $S_{in\ out}$.

Заметим, что для отдельных антенных элементов выражение (4) может иметь более простой вид. Так, для антенного элемента, расположенного в начале координат и окруженного только одной внешней сферой, в (4) следует удалить строку 2 и второй столбец в обобщенной матрице рассеяния.

Расчет характеристик двухэлементной антенной системы по обобщенным матрицам рассеяния

Двухэлементная антенная система изображена на рис. 2.

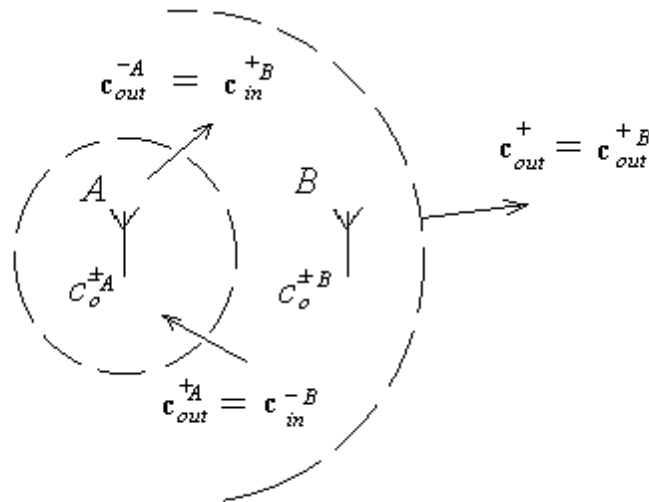


Рис. 2. Структурная схема двухэлементной антенной системы

Полагаем, что антенные элементы одноходовые и для них известны обобщенные матрицы рассеяния SG^A и SG^B . Необходимо по матрицам SG^A и SG^B рассчитать обобщенную матрицу рассеяния системы на рис. 1. Решение этой задачи приведено в [3]. Оно основано на записи соотношения (4) для элементов системы.

$$\begin{bmatrix} c_0^{A-} \\ c_{out}^{A-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma^A & \mathbf{R}_{out}^{AT} \\ \mathbf{G}_{out}^A & \mathbf{S}_{oo}^A \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0^{A+} \\ c_{out}^{A+} \end{bmatrix}, \quad (5a)$$

$$\begin{bmatrix} c_0^{B-} \\ c_{in}^{B-} \\ c_{out}^{B-} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Gamma^B & \mathbf{R}_{in}^{BT} \\ \mathbf{G}_{in}^B & \mathbf{S}_{ii}^B \\ \mathbf{G}_{out}^B & \mathbf{S}_{oi}^B \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} c_0^{B+} \\ c_{in}^{B+} \\ c_{out}^{B+} \end{bmatrix}. \quad (5b)$$

При записи соотношения (5a) учтено, что у элемента A отсутствуют внутренние волны (c_{in}^{A+} и c_{in}^{A-}), а при записи соотношения (5b) полагается, что нас интересуют только излучающие свойства антенной системы, т. е. на нее внешние волны не падают ($c_{out}^{B+} = 0$).

Для дальнейших преобразований необходимо учесть связь волн антенных элементов, показанную на рис. 2:

$$c_{out}^{A+} = c_{in}^{B-}, \quad c_{out}^{A-} = c_{in}^{B+}. \quad (6)$$

Кроме этого, при анализе взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара мы будем рассматривать шар как рассеиватель. При этом

$$c_0^{B-} = -c_0^{B+}. \quad (7)$$

Преобразование выражений (5) с учетом равенств (6) и (7) позволяет определить входное сопротивление антенной системы Z_{IN} и амплитуды излучаемых волн c_{out} при возбуждении входа A падающей волной единичной амплитуды. Опуская простые, но громоздкие преобразования, приведем окончательные расчетные формулы:

$$Z_{IN} = W \frac{1 + \Gamma_1}{1 - \Gamma_1},$$

где W – волновое сопротивление; \mathbf{I} – единичная матрица.

$$\Gamma_1 = \Gamma + S_0 - S_1 R_{in}^{B T} S R G_{out}^A S_2^{-1},$$

причем
$$S_0 = R_{out}^A S_{ii}^B S R G_{out}^A, S_1 = R_{out}^A G_{in}^B + R_{out}^A S_{ii}^B S R S_{oo}^A G_{in}^B, \quad (8)$$

$$S_2 = 1 + \Gamma + R_{in}^{B T} S R S_{oo}^A G_{in}^B, S R = (\mathbf{I} - S_{oo}^A S_{ii}^B)^{-1}, \Gamma^A = \Gamma^B = \Gamma;$$

$$c_{out} = S_{oi}^B S R G_{out}^A + (-1) S_2^{-1} (R_{in}^{B T} S R G_{out}^A) (G_{out}^B + S_{oi}^B S R S_{oo}^A G_{in}^B).$$

Численный расчет обобщенных матриц рассеяния проволочных антенн

При численном расчете матрицы рассеяния проволочной антенны следует вначале определить токи в проводах антенны при возбуждении ее либо со стороны фидера, либо электромагнитным полем внешней сферической гармонике. Полагаем, что такой расчет может быть выполнен по формулам, на которых основаны программы анализа антенных систем. при выполнении расчетов, результаты которых приведены далее, использованы формулы [7].

Элементы матрицы рассеяния антенны определяются через комплексные амплитуды различных сферических гармоник рассеянного (излученного) поля. Для подсчета комплексных амплитуд сферических гармоник целесообразно антенну представить как совокупность элементарных излучателей и просуммировать амплитуды гармоник, создаваемых всеми элементарными излучателями. Выражения для расчета комплексных амплитуд сферических гармоник, создаваемых элементарным излучателем, получены в [8]. Приведем их с некоторыми изменениями. Эти изменения связаны с тем, что в [8] рассматриваются диполи, расположенные на оси z сферической системы координат. При расчете обобщенных матриц рассеяния приходится рассматривать диполи, расположенные в различных точках пространства. для радиального диполя расчетные формулы имеют вид

$$\alpha_{n,m}^{rad} = 60\pi k \Delta z I_{\Delta z} (-1)^{n+1} (2m+1) \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{j_n(kr_0)}{kr_0} P_n^{(m)}(\cos\theta_0).$$

$$\beta_{n,m}^{rad} = 0.$$

Для меридионального диполя

(9)

$$\alpha_{n,m}^{mer} = 60\pi k \Delta z I_{\Delta z} (-1)^n \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} \frac{d(kr j_n(kr))}{d(kr)} \Big|_{kr=kr_0} \frac{dP_n^{(m)}(\cos\theta)}{d\theta} \Big|_{\theta=\theta_0}$$

$$\beta_{n,m}^{mer} = 60\pi k \Delta z I_{\Delta z} (-1)^{n+1} \frac{2n+1}{n(n+1)} \frac{(n-m)!}{(n+m)!} j_n(kr_0) \frac{P_n^{(m)}(\cos\theta_0)}{\sin\theta_0}.$$

При записи формул полагается, что рассматриваются только плоские проволочные антенны, поэтому угол φ_0 в формулах (9) не фигурирует: он полагается равным нулю. Это также позволяет не пользоваться формулами для диполя азимутальной ориентации, которые при записи (9) опущены.

Заметим, что выражения (9) определяют амплитуды сферических гармоник поля для $r > r_0$. При $r < r_0$ следует в (9) сферические функции Бесселя $j_n(x)$ заменить на сферические функции Ганкеля $h_n^{(2)}(x)$.

Результаты численного анализа взаимодействия рамочной антенны и диэлектрического шара

Рассмотрим задачу анализа взаимодействия рамочной антенны с шаром из диэлектрика. Структурная схема данной антенной системы приведена на рис. 3.

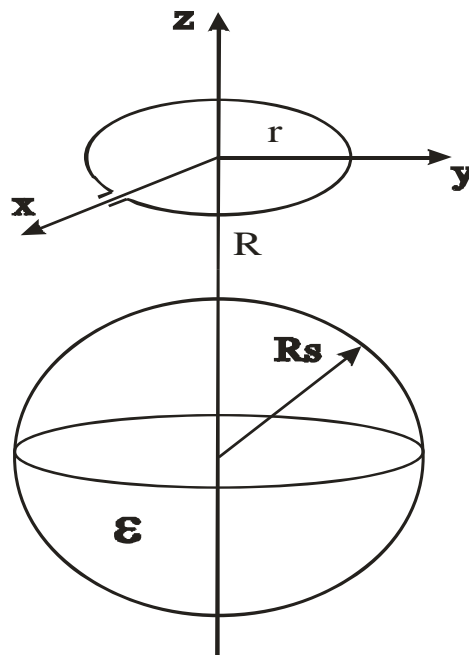


Рис. 3. Структурная схема расположения рамочной антенны и диэлектрического шара

Полагаем, что рамочная антенна подключается к источнику кабелем с волновым сопротивлением $W = 75$ Ом. Диэлектрический шар радиусом R_s рассматривается как рассеиватель. Радиус рамки r подобран так, чтобы наблюдался резонанс. Расстояние R между рамочной антенной и шаром изменялось, вход рамки находился на оси x , плоскость рамки располагалась в плоскости xoy .

Для расчета обобщенной матрицы рассеяния диэлектрического шара используется граничное условие равенства тангенциальных компонент электромагнитного поля на поверхности диэлектрического шара для Е-волн и Н-волн. В этом случае имеем

Е-волны:

$$tDj_n(kR) - SS_n^E Dh_n^{(2)}(k_0R) = Dj_n(k_0R),$$

$$t\sqrt{\varepsilon}j_n(kR) - SS_n^E h_n^{(2)}(k_0R) = j_n(k_0R),$$

$$\Delta = -h_n^{(2)}(k_0R)Dj_n(kR) + \sqrt{\varepsilon}j_n(kR)Dh_n^{(2)}(k_0R),$$

$$\Delta_n^E = j_n(k_0R)Dj_n(kR) - \sqrt{\varepsilon}j_n(kR)Dj_n(k_0R),$$

Н-волны:

$$t \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} j_n(kR) - SS_n^H h_n^{(2)}(k_0R) = j_n(k_0R), \tag{10}$$

$$tDj_n(kR) - SS_n^H Dh_n^{(2)}(k_0R) = Dj_n(k_0R),$$

$$\Delta = -\frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} Dh_n^{(2)}(k_0R)j_n(kR) + Dj_n(kR)h_n^{(2)}(k_0R),$$

$$\Delta_n^H = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} j_n(kR)Dj_n(k_0R) - j_n(k_0R)Dj_n(kR),$$

где t^E, t^H – коэффициенты прохождения для Е- и Н- волн соответственно,

$$Dj_n(kR) = \frac{1}{kR} \frac{d(kRj_n(kR))}{d(kR)},$$

$$Dh_n^{(2)}(kR) = \frac{1}{kR} \frac{d(kRh_n^{(2)}(kR))}{d(kR)}.$$

Откуда интересующие нас компоненты для коэффициента отражения определены следующим образом:

$$SS_n^E = \frac{\Delta_n^E}{\Delta} \text{ – коэффициент отражения для Е-волн,}$$

$$SS_n^H = \frac{\Delta_n^H}{\Delta} \text{ – коэффициент отражения для Н-волн.} \tag{11}$$

Представлены зависимости реальной (рис. 4, а) и мнимой (рис. 4, б) составляющих входного сопротивления от расстояния между рамкой и шаром при $\varepsilon=5$. Для резонансной частоты при $R > R_c$ для больших расстояний при изменении R наблюдается небольшое колебание активной и реактивной составляющих входного сопротивления.

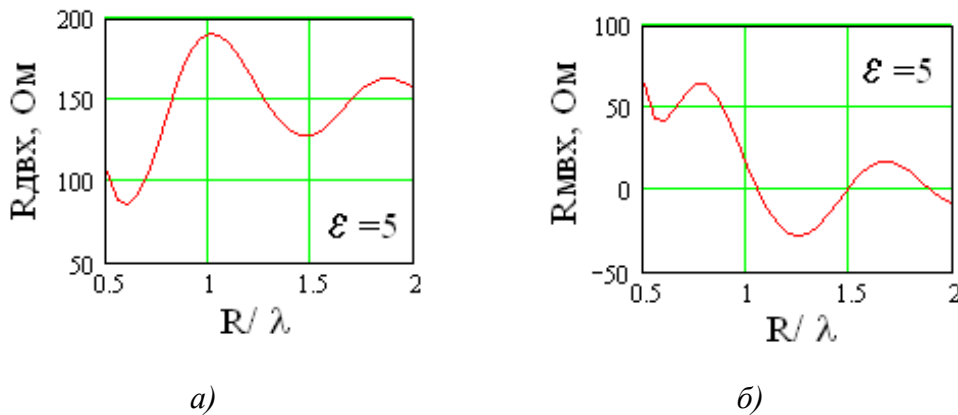


Рис. 4. Зависимость входного сопротивления:

а - действительная составляющая; б - мнимая составляющая) от расстояния между рамкой и шаром ($\varepsilon=5$)

Если $R < R_s$ (диэлектрик входит в рамку), как можно заметить из рис. 5, наблюдается сильное изменение реактивной составляющей входного сопротивления. Этот эффект особенно заметен при близких размерах рамки и шара, а также при значительных диэлектрических проницаемостях шара. Его необходимо учитывать при проектировании приемно-передающих устройств. Иначе входная цепь окажется не настроенной в резонанс, а для получения нужной излучаемой мощности придется увеличивать амплитуду сигнала передатчика, что приведет к увеличению помех и воздействия электромагнитного сигнала на человека.

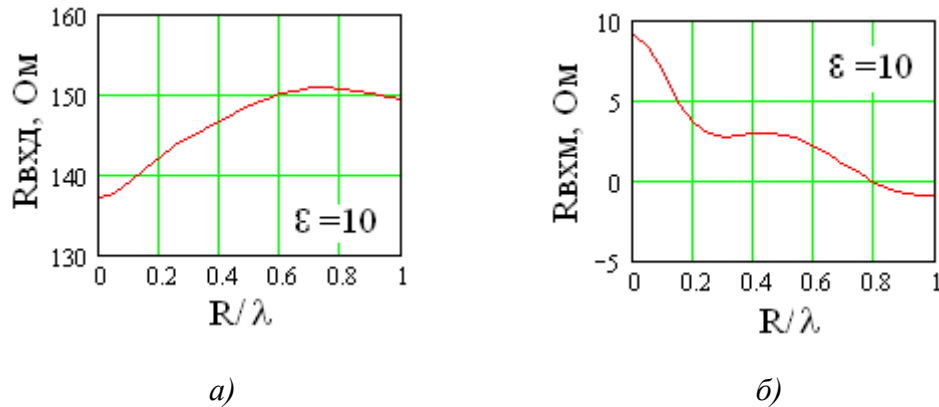


Рис. 5. Зависимость входного сопротивления:
a - действительная составляющая; *б* - мнимая составляющая)
 от расстояния между рамкой и шаром ($\epsilon=10$) (шар входит в рамку) $R_s=0.1$ м, $r=0.263$ м

На рис. 6 и рис. 7 изображены диаграммы направленности системы рамка - шар при различных расстояниях между ними и для разных значений диэлектрической проницаемости. Для каждого значения R приведены диаграммы: *a* – в вертикальной плоскости, *б* – в горизонтальной.

Как видно из рис. 8, диаграмма направленности системы на низких частотах при малой сфере – это диаграмма направленности магнитного диполя. По E_φ - круговая в горизонтальной плоскости и меняется по $\sin \theta$ в вертикальной плоскости. Рассчитанное для низких частот входное сопротивление имеет реактивный характер. Соответствующая в этом случае входному сопротивлению величина индуктивности сравнивалась с рассчитанной по формуле из [9]. Отличие результатов менее 0.1%.

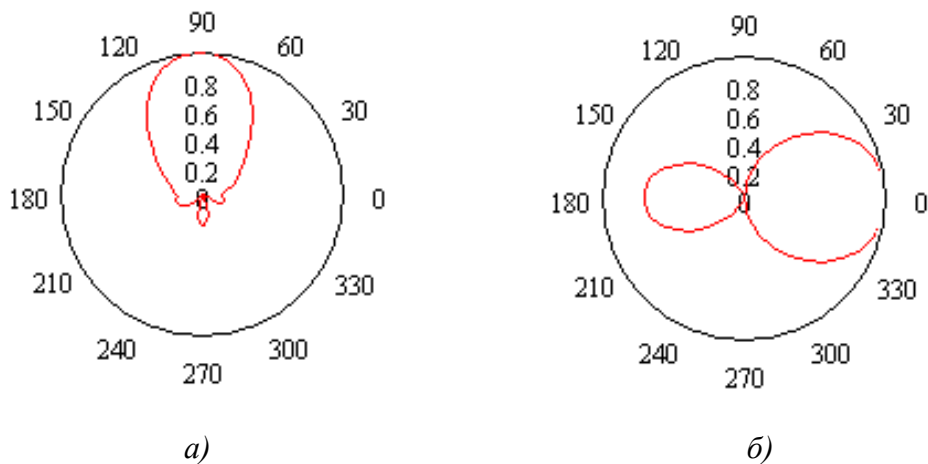


Рис. 6. Диаграмма направленности системы рамка – шар ($R=\lambda$, $\epsilon = 5$):
a - в вертикальной плоскости; *б* - в горизонтальной плоскости)

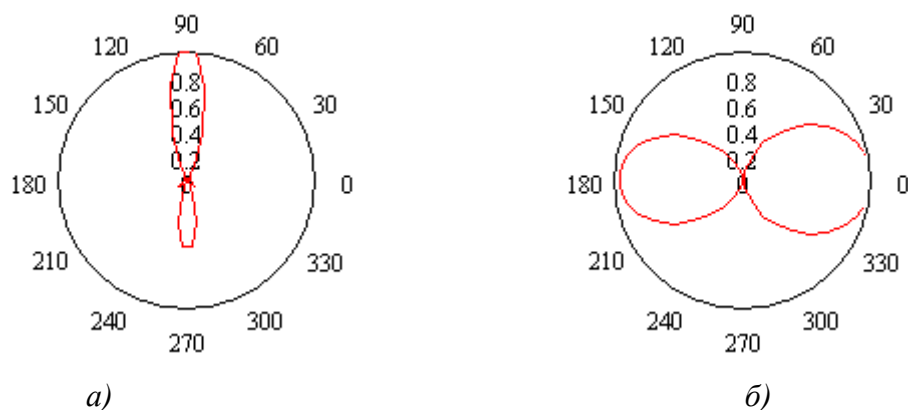


Рис. 7. Диаграмма направленности системы рамка – шар ($R=2.5\lambda$, $\epsilon = 5$):
a - в вертикальной плоскости; *б* - в горизонтальной плоскости)

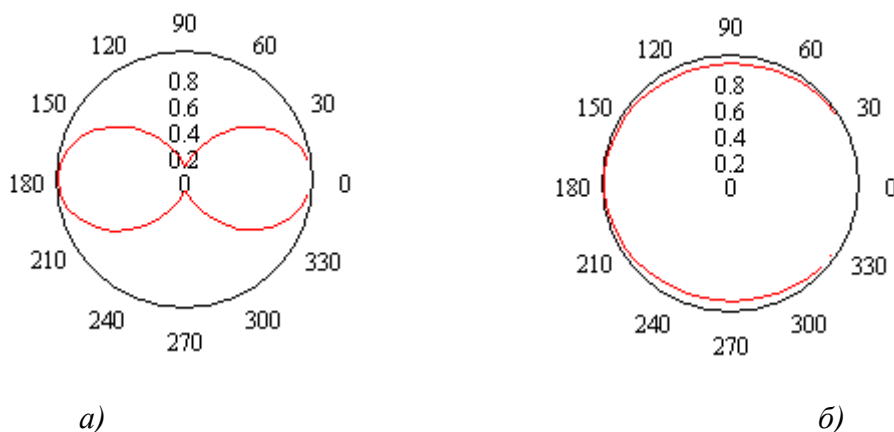


Рис. 8. Диаграмма направленности системы рамка – шар ($R=2.5\lambda$, $\epsilon = 10$):
a - в вертикальной плоскости; *б* - в горизонтальной плоскости на низкой частоте
(меньше в 10 раз, чем на рис. 6 и рис. 7)

Таким образом, использование сферических гармоник при записи обобщенных матриц рассеяния антенных элементов позволяет уменьшить размерность матриц без существенного увеличения погрешностей. Это позволяет использовать обобщенные матрицы рассеяния на практике при расчете характеристик антенных систем.

Библиографический список

1. **Race, J.** Generalized scattering matrix analysis of waveguide discontinuity problems / J. Race, R. Mittra - Quasi-Optics, XIV, 172-197, Polytechnic Institute of Brooklyn Press. - New York, 1964.
2. **Гальченко, Н.А.** Метод квази - виртуальных многополюсников в матрично-электродинамической теории СВЧ – устройств / Н.А. Гальченко, А.В. Кравченко, С.А. Варта-ньян // Электродинамика и техника СВЧ и КВЧ. 1998. № 3. С. 10.
3. **Никольский, В.В.** Декомпозиционный подход к задачам электродинамики / В.В. Николь-ский, Т.И. Никольская – М.: Наука, 1989.
4. **Зверев, В.А.** Радиооптика. Преобразования сигналов в радио и оптике / В.А. Зверев. – М.: Сов. Радио, 1975.
5. **Анго, А.** Математика для электро- и радиоинженеров / А. Анго. – М.: Наука, 1967.
6. **Фельдштейн, А.Л.** Синтез четырехполюсников и восьмиполусников на СВЧ / А.Л. Фель-дштейн, Л.Р. Явич. – М.: Связь, 1971.
7. **Harrington, R.F.** Matrix Methods for Field Problems / R.F. Harrington // Proceedings of the IEEF. Volume 55. № 2. February. P. 136-149.

8. **Марков, Г.Т.** Возбуждение электромагнитных волн / Г.Т. Марков, А.Ф. Чаплин. – М.: Радио и связь, 1983. – 296 с.
9. **Калантаров, П.Л.** Расчет индуктивностей. Справочная книга / П.Л. Калантаров, Л.А. Цейтлин. – Л.: Энергоатомиздат, 1986.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

N.I. Kuzikova

**CALCULATION OF THE GENERALIZED SCATTERING MATRICES
IN THE SPHERICAL SYSTEM OF COORDINATES AND ITS APPLICATION
FOR THE ANALYSIS THE INTERACTION OF A LOOP ANTENNA
AND A DIELECTRIC SPHERE**

It is considered a method of solving of antenna analysis problems by means of the generalized scattering matrices formalism using spherical field harmonics. Main parameters of the two-element antenna system are calculated. Results analyses the interaction of a loop antenna and a dielectric sphere were obtained.

Key words: antenna system, generalized scattering matrices, spherical field harmonics, input impedance, radiation pattern.

УДК 621.3.013.62

С.С. Зельманов

МАТРИЧНЫЙ РЕЗОНАНС ФОРМЫМосковский технический университет связи и информатики
(Волго-Вятский филиал МТУСИ)

Показана возможность существования резонанса формы в линейной стационарной динамической системе с n входами и одним выходом при действии на её входах векторной совокупности сигналов со сложными конструкциями. Особенностью такого резонанса как свойства внешнего состояния системы является возможность его обнаружения при отсутствии признаков частотного резонанса в системе. Эта особенность весьма существенна при поиске в системе резонансных явлений, связанных с их возможными негативными последствиями.

Ключевые слова: резонанс формы, парциальные импульсные характеристики, матричный резонатор, векторная совокупность входных сигналов, внешнее состояние системы.

Постановка задачи

Динамическая система любой физической реализации и известной структуры может быть представлена как система с n входами и одним выходом. На её входы подаются внешние воздействия, а на выходе возникает экстремальная ответная реакция. При таком подходе основная задача — это поиск некоторой комбинации управляющих воздействий, обеспечивающих экстремальную реакцию системы на её выходе.

При этом резонанс рассматривается как свойство системы с внешним описанием. Это свойство альтернативно традиционному резонансу системы с внутренним описанием.

Введем обобщение, состоящее в том, что на входах такой резонансной системы могут действовать ряд сигналов с подчас сложными сигнальными конструкциями.

Результатом наших исследований будет доказательство того факта, что в зависимости от формы этих сигналов только при определенном их сочетании на выходе системы может появиться экстремальный сигнал, пиковое значение которого может существенно превышать значения выходного сигнала при любых других сигналах на входах, — это резонанс.

Практическая ценность такой задачи состоит в том, что реальные системы действительно могут содержать много точек внешнего воздействия. При действии на эти точки определенного сочетания внешних сил в системе может возникать резонанс, которого не ждут и который может привести к непредсказуемым последствиям. При этом иные сочетания автономных воздействий внешних сил на отдельные входы системы экстремального отклика на выходе системы не вызывают. При традиционном обследовании таких систем частотным методом резонансы в них не обнаруживаются. К таким системам могут относиться мостовые конструкции, отрезки железнодорожных путей с движущимися по ним составам и другие системы с ограниченной базой, находящиеся под воздействием внешних сил в разных точках.

Поэтому при вариации видов и параметров входных сигналов необходимо установить в ней явление резонанса и предупредить нежелательные его последствия. Такой вид резонанса будет резонансом формы, и мы определим его как *матричный резонанс формы*. При этом необходимо показать, что в случае векторной совокупности входных сигналов при определенной их параметризации на выходе системы может иметь место экстремальный отклик, величина которого в некоторый момент времени больше, чем для любой иной комбинации входных сигналов.

Решение задачи

Теорема.

Для любой линейной стационарной динамической систем, имеющей n входов и один выход, существует сочетание (различных) сигналов с фиксированной энергией, подаваемых каждый на свой вход, только при одновременном возбуждении которыми n входов системы имеет место экстремальный отклик на выходе, т.е. резонанс в системе.

Доказательство.

Теорема констатирует, что резонанс в линейной системе при вариации формы единственного входного сигнала не является исключительным видом резонанса формы. Системный анализ явления резонанса предполагает дальнейшее развитие и совершенствование данного вида резонанса.

Рассмотрим явление резонанса в линейной стационарной динамической системе с постоянными параметрами, в которой имеется n входов и один выход. Пусть сигнал имеет n -мерное пространство состояний и вектор пространства состояний в момент t :

$$\vec{x}(t) = [x_1(t), \dots, x_n(t)]^T \quad (1)$$

Тогда модель $n \times 1$ системы в матричном виде может быть представлена уравнениями вида

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \vec{x}(t) &= A\vec{x}(t) + B\vec{u}(t), \\ \vec{y}(t) &= C\vec{x}(t) + D\vec{u}(t); \quad \vec{x}(0) = \vec{x}_0, \end{aligned} \quad (2)$$

где A - $n \times n$ матрица переходов состояния, удовлетворяющих условиям устойчивости,

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & \dots & b_{1n} \\ b_{21} & b_{22} & \dots & b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{n1} & b_{n2} & \dots & b_{nm} \end{bmatrix} \quad - \text{ матрица входов,}$$

$$C = [c_1, c_2, \dots, c_n] \quad - \text{ матрица выхода.}$$

Положим $D = [d_1, d_2, \dots, d_n] = [0, 0, \dots, 0]$, что соответствует отсутствию прямого прохождения сигнала с входа на выход для упрощения.

Известно, что (2) имеет решение в плоскости комплексной переменной:

$$\vec{X}(p) = \begin{bmatrix} X_1(p) \\ X_2(p) \\ \dots \\ X_n(p) \end{bmatrix},$$

где
$$X_i(p) = \int_0^{\infty} x_i(t) e^{-pt} dt$$

$$\vec{U}(p) = \begin{bmatrix} U_1(p) \\ U_2(p) \\ \dots \\ U_n(p) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\text{где } U_i(p) = \int_0^{\infty} u_i(t) e^{-pt} dt$$

при нулевых начальных условиях.

$$\bar{x}(p) = (pI - A)^{-1} \cdot B \cdot \bar{U}(p)$$

где I - единичная матрица.

Для выхода будем иметь

$$Y(p) = \int_0^{\infty} y(t) e^{-pt} dt = C(pI - A)^{-1} \cdot B \cdot \bar{U}(p) \quad (4)$$

Матрица размера $1 \times n$ с коэффициентами, зависящими от p (комплексной переменной) $C(pI - A)^{-1} \cdot B = K(p)$, имеет смысл матричной передаточной функции вида

$$K(p) = [K_1(p), \dots, K_n(p)]. \quad (5)$$

Легко проследить, что

$$Y(p) = [K_1(p) \dots K_n(p)] \begin{bmatrix} U_1(p) \\ U_2(p) \\ \dots \\ U_n(p) \end{bmatrix} = \sum_{i=1}^n K_i(p) U_i(p), \quad (6)$$

где $K_i(p)$ - передаточная функция с i входа на выход; $K_i(p)$ - представляют собой дробно-рациональные функции многочленов, стоящих в числителе и знаменателе и зависящих от коэффициентов матриц A , B и C .

Полюса $K_i(p)$ определяются соответствующими числами матрицы A .

Если обозначить соответствующие оригиналы

$$h_i(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\sigma-\infty}^{\sigma+\infty} K_i(p) e^{pt} dp,$$

то можно считать, что этот набор функций определяет **матричную импульсную характеристику системы**, т.е.

$$G(t) = [h_1(t) \dots h_n(t)] \quad (7)$$

а функции $h_i(t)$ считать парциальными импульсными характеристиками по i -входу.

Выражение (6) можно интерпретировать как декомпозицию произвольной линейной системы с постоянными параметрами, описываемую обыкновенными дифференциальными уравнениями и имеющую n - входов и один выход.

Такая система может быть представлена блок-схемой в следующем виде (рис. 1).

Можно обобщить эту модель на все линейные стационарные системы, в том числе описываемые не только обыкновенными дифференциальными уравнениями, поскольку для всех них также можно представить связь n входов и одного выхода через парциальные передаточные функции, образующие матричную импульсную характеристику (7). Только в этом случае $K_i(p)$ не будут дробно-рациональными функциями переменной p .

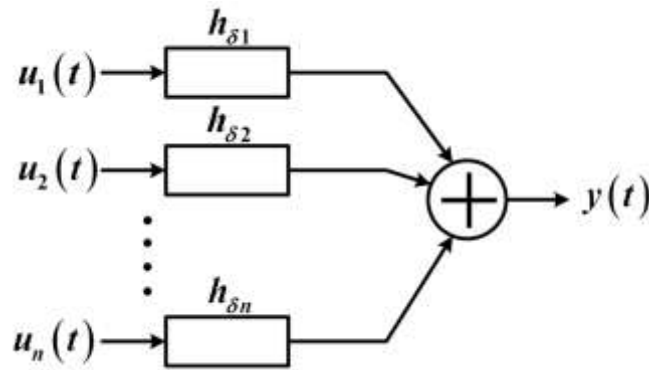


Рис. 1. Модель матричного резонатора общего вида

Покажем, что когда на входах системы действуют сигналы $s_1(t)s_2(t).....s_n(t)$, которые связаны с парциальными импульсными характеристиками соотношением

$$u_i(t) = h_i(T - t) 1(T - t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \tag{8}$$

то на выходе будет иметь место экстремальный отклик, т.е. будет иметь место матричный резонанс в том смысле, который сформулирован в теореме о матричном резонансе.

Сначала рассмотрим (8) в частотной области. Для этого применим преобразование Лапласа и учтем зеркальность по времени функции в правой части. При вычислении получим следующее выражение через матричную передаточную функцию системы;

$$U(p) = K^*(p)e^{pT} = -C(pI + A)^{-1} \cdot B e^{pT}. \tag{9}$$

Это решение может рассматриваться и как решение вариационной задачи на множестве всех функций входных сигналов при фиксированной энергии каждого из них. При этом вариация должна осуществляться как формой каждого сигнала, так и числом ненулевых сигналов, добиваясь уникального сочетания сигналов на n входах, обеспечивающего появление непредсказуемого резонансного значения сигнала на выходе системы. Выражение для сигнала на выходе системы при этом будет иметь вид

$$y(t) = [u_1(t)u_2(t).....u_n(t)] \otimes \begin{bmatrix} h_{1\delta}(t) \\ h_{2\delta}(t) \\ \dots\dots\dots \\ h_{n\delta}(t) \end{bmatrix}, \tag{10}$$

или
$$y(t) = \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^t u_i(\tau)h_{i\delta}(T - \tau)d\tau, \tag{11}$$

где $u_1(t)u_2(t).....u_n(t)$ -входные сигналы; $h_k(t)$ –импульсные характеристики. Приведенное решение для многих систем может дать в качестве сигнала физически не реализуемую функцию (например, монотонно возрастающую до бесконечности). Далее мы приведем особенности решения с учетом требования финитности находимого решения.

Каждый из возможных входных сигналов $u_i(t) = 0$ при $t \leq 0$. При образовании импульсной характеристики из такого сигнала с помощью его «зеркального» отображения и сдвига на величину T эта характеристика $h_i(t) = 0$ при $t \geq T$. Эта оговорка не может заменить строго математического представления импульсной характеристики на временном ин-

тервале в бесконечных пределах. Такое представление может быть сделано с помощью «окна» вида $[1(t) - 1(t - T)]$, умноженного на функцию входного сигнала, т.е

$$u_1(t) \cdot [1(t) - 1(t - T)].$$

Тогда в общем случае:

1. Функция сигнала и его изображение будут иметь вид

$$u_1(t) \square K^*(p) = \frac{A(p)}{B(p)} = \frac{A(p)}{(p - \alpha_1)(p - \alpha_2) \cdots (p - \alpha_n)}, \quad (12)$$

где $K^*(p)$ - изображение сопряженного комплекса передаточной функции системы, которая имеет вид

$$K(p) = U_1^*(p) \cdot e^{-pT}. \quad (13)$$

2. Функция «окна» и его изображение:

$$1(t) - 1(t - T) \square \frac{1}{p} (1 - e^{-pT}). \quad (14)$$

3. Изображение произведения функций входного сигнала и «окна» с использованием вычетов в полюсах будет иметь вид

$$\begin{aligned} F(p) &= F[u_1(t) \cdot (1(t) - 1(t - \tau))] = \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda - j\omega}^{\lambda + j\omega} F_1(z) \cdot F_2(p - z) dz = \\ &= \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda - j\omega}^{\lambda + j\omega} \frac{A(z)}{(z + \alpha_1)(z + \alpha_2) \cdots (z + \alpha_n)} \cdot \frac{1 - e^{-(p-z)T}}{(p - z)} dz = \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda - j\omega}^{\lambda + j\omega} \frac{\varphi(z)}{q(z)} dz, \quad (15) \end{aligned}$$

где $\varphi(z) = A(z)[1 - e^{-(p-z)T}]$; $q(z) = (z + \alpha_1)(z + \alpha_2) \cdots (z + \alpha_n)(p - z)$.

Корни знаменателя: $z_1 = -\alpha_1$, $z_2 = -\alpha_2$, $\cdots z_n = -\alpha_n$, $z_{n+1} = p$.

Тогда изображение Лапласа для финитной функции входного сигнала:

$$\begin{aligned} U_1(p) &= \text{Res}(z = z_1) + \text{Res}(z = z_2) + \cdots + \text{Res}(z = z_n) + \text{Res}(z = z_{n+1}) = \\ &= \left. \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \right|_{z = z_1} + \left. \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \right|_{z = z_2} + \cdots + \left. \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \right|_{z = z_n} + \left. \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \right|_{z = z_{n+1}} \quad (16) \end{aligned}$$

В частном случае, входной сигнал $u_1(t)$ при ограничении его длительности в интервале $[0, T]$ будет иметь вид $u_1(t)[1(t) - 1(t - T)]$, примем $f_1(t) = u_1(t) = e^{-\alpha t} \square \frac{1}{p + \alpha}$;

$$f_2(t) = [1(t) - 1(t - T)] \square \frac{1}{p} - \frac{1}{p} e^{-pT} = \frac{1 - e^{-pT}}{p}. \quad (17)$$

$$F_1(p) = \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda-j\omega}^{\lambda+j\omega} \frac{1}{(z+\alpha)} \cdot \frac{1-e^{-(p-z)T}}{(p-z)} dz = \frac{1}{2\pi j} \int_{\lambda-j\omega}^{\lambda+j\omega} \frac{\varphi(z)}{q(z)} dz. \quad (18)$$

$$\varphi(z) = 1 - e^{-(p-z)T}; q(z) = (z+\alpha)(p-z) = zp - z^2 + \alpha p - \alpha z, \quad (19)$$

где корни $z_1 = -\alpha$, $z_2 = p$.

$$F_1(p) = F[f_1(t) \cdot f_2(t)] = \text{Res}(z = z_1) + \text{Res}(z = z_2) = \frac{\varphi(z = z_1)}{q'(z = z_1)} + \frac{\varphi(z = z_2)}{q'(z = z_2)} = \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_1} + \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_2} \quad (20)$$

$$q'(z) = p - 2z - \alpha; \quad q'(z = z_1 = -\alpha) = p + 2\alpha - \alpha = (p + \alpha)$$

$$q'(z = z_2 = p) = p - 2p = \alpha = -(p + \alpha)$$

$$F(p) = F[f_1(t) \cdot f_2(t)] = \frac{1 - e^{-(p+\alpha)T}}{p + \alpha} + \frac{\left(1 - e^{-(p-p)T}\right)^{\square=0}}{-(p + \alpha)} = \frac{1 - e^{-(p+\alpha)T}}{p + \alpha}, \quad (21)$$

где

$$F[f_1(t) \cdot f_2(t)] = \frac{1 - e^{-(p+\alpha)T}}{p + \alpha}.$$

Таким образом, для системы с заданной передаточной функцией резонансный финитный сигнал будет иметь вид

а) в общем случае:

$$U_1(p) = \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_1} + \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_2} + \dots + \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_n} + \frac{\varphi(z)}{q'(z)} \Big|_{z = z_{n+1}}. \quad (22)$$

$$\text{При этом будет выполняться } K(p) = U_1^*(p) \cdot e^{-pT}; \quad (23)$$

б) в частном случае, в качестве примера покажем, что системы с нерациональными передаточными функциями могут иметь простые резонансные сигналы.

$$\text{Пусть } K(p) = \frac{e^{-\alpha T} - e^{-pT}}{p + \alpha}. \quad (24)$$

Тогда резонансный сигнал $u_1(t) = e^{-\alpha t}$. Покажем это:

$$U_1(p) = \frac{1 - e^{-(p+\alpha)T}}{p + \alpha}. \quad (25)$$

Заменив p на $-p$, в силу сопряженности комплекса получим

$$U_1^*(p) = \frac{1 - e^{-(p+\alpha)T}}{-p + \alpha} = \frac{1 - e^{(p-\alpha)T}}{-p + \alpha} \quad (26)$$

$$K(p) = U_1^*(p) \cdot e^{-pT} = \frac{1 - e^{(p-\alpha)T}}{-p + \alpha} e^{-pT} = \frac{e^{-pT} - e^{-\alpha T}}{-p + \alpha} = \frac{e^{-\alpha T} - e^{-pT}}{p - \alpha}. \quad (27)$$

Покажем теперь, что найденное решение для сигнала, названного резонансным, имеет экстремальное свойство. Для любой парциальной системы можно записать

$$y_j(t) = k \int_0^t u_j(\tau) h_{\delta_j}(t-\tau) d\tau_{h_{\delta_j}(t-\tau)=0 \text{ при } \tau > t} = k B_{u_j h_{\delta_j}}(t) \quad (28)$$

где $B_{u_j h_{\delta_j}}(t)$ – взаимнокорреляционная функция сигнала $u_i(t)$ и импульсной характеристики любого канала системы, характеризующая их взаимную энергию; $k \geq 1$ – это коэффициент пропорциональности.

Коэффициент пропорциональности является фиксированной величиной для линейной системы и связан с определением импульсной характеристики, размерность которой 1/с. Когда мы говорим, что подаем на вход сигнал, равный зеркальной импульсной характеристике, то имеем в виду, что совпадают формы, а равенство существует с некоторым коэффициентом размерности (с). Физический смысл этого коэффициента обычно связывают с временем интегрирования в системе, т.е. с длительностью импульсной характеристики. Этот коэффициент будет присутствовать и в равенствах, содержащих ВКФ и АКФ

Максимальное значение сигнала на выходе линейной системы с одним входом и одним выходом при резонансе формы будет

$$y(T) = \frac{k}{2\pi} \int_0^T U_i^2(\omega) d\omega = k E_s > y(t) \text{ для } t \neq T \quad (29)$$

т.е. в том случае, когда сигнал описывается функцией, являющейся зеркальной во времени функции импульсной характеристики парциального канала. Тогда парциальный выходной сигнал воспроизводит во времени сдвинутую АКФ входного сигнала, причем так, что максимум на выходе достигается в момент T_i . По определению АКФ сигнала конечной длительности имеет размерность энергии в точке T_i и равна энергии сигнала. Это определяет максимально возможное пиковое значение в канале.

Если входные сигналы окажутся такими, что для каждого парциального канала будут выполнены условия (29) для одного и того же момента времени T , то на выходе образуется сигнал с пиковым значением, равным сумме пиковых значений каждого из парциальных каналов, пропорциональный сумме энергий входных сигналов:

$$y(T) = k B_{\max} = \sum_{i=1}^{i=n} \int_0^T u_i(t) h_{\delta_i} dt \geq \max [u_{k_{\max}}(T)], \quad (30)$$

где индекс k_{\max} относится к максимальному входному сигналу одного из каналов. В матричной форме выражение для выходного сигнала будет иметь вид

$$Y(p) = K^*(p) e^{pT} \cdot U(p) = -C(pI - A)^{-1} \cdot B e^{pT} U(p) / \quad (31)$$

Очевидно, что большего пикового значения, чем указанное в выражении (30) на выходе данной линейной системы при фиксированной энергии входных сигналов, получить невозможно.

Выводы

В линейной стационарной системе с n входами (при $n > 1$) и одним выходом возможен резонанс формы сигнала, при котором значение выходного сигнала в момент отсчета будет больше или равно значению максимального из входных сигналов, т.е. матричный резонанс в линейной системе с многополюсным входом и одиночным выходом возможен.

-
1. **Зельманов, С.С.** Исследование явления резонанса формы сигнала в согласованном фильтре / // Электросвязь. 2011. №1.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

S.S. Zelmanov

FROM MATRIXER RESONANCE

The possibility of the resonance form existence in the liner stationary dynamic system with n inputs and one output by the action of the vector signal totality with the composite designs is presented in this article. The peculiarity of such resonance as the characteristic of the external system state is its reality by the absence of the frequency resonance signs in the system. This peculiarity is extremely sensational by the search in the system of the resonance phenomenon's which are connected with its possible negative consequences. Key words: resonance forms, partial impulse characteristics matrix resonator, vector total combination of input signals, external state of the system.

Key words: resonance forms, partial impulse characteristics matrix resonator, vector total combination of input signals, external state of the system.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 534.222

И.Н. Диденкулов¹, А.И. Мартьянов², Н.В. Прончатов-Рубцов², В.А. Тихонов^{1,2}

ИССЛЕДОВАНИЕ КАВИТАЦИИ В ПЛОСКОМ АКУСТИЧЕСКОМ РЕЗОНАТОРЕ

Институт прикладной физики РАН, Нижний Новгород¹,
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского²

Приводятся результаты экспериментального исследования акустической кавитации, развивающейся в плоском открытом резонаторе. Выполнены измерения интенсивности кавитационного шума в разных режимах поля накачки. Теоретически рассмотрены особенности распределения пузырьков в резонаторе с течением жидкости.

Ключевые слова: кавитация, плоский резонатор, пузырьки, шум, измерения, поток жидкости, группировка пузырьков.

Введение

Акустическая кавитация – появление пузырьков в жидкости под действием акустического поля – является предметом исследования в течение многих лет [1-6]. Исследованию поведения пузырьков в акустических полях посвящено много работ. Газовые пузырьки, в том числе возникающие в процессе кавитации жидкости, используются в различных технологических процессах, в частности, в сонохимических реакциях и при изучении сонолюминесценции [7–10]. Необходимо отметить возрастающую роль пузырьков в медицинских приложениях: использование методов ультразвуковой диагностики биологических объектов, основанных на контрастных агентах [11], а также способы точной доставки лекарств к нужному органу человека с помощью пузырьков при минимальном воздействии на другие органы. Несмотря на широкое практическое использование кавитации, до настоящего времени далеко не все вопросы разрешены. Это связано со сложностью и многообразием процессов взаимодействия пузырьков с акустическим полем и между собой. Исследований кавитационных явлений в акустических резонаторах сравнительно немного. В то же время в стоячей волне акустического резонатора можно создать контролируемые условия для наблюдения за поведением пузырьков.

Целью данной работы было экспериментальное исследование процессов, происходящих в условиях существования кавитации в стоячей волне, и создание теоретической модели для описания поведения пузырьков в плоском резонаторе с движущейся жидкостью.

Экспериментальное изучение кавитации в плоском резонаторе

Изучение кавитации проводилось в открытом плоском акустическом резонаторе. Для наблюдения кавитационных процессов использовались дополнительная акустическая система и фототехника. Экспериментальная установка показана на рис. 1. Плоский открытый резонатор состоит из плоской акустической антенны со встроенным в нее акустическим преобразователем (в верхней части рис. 1) и плоского отражателя (в нижней части рисунка). Отра-

жатель был выполнен из плотного пенопласта, что обеспечивало коэффициент отражения звука от него, близкий к минус единице.

Дополнительная акустическая система представляет собой фокусирующее акустическое зеркало, также выполненное из пенопласта, и точечный акустический приемник- гидрофон, размещенный в сопряженной точке по отношению к точке на оси резонатора (рис. 1). Кроме того, с противоположной стороны резонатора можно было поместить дополнительный точечный акустический излучатель. В этом случае пробное акустическое поле от этого излучателя проходило через кавитационную зону и после отражения от фокусирующего зеркала попадало на гидрофон (режим «зондирование»). Дополнительная акустическая система позволяла осуществлять сканирование вдоль оси и поперек акустического резонатора. Фотография акустической установки приведена на рис. 2.

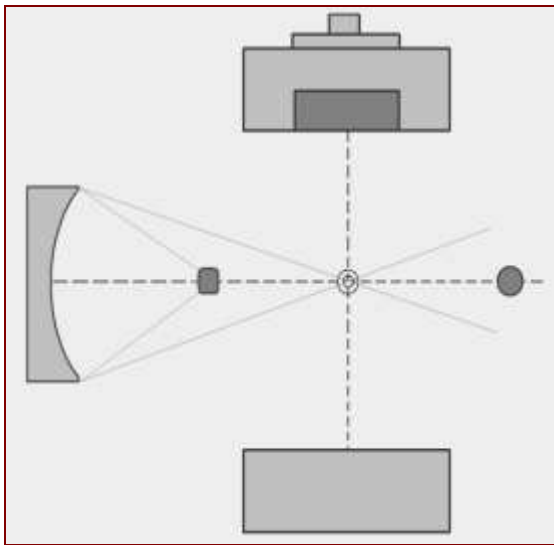


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

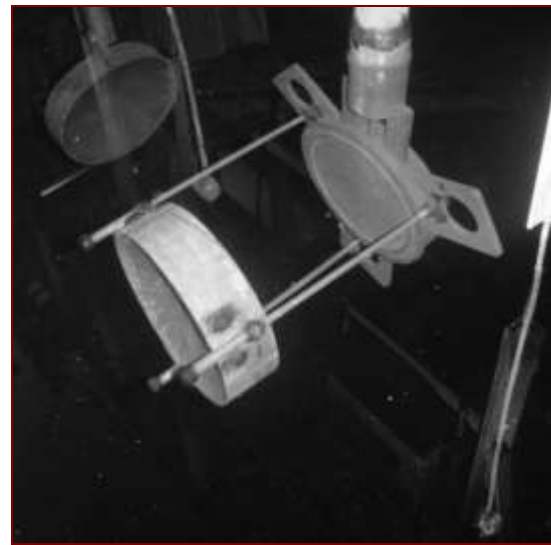


Рис. 2. Фото экспериментальной установки

Помимо измерения акустического шума из области кавитации дополнительная акустическая система в режиме «прием» позволяла измерять распределение акустического поля в резонаторе. Для этого в резонатор вводился специальный рассеиватель – металлический шарик диаметром 2 мм.

Известно, что кавитация возникает, если интенсивность акустического поля превышает определенный порог [1–6]. Начало кавитации можно определить по возникновению специфического акустического шума. На рис. 3 представлен спектр шума из области кавитации. В спектре четко проявляются пики на частотах, соответствующих сериям nf_0 ($n = 1, 2, 3, \dots$) и $(m-1/2)f_0$ ($m = 1, 2, 3, \dots$), где f_0 – частота накачки. В нашем случае частота поля накачки в резонаторе составляла $f_0 = 156,435$ кГц. Подобный вид спектра кавитационного шума отмечался и в других экспериментах [2, 3, 6].

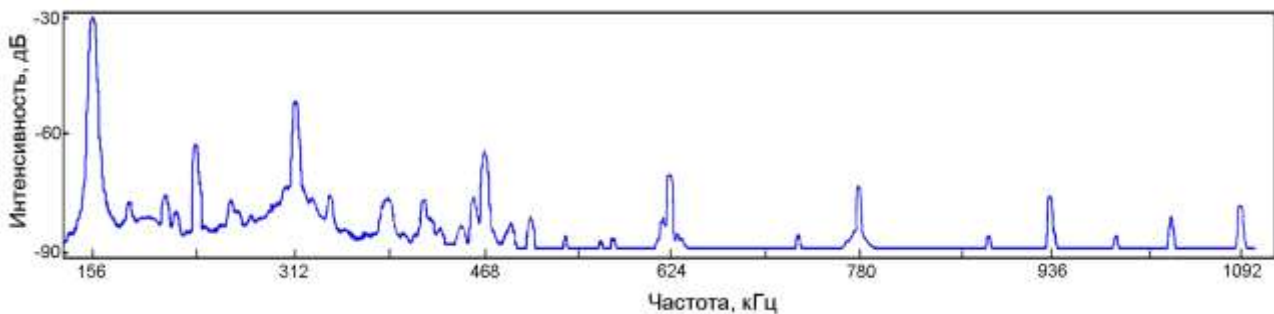
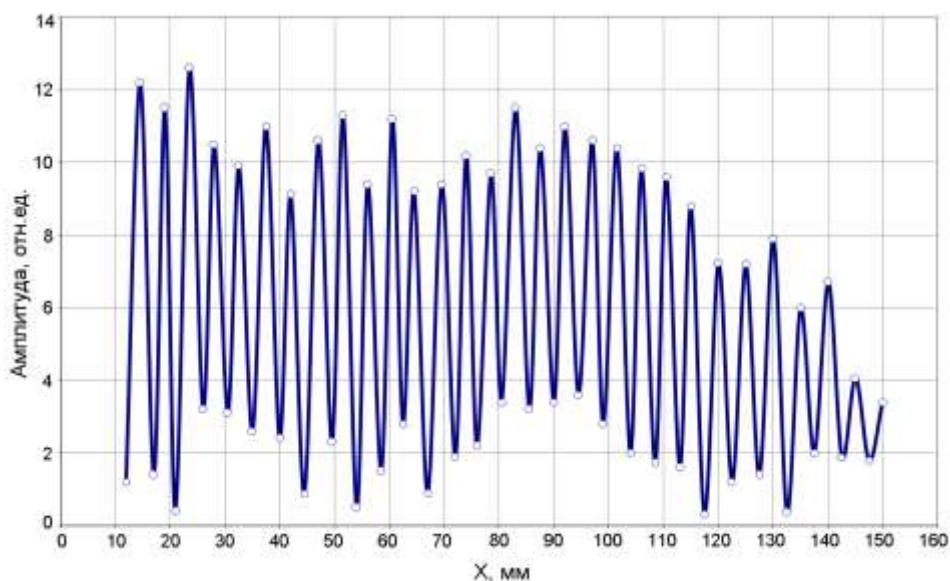


Рис. 3. Спектр кавитационного шума

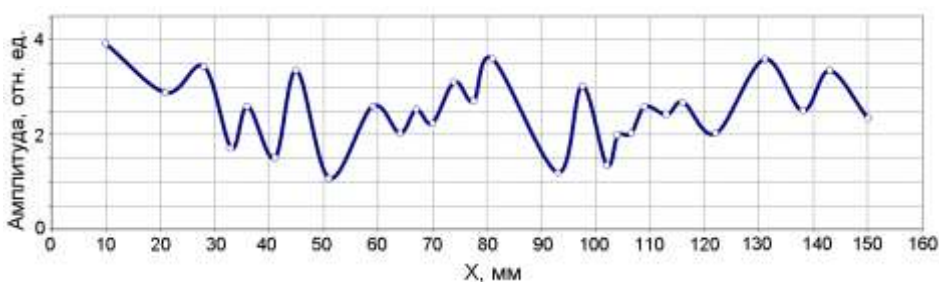
Методика измерения пространственного распределения поля в резонаторе в докавитационном режиме заключалась в измерении амплитуды рассеянного на рассеивателе – металлическом шарике сигнала при продольном проходе вдоль оси резонатора. Результат измерений представлен на рис. 4.



**Рис. 4. Продольное распределение поля в резонаторе в докавитационном режиме.
Частота 156.435 кГц**

При увеличении мощности накачки и возникновении кавитации проводились измерения распределения интенсивности шума вдоль оси резонатора на частоте накачки. Результаты представлены на рис. 5.

Из сравнения данных на рис. 4 и рис. 5 видно, что в докавитационном режиме в резонаторе существует стоячая волна (рис. 4). В кавитационном режиме структура стоячей волны начинает разрушаться (рис. 5). Это связано с тем, что кавитационные пузырьки влияют на скорость и поглощение звука в резонаторе.



**Рис. 5. Структура поля в резонаторе на первой гармонике (156.435 кГц)
в кавитационном режиме**

С помощью дополнительной акустической системы проводилось измерение продольных разрезов интенсивности кавитационного шума (в режиме «прием») и коэффициента ослабления пробного сигнала на разных частотах (в режиме «зондирование»). На рис. 6 и рис. 7 приведены примеры таких разрезов для частоты 1070 кГц (7-я гармоника частоты накачки).

Сложный характер распределения интенсивности шума и коэффициента ослабления пробной волны на частоте 1070 кГц связан с неравномерным распределением концентрации кавитационных пузырьков и акустическими течениями. На рис. 6 и рис. 7 слабо просматри-

ваются структура стоячей волны в резонаторе. Из полученных зависимостей видно хорошее согласование графиков интенсивности шума и коэффициента ослабления. Действительно, в областях с максимальным коэффициентом ослабления имеется максимальный шумовой сигнал, так как величины этих параметров зависят от концентрации пузырьков.

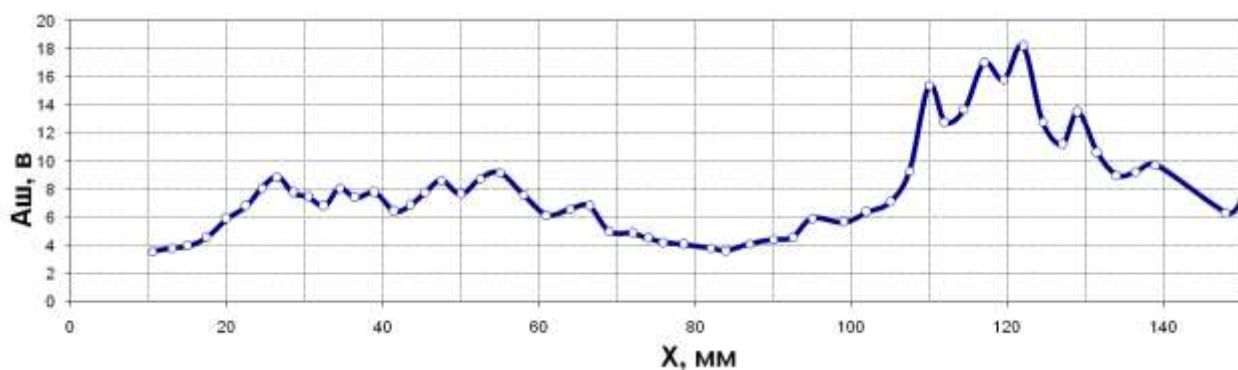


Рис. 6. Продольный разрез интенсивности кавитационного шума на частоте 1070 кГц

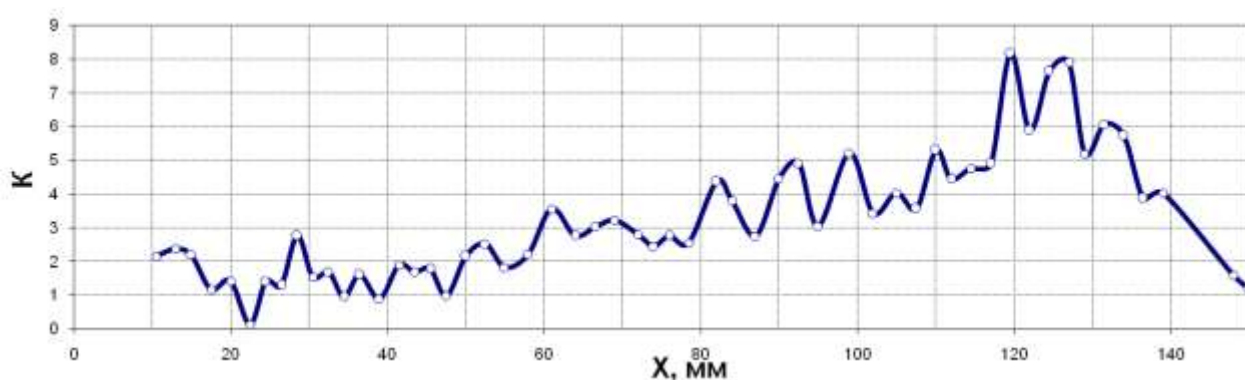


Рис. 7. Продольный разрез коэффициента ослабления пробной волны на частоте 1070 кГц

Как известно, интенсивная кавитация протекает с образованием пузырьков достаточно большого размера, вызванных процессом дегазации жидкости, при определенных условиях эти пузыри начинают всплывать. В стоячей волне начало кавитации естественно ожидать в пучностях поля, поэтому можно надеяться увидеть всплывающие пузырьки именно из этих областей. С этой целью установка оборудовалась плоским плексигласовым экраном, под которым удерживались всплывающие пузырьки. Наблюдалось всплытие пузырьков непрерывным потоком, налипая на экране, они образовывали области с периодом 4,6 мм, соответствующем периоду стоячей волны. Области представляли собой полосы состоящие из пузырьков различного размера (рис. 8).



Рис. 8. Фото всплывающих пузырьков из областей кавитации
Распределение пузырьков в проточном акустическом резонаторе

Известно, что на пузырек радиуса R , находящийся в звуковом поле, действует акустическая радиационная сила, обусловленная градиентом интенсивности поля. Эта сила обеспечивает движение пузырьков в акустических полях. В предположении малости монопольных колебаний пузырька в акустическом поле ($\Delta R \ll R_0$, $\Delta R = R - R_0$) акустическая сила записывается в виде [7]

$$\vec{F}_{\text{ак}} = -\frac{4\pi}{3} R_0^3 \left(1 - \frac{3p}{\rho R_0^2 (\omega^2 - \omega_0^2)} \right) \cdot \nabla p, \quad (1)$$

где p – акустическое давление; ω_0 – резонансная частота малых монопольных колебаний пузырька радиуса R_0 ; ρ – плотность жидкости.

Пусть в плоском резонаторе длиной L с акустически абсолютно жёсткими стенками возбуждается стоячая звуковая волна. Будем считать, что через резонатор прогоняется поток жидкости с постоянной скоростью V , направленной вдоль оси x (рис. 9).



Рис. 9. Схема задачи

На пузырек, находящийся в потоке жидкости, действуют две силы: акустическая радиационная сила со стороны поля и гидродинамическая – со стороны потока жидкости (силой Архимеда и силой тяжести пренебрегаем). Гидродинамическая сила со стороны потока при малых числах Рейнольдса имеет следующий вид [12]:

$$F_{\text{гид}} = 6\pi R_0 \eta (V - V_n), \quad (\text{Re} = \rho |V - V_n| R_0 / \eta \ll 1), \quad (2)$$

где V_n – скорость пузырька; η – коэффициент динамической вязкости.

Рассмотрим случай, когда сила со стороны потока превышает радиационную силу со стороны акустического поля. При этом условии газовый пузырёк будет совершать движение вдоль оси резонатора. Тогда уравнение движения пузырька принимает вид

$$m a = F_{\text{гид}} + F_{\text{ак}}.$$

где $m = 2/3 \rho \pi R_0^3$ – присоединенная масса для поступательного движения пузырька.

Подставив выражения для акустической и гидродинамической сил, действующих на пузырек, запишем уравнение движения газового пузырька в проточном резонаторе:

$$\ddot{x} = \frac{6\pi R_0 \eta}{m} (V - \dot{x}) - \frac{4\pi}{3} R_0^3 \left(1 - \frac{3p}{\rho R_0^2 (\omega^2 - \omega_0^2)} \right) \cdot \nabla p, \quad (3)$$

где x – координата движения пузырька.

Уравнение движения пузырька (3) рассчитывалось численными способами с применением метода Рунге-Кутты 4-го порядка для системы линейных уравнений первого порядка.

С помощью данного метода были получены траектории пузырьков при их движении вдоль оси резонатора (рис. 10).

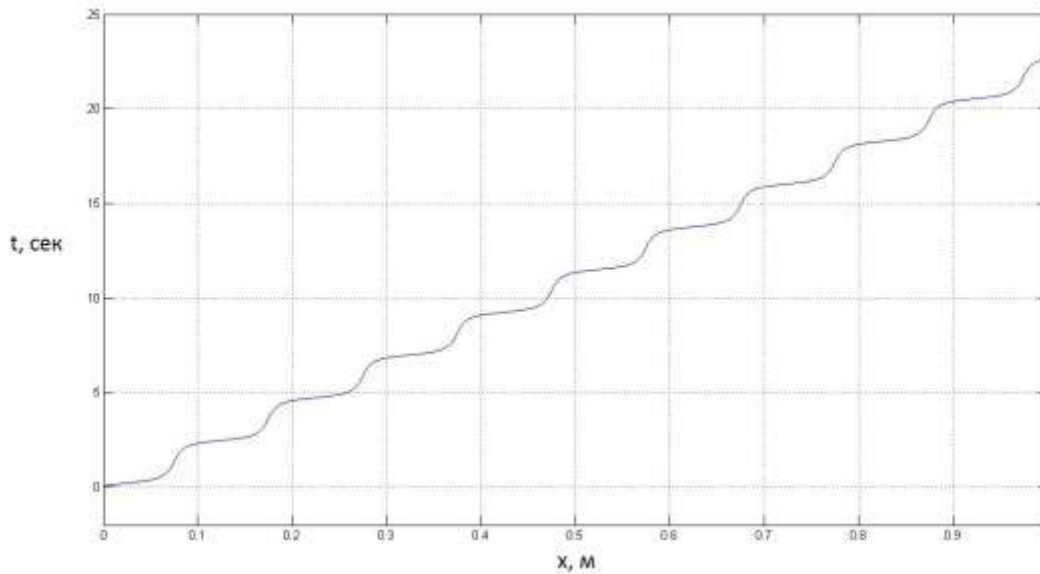


Рис. 10. Характерная траектория пузырька в поле стоячей волны резонатора

Теперь допустим, что в резонатор через определенный период времени запускается не один, а множество пузырьков. В зависимости от соотношения между акустической и гидродинамической сил в резонаторе будет происходить группировка (увеличение концентрации) пузырьков либо дегруппировка (разрежение, уменьшение концентрации). Для описания данного явления удобно воспользоваться понятием функции группировки, характеризующей изменение расстояния между двумя пузырьками при движении вдоль резонатора:

$$f(t, x_0) = \frac{dx_n}{dx_0} = \frac{dx_n}{dx_0} \frac{dt}{dt} = \frac{dx_n}{dt} \frac{1}{V_n(x=0)}. \quad (4)$$

При $f < 1$ – происходит группировка пузырьков, при $f > 1$ – дегруппировка пузырьков.

Используя понятие функции группировки $f(x,t)$, можно выразить изменение концентрации пузырьков вдоль движения резонатора в зависимости от соотношения акустической и гидродинамической сил, действующих на газовый пузырек в проточном резонаторе:

$$n(x) = \frac{n_0}{f(t, x_0)} = \frac{n_0}{1 + \bar{\xi} \text{grad}|p|^2}, \quad (5)$$

где $\bar{\xi} = \bar{A}/\alpha V$ – отношение амплитуд акустической и гидродинамической сил. При выводе выражения для взаимосвязи концентрации пузырьков и функции группировки делалось несколько предположений: что пузырьки вводятся в резонатор равномерно, отсутствует разброс пузырьков по размерам, поле в резонаторе имеет вид чисто стоячей волны.

Интересно рассмотреть случай, когда приведенные условия не выполняются. Если данные условия не выполняются, возникает вопрос о правомерности использования функции группировки для описания изменения концентрации пузырьков. Учтем неравномерность ввода пузырьков в резонатор. До этого предполагалось, что пузырьки равномерно, со строго определенным периодом поступают в резонатор. Теперь допустим, что время ввода пузырька представляет собой равномерный период со случайной добавкой, распределенной по нормальному закону с некоторым разбросом по времени:

$$t_{\text{ввода}} = n dt + dt_{\text{случ}}. \quad (6)$$

Численными методами были рассмотрены случаи группировки пузырьков при повышении относительного разброса времени ввода:

$$\sigma_{dt\text{случ}}/dt. \quad (7)$$

Для описания характерного отклонения концентрации пузырьков от функции группировки использовалась нормированная величина среднеквадратичного отклонения (СКО) между производной от траектории пузырька по координате и найденной численными методами концентрацией пузырьков в резонаторе. СКО усреднялась по нескольким реализациям:

$$A_{\text{норм}} / \left\langle \sqrt{\sum_i (n(x_i) - \alpha \frac{dx_i}{dt})^2} \right\rangle. \quad (8)$$

На рис. 11 представлена зависимость величины СКО между производной от траектории и концентрацией пузырька (8) от относительного разброса времени ввода пузырька в резонатор (7).

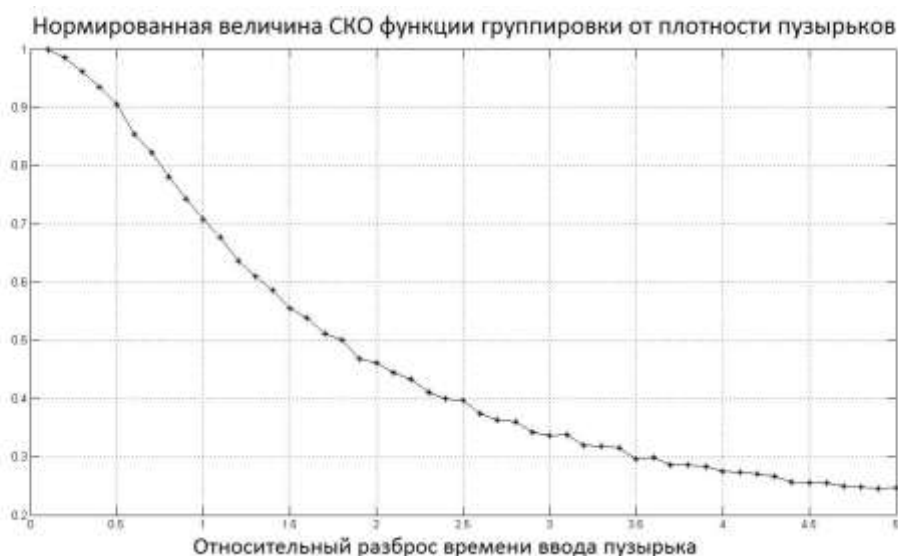


Рис. 11. Нормированная величина СКО между функцией группировки и плотностью пузырьков

Из рис. 11 видно, что приемлемый случайный разброс времени ввода пузырька в резонатор не должен превышать 0,5 от величины самого периода ввода. При данных условиях представляется возможным применять понятие функции группировки для описания изменения концентрации пузырьков в резонаторе.

Далее учтем разброс вводимых в резонатор пузырьков по размерам. Предположим, что функция распределения пузырьков по размерам имеет вид R^{-3} . Численный расчет показал, что если все резонансные частоты пузырьков ω_0 лежат выше частоты звуковой волны в резонаторе, т.е. $\omega \ll \omega_0$, то разброс пузырьков по размерам не влияет на изменение группировки пузырьков в резонаторе.

Однако численными методами был подтвержден другой интересный эффект. Наличие разброса пузырьков по размерам отражается на изменении траектории пузырьков. Чем больше пузырек, тем сильнее на него воздействует радиационная сила со стороны акустического поля и тем сильнее он задерживается в резонаторе. Это обстоятельство свидетельствует о «селективном» свойстве акустического проточного резонатора с пузырьками: относительная доля пузырьков большего размера в резонаторе повышается по отношению к их начальному распределению на входе резонатора. На рис. 12 данный эффект проиллюстрирован для случая равномерного распределения пузырьков по размерам на входе резонатора.

Явным образом видно изменение концентрации пузырьков больших размеров в сечении резонатора по сравнению с их начальным распределением на входе резонатора. Наиболее сильно данный эффект проявляется в местах сгущений пузырьков, так как в данной области воздействие акустической силы на пузырек максимально. В итоге, доля пузырьков больших размеров в сгустке повышается.

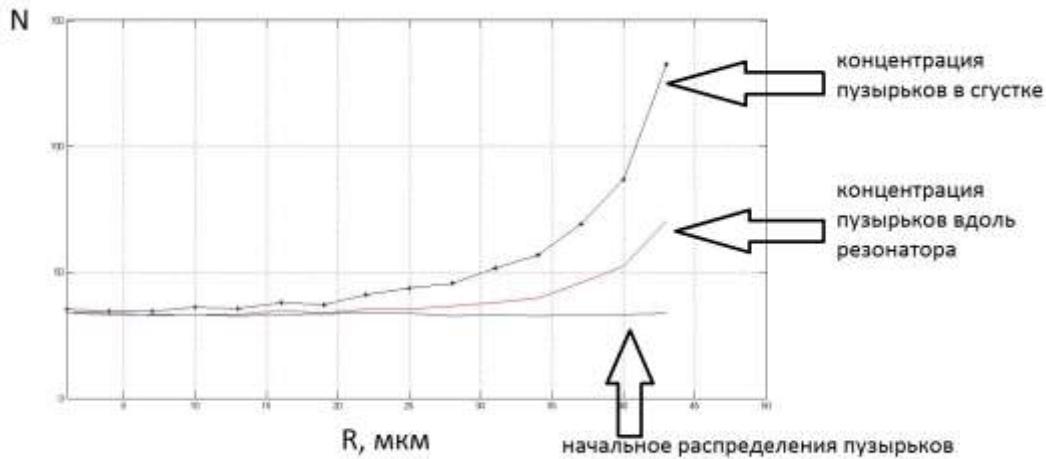


Рис. 12. «Избирательный» эффект проточного резонатора. Эффект заметным образом усиливается в местах сгущений пузырьков

Выводы

Таким образом, разработанная установка позволила исследовать структуру поля в резонаторе. Изучено влияние акустической кавитации на структуру стоячей волны. Проведенное экспериментальное исследование кавитации в открытом плоском акустическом резонаторе показало, что кавитация возникает сначала в пучностях стоячей волны, а по мере увеличения накачки и развития кавитационного процесса постепенно разрушается структура стоячей волны. По измерению ослабления пробного акустического пучка, проходящего через кавитирующую область, а также по интенсивности кавитационного шума получено пространственное распределение интенсивности кавитации на различных стадиях ее развития. Теоретически рассмотрена задача о распределении концентрации пузырьков в проточном акустическом резонаторе. Показано, что в нем сохраняется периодическая структура концентрации пузырьков. Выявлен эффект «затягивания» больших пузырьков в проточном резонаторе: относительная доля пузырьков большего размера в резонаторе повышается по отношению к их начальному распределению на входе резонатора.

Работа выполнена при поддержке Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (контракт № 02.740.11.0565), грантов РФФИ № 11-02-00774 и государственной поддержке ведущих научных школ НШ-3700.2010.2.

Библиографический список

1. Мощные ультразвуковые поля / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1968.
2. **Перник, А.Д.** Проблемы кавитации / А.Д. Перник. – Л.: Судостроение, 1966.
3. **Рождественский, В.В.** Кавитация / В.В. Рождественский. – Л.: Судостроение, 1977.
4. **Федоткин, И.М.** Использование кавитации в технологических процессах / И.М. Федоткин, А.Ф. Немчин. – Киев: Вища шк., 1984. – 68 с.
5. Физические основы ультразвуковой технологии / под ред. Л.Д. Розенберга. – М.: Наука, 1970. – 789 с.

6. **Сиротюк, М.Г.** Акустическая кавитация / М.Г. Сиротюк. – М.: Наука, 2008.
7. **Leighton, T.G.** The acoustic bubble / T.G. Leighton. – London: Academic Press, 1994. – 613 p.
8. **Lauterborn, W.** Adv. Chem. Phys / W. Lauterborn, T. Kurz, R. Mettin, C.D. Ohl. 1999. Vol. 110. Pp. 295–380.
9. **Greenland, P.T.** // Contemp. Phys. 1999. Vol. 40. P. 11–30.
10. **Wu, C.C.** // Phys. Rev. Lett / C.C. Wu , P.H. Roberts. 1993. Vol. 70. P. 3424.
11. **Goldberg, B.B.** Ultrasound Med. Biol / B.B. Goldberg, J.B. Liu, F. Forsberg. 1994. Vol. 20. P. 319–325.
12. **Ландау, Л.Д.** Гидродинамика / Л.Д. Ландау, Е.М. Лифшиц. – М.: Наука, 1986. – 736 с.

*Дата поступления
в редакцию 14.10.2011*

I.N. Didenkulov, A.I. Martyanov, N.V. Pronchatov-Rubtsov, V.A Tikhonov

STUDY A CAVITATION IN A PLANE ACOUSTIC RESONATOR

Results of experimental investigation of acoustic cavitation in a plane open resonator are given. Measurements of the intensity of cavitation noise at different regimes of the pump field were done. It was theoretically considered features of bubble distribution in a resonator with current of fluid.

Key words: cavitation, plane resonator, bubbles, noise, measurements, current of liquid, bubble grouping.

УДК 537.86

Е.М. Громов, В.В. Тютин

**КОМПЕНСАЦИЯ ИНДУЦИРОВАННОГО РАМАНОВСКОГО РАССЕЙЯНИЯ
ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ КОРОТКИХ СОЛИТОНОВ
В НЕОДНОРОДНЫХ СРЕДАХ**

Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»

Рассмотрена динамика коротких солитонов огибающей в рамках уравнения Шредингера третьего порядка с учетом индуцированного рамановского рассеяния и неоднородности линейной дисперсии второго и третьего порядков, кубичной нелинейности и нелинейной дисперсии. В отсутствие неоднородности дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии показана возможность компенсации рамановского смещения волнового числа солитонов в длинноволновую область возрастающей дисперсией второго порядка, увеличивающей это волновое число. В адиабатическом приближении найдены устойчивые режимы распространения солитонов. Проанализировано влияние неоднородности линейной дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии на компенсацию эффекта индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов. Показано, что при учете либо достаточно медленного увеличения линейной дисперсии третьего порядка, либо уменьшения нелинейной дисперсии эффект компенсации индуцированного рамановского рассеяния при распространении коротких солитонов сохраняется.

Ключевые слова: индуцированное рассеяние Рамана, неоднородность, нелинейность, короткие солитоны огибающей.

Введение

Интерес к солитонам обусловлен возможностью их распространения на значительные расстояния с сохранением формы и переноса энергии и информации без значительных потерь. Солитонные решения возникают во многих нелинейных моделях различных областей физики при исследовании распространения интенсивных волновых полей в нелинейных диспергирующих средах: оптических импульсов в волоконных линиях связи, поверхностных волн на воде [1–3]. В оптике значительное внимание уделяется солитонам в оптических волокнах [4]. Распространение высокочастотных волновых пакетов достаточно большой протяженности может быть описано нелинейным уравнением Шредингера (NSE) [5–6], учитывающим линейную дисперсию второго порядка и кубичную нелинейность (*self-phase modulation*). Солитонное решение в этом уравнении возникает в результате баланса дисперсионного разбегания и нелинейного сжатия волнового пакета.

Уменьшение протяженности высокочастотных волновых пакетов приводит к необходимости учета в модельных нелинейных уравнениях членов более высокого (третьего) порядка малости, соответствующих как линейным абберационным эффектам (линейная дисперсия третьего порядка), так и нелинейным эффектам укрупнения (*stepping*) [7] и индуцированного рассеяния Рамана (*stimulated Raman-scattering*) [8]. Это приводит к нелинейному уравнению Шредингера третьего порядка (TNSE) [9–15] как базовому уравнению третьего приближения теории дисперсии нелинейных волн. В пренебрежении индуцированным рассеянием в этом уравнении солитонное решение возникает в результате баланса линейного абберационного искажения волнового импульса и нелинейных изменений, обусловленных нелинейной дисперсией (*self-stepping*). Известно, что учет индуцированного рамановского рассеяния приводит к смещению волнового числа солитонов в длинноволновую область [8]. В тоже время увеличение дисперсии второго порядка приводит к смещению волнового числа солитонов в коротковолновую область [16]. Совместное действие эффектов индуцированного рамановского рассеяния и неоднородной дисперсии второго порядка может стабилизиро-

вать волновое число солитона и привести к стационарному режиму распространения солитонов без изменения волнового числа.

В данной работе рассмотрена динамика коротких солитонов огибающей в рамках нелинейного уравнения Шредингера третьего порядка с учетом как индуцированного рамановского рассеяния, так и неоднородности дисперсии второго и третьего порядков, нелинейной дисперсией и кубичной нелинейности.

Основное уравнение

Рассмотрим динамику высокочастотного волнового поля $U(\xi, t)\exp(i\omega t - ik\xi)$ малой протяженностью (в несколько длин волн $kL \gtrsim 1$, k - волновое число, L - пространственная протяженность волнового поля) и малой длительности (в несколько периодов $\omega T \gtrsim 1$, ω - частота, T - протяженность волнового поля во времени) в рамках TNSE с переменными коэффициентами:

$$2i \frac{\partial U}{\partial t} + 2i\beta(\xi) \frac{\partial(|U|^2 U)}{\partial \xi} + \mu U \frac{\partial(|U|^2)}{\partial \xi} + q(\xi) \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} + 2\alpha(\xi) U |U|^2 + i\gamma(\xi) \frac{\partial^3 U}{\partial \xi^3} = 0, \quad (1)$$

где $q = -\partial^2 \omega / \partial k^2$ - коэффициент линейной дисперсии второго порядка; $\omega = \omega(k, |U|^2)$ - нелинейное дисперсионное соотношение; $\alpha = \partial \omega / \partial(|U|^2)$ - коэффициент кубичной нелинейности (*self-phase modulation*); $\gamma = -\partial^3 \omega / (3\partial k^3)$ - коэффициент линейной дисперсии третьего порядка (*third-order linear dispersion*); β - коэффициент нелинейной дисперсии (*self-stepping*), μ - коэффициент индуцированного рассеяния Рамана (*stimulated Raman-scattering*). В однородных средах при $\frac{dq}{d\xi} = \frac{d\alpha}{d\xi} = \frac{d\gamma}{d\xi} = \frac{d\beta}{d\xi} = 0$ и пренебрежении индуцированным рассеянием $\mu = 0$ уравнение (1) имеет солитонное решение

$$U(\xi, t) = \frac{A}{\cosh(A\varepsilon\xi)} \exp(i\Omega t + iK\xi),$$

где A - амплитуда солитона; $\varepsilon = \sqrt{\beta/\gamma}$, $K = (q\beta - \alpha\gamma) / 2\beta\gamma$ - добавочное волновое число; $V = (\beta A^2 + Kq - 3\gamma K^2 / 2) / 2$ - скорость движения солитона; $\Omega = \alpha A^2 + \frac{\alpha\gamma}{2\beta} K^2$ - добавочная частота солитона.

Изменение энергии волнового пакета в неоднородной среде

Умножим (1) на величину U^* , комплексно сопряженную к U , и сложим полученное уравнение с комплексно ему сопряженным. Интегрируя полученное уравнение по ξ от $-\infty$ до ∞ при нулевых условиях на бесконечности $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$, получим для скорости изменения энергии волнового пакета

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} |U|^2 d\xi = & -\frac{i}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{d\xi} \left(U^* \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial U^*}{\partial \xi} \right) d\xi - \\ & - 3 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\gamma}{d\xi} \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial U^*}{\partial \xi} d\xi + \frac{3}{2} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\beta}{d\xi} |U|^4 d\xi. \end{aligned} \quad (2)$$

Первое и второе слагаемые в правой части (2) отвечают изменению энергии волнового пакета, обусловленному неоднородностью линейной дисперсии второго и третьего порядков соответственно, третье - неоднородностью нелинейной дисперсии.

Изменение импульса волнового пакета в неоднородной среде

Продифференцируем (1) по ξ и умножим полученное уравнение на U^* . Складывая полученное уравнение с комплексно ему сопряженным и интегрируя полученное соотношение по ξ от $-\infty$ до ∞ при нулевых условиях на бесконечности $U|_{\xi \rightarrow \pm\infty} \rightarrow 0$, получим для скорости изменения импульса волнового пакета

$$\begin{aligned} 2i \frac{d}{dt} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(U^* \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial U^*}{\partial \xi} \right) d\xi &= \mu \int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} \right)^2 d\xi - 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\alpha}{d\xi} |U|^4 d\xi - \\ 2 \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dq}{d\xi} \frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial U^*}{\partial \xi} d\xi + \int_{-\infty}^{\infty} \frac{d\gamma}{d\xi} \left(\frac{\partial U}{\partial \xi} \frac{\partial^2 U^*}{\partial \xi^2} - \frac{\partial U^*}{\partial \xi} \frac{\partial^2 U}{\partial \xi^2} \right) d\xi &- \\ 2 \int_{-\infty}^{+\infty} \beta \left(U^* \frac{\partial U}{\partial \xi} - U \frac{\partial U^*}{\partial \xi} \right) \frac{\partial |U|^2}{\partial \xi} d\xi. \end{aligned} \quad (3)$$

Обозначая $U = |U| \exp(i\varphi)$, вводя волновое число пакета $\partial\varphi/\partial\xi = k$ и полагая масштабы неоднородностей изменения параметров среды и волнового числа пакета много большими масштаба неоднородности огибающей пакета $L_{q,\gamma,\alpha,\beta,k} \gg L_{|U|}$, получим для соотношений (2) и (3) вид

$$\begin{aligned} N \frac{dk}{dt} &= -\frac{\mu}{2} \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 \left(\frac{\partial |U|}{\partial \xi} \right)^2 d\xi + \frac{1}{2} \left(\frac{dq}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial |U|}{\partial \xi} \right)^2 d\xi - Nk^2 \right) + \\ &+ \frac{1}{2} \left(\frac{d\alpha}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi + 2 \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} k^3 N - \frac{1}{2} \left(\frac{d\beta}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} k \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\frac{dN}{dt} = \frac{1}{2} \left(\frac{dq}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} kN - 3 \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} \left(\int_{-\infty}^{\infty} \left(\frac{\partial |U|}{\partial \xi} \right)^2 d\xi + k^2 N \right) + \frac{3}{2} \left(\frac{d\beta}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} \int_{-\infty}^{\infty} |U|^4 d\xi, \quad (5)$$

где $N = \int_{-\infty}^{\infty} |U|^2 d\xi$ – энергия волнового пакета; $\bar{\xi} = \frac{1}{N} \int_{-\infty}^{\infty} \xi |U|^2 d\xi$ – координата центра «массы»

волнового пакета. Первое слагаемое в правой части (4) отвечает уменьшению волнового числа пакета, обусловленному индуцированным рамановским рассеянием, остальные слагаемые – изменению волнового числа пакета, обусловленному неоднородностью, второе – линейной дисперсии второго порядка, третье – кубичной нелинейности, четвертое – линейной дисперсии третьего порядка, пятое – нелинейной дисперсии. Так, для волновых пакетов амплитуды A и протяженности Δ состояние равновесия системы (4)–(5), определяемое условиями

$\dot{k} = \dot{N} = 0$, можно оценить следующим образом:

$$\mu A^2 \approx \left(\frac{dq}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} (1 - \Delta^2 k^2) + \left(\frac{d\alpha}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} A^2 \Delta^2 + 4 \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} k^3 \Delta^2 - \left(\frac{d\beta}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} k A^2 \Delta^2, \quad (6)$$

$$\left(\frac{dq}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} k \approx 6 \left(\frac{d\gamma}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} \left(\frac{1}{\Delta^2} + k^2 \right) - 3 \left(\frac{d\beta}{d\xi} \right)_{\bar{\xi}} A^2. \quad (7)$$

В частности, при изменении лишь линейной дисперсии второго порядка $(dq/d\xi)_{\bar{\xi}} \neq 0$ (в этом случае $(d\gamma/d\xi)_{\bar{\xi}} = (d\beta/d\xi)_{\bar{\xi}} = (d\alpha/d\xi)_{\bar{\xi}} = 0$) условия компенсации индуцированного рамановского рассеяния (6)–(7) примут более простой вид:

$$\begin{cases} \mu A^2 \approx \left(\frac{dq}{d\xi} \right)_{\xi}, \\ k = 0. \end{cases} \quad (8)$$

Отсюда следует, что возрастающая линейная дисперсия второго порядка компенсирует эффект индуцированного рамановского рассеяния при определенной амплитуде волнового пакета и нулевом значении волнового числа пакета.

Адиабатическое приближение динамики солитонов

Для более детального анализа системы (4)–(5) рассмотрим динамику солитоноподобных волновых пакетов, огибающая которых описывается *cosh-like* функцией, а амплитуда A и протяженность Δ пакетов связаны солитоноподобным соотношением $A\Delta = 1/\varepsilon = \text{const}$. В этом случае представим решение системы (4)–(5) в виде

$$|U(\xi, t)| = \frac{A(t)}{\cosh(A(t)\varepsilon\xi)}. \quad (9)$$

В качестве примера взаимного действия эффектов индуцированного рамановского рассеяния и неоднородности среды на динамику волновых пакетов рассмотрим в дальнейшем дисперсию и нелинейность, меняющимися по линейным законам: $(dq/d\xi)_{\xi} = q' = \text{const}$, $(d\alpha/d\xi)_{\xi} = \alpha' = \text{const}$, $(d\gamma/d\xi)_{\xi} = \gamma' = \text{const}$, $(d\beta/d\xi)_{\xi} = \beta' = \text{const}$. В этом случае система (4)–(5) с учетом (9) примет вид

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{16}{15}\varepsilon^2\mu A^4 + q' \left(\frac{2}{3}\varepsilon^2 A^2 - \frac{1}{2}k^2 \right) + \frac{1}{3}\alpha' A^2 + 2\gamma' k^3 - \frac{1}{3}\beta' k A^2, \quad (10)$$

$$\frac{dA}{dt} = q' k A - \gamma' (3k^2 + 4\varepsilon^2 A^2) A + \beta' A^3. \quad (11)$$

Первое слагаемое в правой части (10) приводит к понижению волнового числа солитона и обусловлено индуцированным рамановским рассеянием, остальные – к изменению волнового числа, обусловленному неоднородностью параметров среды, второе – дисперсии второго порядка, третье – кубичной нелинейности, четвертое – дисперсии третьего порядка, пятое – нелинейной дисперсии. При $q' > 0$ и $\alpha' = \gamma' = \beta' = 0$ система (10)–(11) имеет состоящие равновесия при $k = 0$ и ненулевой амплитуде солитона $A_*^2 = \frac{5}{8} \frac{q'}{\mu}$, что указывает на возможность стабилизации эффекта индуцированного рамановского рассеяния возрастающей линейной дисперсией второго порядка.

В связи с этим, далее рассмотрим систему (10)–(11) при $q' \neq 0$, т.е. в этом случае солитоноподобный волновой пакет распространяется без изменения огибающей и волнового числа.

В этом случае система (10)–(11) после замены $\tau = tq'/2$, и $a = \sigma\varepsilon^2 A^2 > 0$ примет вид

$$\frac{dk}{d\tau} = -pa^2 + a - k^2 + \delta k^3 - rka, \quad (12)$$

$$\frac{da}{d\tau} = 4ka - 3\delta k^2 a - 4\frac{\delta}{\sigma} a^2 + rka^2, \quad (13)$$

где $p = \frac{32}{15} \frac{\mu}{q'\varepsilon^2\sigma^2}$ – параметр отношения индуцированного рамановского рассеяния к градиенту дисперсии второго порядка; $\delta = 4 \frac{\gamma'}{q'}$ – параметр отношения градиентов линейной дис-

персии третьего и второго порядков; $r = \frac{\beta'}{q'}$ – параметр отношения градиентов нелинейной

дисперсии и дисперсии второго порядка; $\sigma = \frac{4}{3} + \frac{2}{3} \frac{\alpha'}{q'\epsilon^2}$ – параметр отношения градиентов кубической нелинейности и дисперсии второго порядка.

Проанализируем влияние неоднородностей различных параметров среды на устойчивость решения системы (12)–(13).

Неоднородность дисперсии второго порядка и кубической нелинейности

При однородной линейной дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии (в отсутствии как неоднородности дисперсии третьего порядка, так и нелинейной дисперсии $\delta = r = 0$) система (12) – (13) примет вид

$$\frac{dk}{d\tau} = -pa^2 + a - k^2, \tag{14}$$

$$\frac{da}{d\tau} = 4ka. \tag{15}$$

При $p > 0$ система (14) – (15) имеет два состояния равновесия:

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} \text{ – седло, } \begin{cases} a_0 = \frac{1}{p} > 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} \text{ – центр.} \tag{16}$$

Линеаризация системы (14)–(15) в окрестности центра $a_0 = 1/p, k_0 = 0$ приводит к уравнению осциллятора для волнового числа:

$$\frac{d^2k}{d\tau^2} + \frac{4}{p}k = 0. \tag{17}$$

Частота колебаний волнового числа k из (17) равна $\omega = 2/\sqrt{p}$.

При произвольном отклонении от состояния равновесия $a_0 = 1/p, k_0 = 0$ фазовые траектории системы (14) – (15) имеют вид

$$\sqrt{a} \cdot k^2 + \frac{p}{5}\sqrt{a^5} - \frac{1}{3}\sqrt{a^3} = C = \sqrt{a_0} \cdot k_0^2 + \frac{p}{5}\sqrt{a_0^5} - \frac{1}{3}\sqrt{a_0^3}, \tag{18}$$

где $a_0 = a(0), k_0 = k(0)$ – значения амплитуды и волнового числа солитона в начальный момент времени. На рис. 1 приведены фазовые траектории системы (14)–(15), описанные выражением (18) при $p = 1$ и различных значениях C .

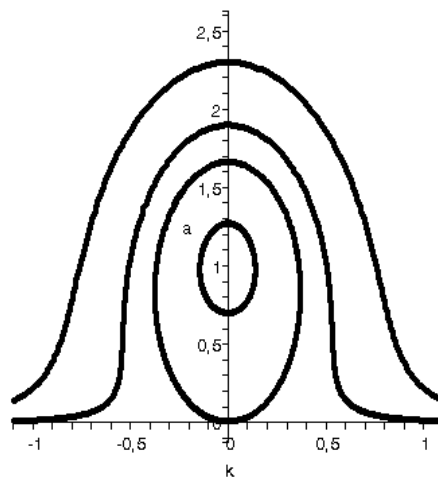


Рис. 1. Фазовые траектории (18) системы (14)–(15) при $p = 1$ и различных значениях C

На рис. 1 движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки. Траектории 1 и 2 (считая сверху вниз) отвечают значениям $C_1 > C_2 > 0$, траектория 3 (большой эллипс) – $C = 0$, траектория 4 (малый эллипс) – $C < 0$

Траектории 1 и 2 являются незамкнутыми и отвечает значению $C > 0$, сепаратрисная траектория 3 (большой эллипс) отвечает значению $C = 0$, траектория 4 (малый эллипс) замкнутая и отвечает значению $C < 0$. Уравнение сепаратрисы на рис. 1 из (18) при $C = 0$ описывается уравнением

$$\left(a - \frac{5}{6p}\right)^2 + \frac{k^2}{p} = \frac{5}{36p^2}. \quad (19)$$

При $p > 0$ соотношение (19) описывает эллипс. Внутри эллипса (19) реализуются локализованные траектории пакетов. В этом случае изменение волнового числа (и амплитуды) пакета носит периодический характер: смещение волнового числа вниз по спектру, обусловленное индуцированным рамановским рассеянием, компенсируется возрастающей дисперсией второго порядка, приводящего к увеличению волнового числа солитона. В этом случае солитоноподобный волновой пакет движется в неоднородной среде с периодическим изменением амплитуды (а также скорости и волнового числа). Максимальное значение начального волнового числа k_0 , при котором возможны локализованные траектории из (19), составляет

$(k_0)_{\max} = \frac{1}{6} \sqrt{\frac{5}{p}}$. Наибольший интервал значений начальных амплитуд солитона для реализации локализованных траекторий достигается при $k_0 = 0$ и составляет $0 \leq a_0 \leq \frac{5}{3p}$.

Вне эллипса (19) реализуются нелокализованные траектории 1, 2, отвечающие значениям $C > 0$. В этом случае изменение волнового числа пакета носит непериодический характер: возрастающая линейная дисперсия второго порядка не компенсирует эффекта индуцированного рамановского рассеяния, что приводит в итоге к уменьшению волнового числа пакета. В таких случаях солитоноподобный волновой пакет в неоднородной среде со временем уменьшается по амплитуде до нуля, т.е. полностью распадается за счет рамановского рассеяния. При малых положительных значениях C реализуется немонотонный режим уменьшения волнового числа (траектория 1 на рис. 1), а при достаточно больших положительных значениях C – монотонный режим уменьшения (траектория 2 на рис. 1).

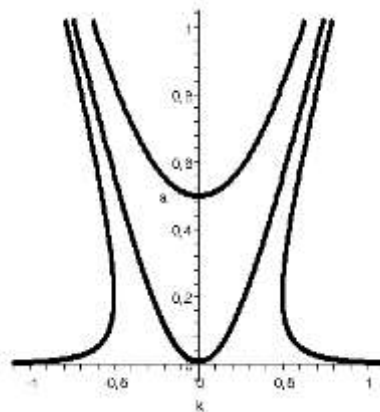


Рис. 2. Фазовые траектории (18) системы (14)–(15) при $p = -1$ и различных значениях C

При $p < 0$ система (14)–(15) имеет единственное состояние равновесия $a_0 = k_0 = 0$ – седло. На рис. 2 приведены фазовые траектории (18) системы (14) – (15) при $p = -1$ и раз-

личных значениях C . Траектории 1 отвечают значению $C > 0$, 2 – $C = 0$, 3 – $C < 0$. При $C > 0$ волновое число пакета меняется немонотонным образом, а при $C \leq 0$ меняется монотонно. Уравнение сепаратрисы 2 на рис. 2, разделяющей эти два режима, из (18) при $C = 0$ описывается уравнением (19), которое при $p < 0$ соответствует уравнению гиперболы.

На рис. 2 движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки. Траектории 1 (асимптотически прижимающиеся к горизонтальной оси) отвечают значениям $C > 0$, траектория 2 (проходящая через начало координат) – $C = 0$, траектория 3 (пересекающая вертикальную ось выше начала координат) – $C < 0$.

В этом случае (так как отсутствует устойчивое состояние равновесия) не может существовать стационарный солитоноподобный волновой пакет в неоднородной среде.

Учет неоднородности нелинейной дисперсии и дисперсии третьего порядка меняет характер динамики коротких солитонов. В начале учтем неоднородность нелинейной дисперсии.

Неоднородность дисперсии второго порядка и нелинейной дисперсии

При $\delta = 0$ система (12)–(13) примет вид

$$\frac{dk}{d\tau} = -pa^2 + a - k^2 - rka, \tag{20}$$

$$\frac{da}{d\tau} = 4ka + ra^2. \tag{21}$$

Система (20)–(21) имеет два состояния равновесия:

$$\begin{cases} a = 0 \\ k = 0 \end{cases} \text{ – седло,} \tag{22}$$

$$\begin{cases} a = \frac{16}{16p - 3r^2} > 0 \\ k = \frac{4r}{3r^2 - 16p} \end{cases} \text{ – фокус.} \tag{23}$$

Из условия $a > 0$ следует, что фокус (23) существует при достаточно слабой неоднородности нелинейной дисперсии $r^2 < 16p/3$. При $r < 0$ фокус является устойчивым, что соответствует стабилизации эффекта индуцированного рамановского рассеяния при распространении солитонов в среде с уменьшающейся нелинейной дисперсией. На рис. 3 приведены фазовые плоскости системы (20)–(21) при $p = 1$ и различных отрицательных значениях r (траектории седла (22) не показаны). Рис. 3, *a* соответствует значению $r = -0.5$, рис. 3, *б* – $r = -2.0$, рис. 3, *в* – $r = -3.0$. Рис. 3, *a*, *б* описывают два состояниям равновесия.

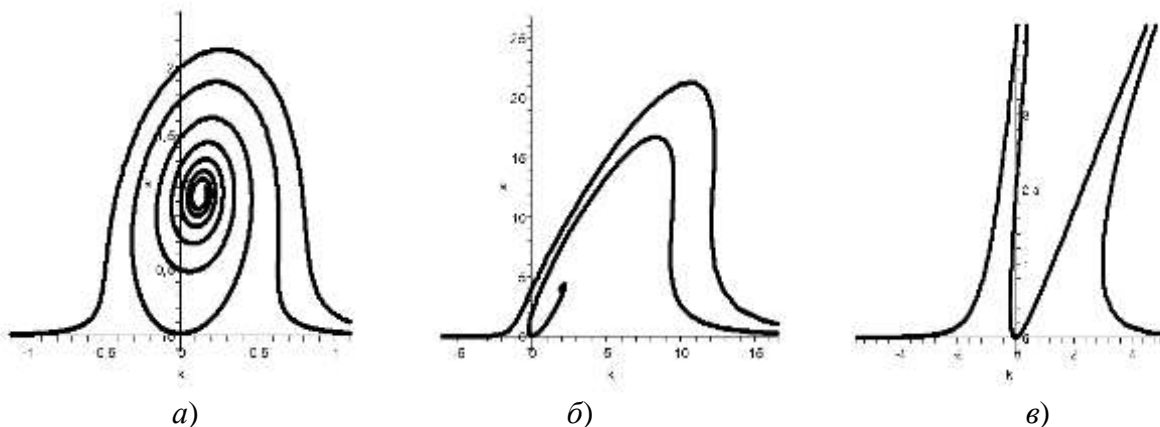


Рис. 3. Фазовые плоскости системы (20)–(21) при $p = 1$ и различных отрицательных значениях r . Движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки:
a – $r = -0.5$; *б* – $r = -2.0$; *в* – $r = -3.0$

В этих случаях в зависимости от начальных условий возможна стабилизация эффекта индуцированного рамановского рассеяния возрастающей дисперсией второго порядка и убывающей нелинейной дисперсией (траектории, входящие в устойчивый фокус на рис. 3, а, б), т.е. при амплитуде и волновом числе, соответствующим устойчивому фокусу, солитон движется в присутствии вынужденного рамановского рассеяния в неоднородной среде без изменения своих параметров, т.е., стабилизация солитона в присутствии вынужденного рамановского рассеяния возможна при наличии в фазовом пространстве системы (12)–(13) устойчивого состояния равновесия с ненулевой амплитудой a . При значении параметра неоднородности нелинейной дисперсии меньше критического значения $r < r_c = -4\sqrt{p/3}$ устойчивое состояние равновесия (23) исчезает (за счет слипания устойчивого фокуса и седла), что делает невозможным стабилизацию индуцированного рассеяния при распространении солитонов в среде с сильно убывающей нелинейной дисперсией. При $p=1$ это значение составляет $r_c \approx -2.3$. Рис. 3, в соответствует значению $r = -3.0$, при котором реализуется одно состояние равновесия и компенсация индуцированного рамановского рассеяния невозможна.

Фазовые плоскости системы (20)–(21) при положительных значениях r могут быть получены из фазовых плоскостей системы при отрицательных значениях r заменой $k \rightarrow -k$ и изменением направления движения по фазовым траекториям на противоположное. Это следует из инвариантности системы (20)–(21) относительно одновременных преобразований $r \rightarrow -r, k \rightarrow -k, \tau \rightarrow -\tau$. В частности, при положительных значениях параметра r состояние равновесия (23) системы (20)–(21) – неустойчивый фокус, а (22) остается седлом. На рис. 4 в качестве примера приведена фазовая плоскость системы (20)–(21) при $p=1$ и $r=0.5$.

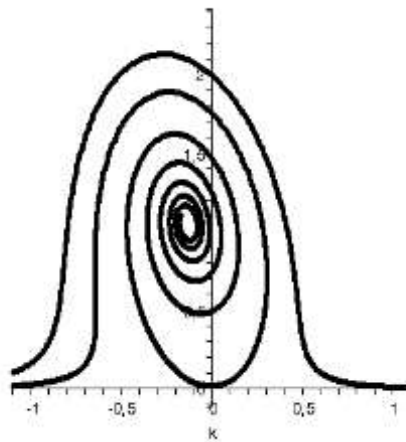


Рис. 4. Фазовая плоскость системы (20)–(21) при $p=1$ и $r=0.5$.

**Движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки.
Устойчивых состояний равновесия нет**

Отсюда следует, что при распространении солитонов в среде с возрастающей нелинейной дисперсией $\beta' > 0$ компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния невозможна: волновое число пакета на больших временах уходит на $-\infty$, хотя в окрестности фокуса (23) фазовая точка может находиться достаточно долго.

Неоднородность дисперсии второго и третьего порядков

При $r=0$ система (12)–(13) примет вид:

$$\frac{dk}{d\tau} = -pa^2 + a - k^2 + \delta k^3, \quad (24)$$

$$\frac{da}{d\tau} = 4ka - 3\delta k^2 a - 4\frac{\delta}{\sigma} a^2, \quad (25)$$

Система (24)–(25) имеет два состояния равновесия при $a = 0$:

$$\begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = 0 \end{cases} - \text{седло}, \quad \begin{cases} a_0 = 0, \\ k_0 = \frac{1}{\delta} \end{cases} - \text{узел}. \quad (26)$$

При $\delta > 0$ узел (26) неустойчивый, а при $\delta < 0$ – устойчивый. При $a \neq 0$ для состояний равновесия системы (24) – (25) получим систему

$$\begin{cases} -pa^2 + a - k^2 + \delta k^3 = 0, \\ a = \frac{\sigma}{\delta} k \left(1 - \frac{3}{4} \delta k \right). \end{cases}$$

Здесь возможны еще два состояния равновесия, одно из которых – седло, а другое может быть фокусом. При $|\delta| \ll 1$ и $a \neq 0$ система (24)–(25) имеет состояние равновесия

$$a_0 = \frac{1}{p} - \left(\frac{\delta}{\sigma p} \right)^2, \quad k_0 = \frac{\delta}{\sigma p}, \quad (27)$$

переходящее в центр $a_0 = 1/p, k_0 = 0$ при исчезновении неоднородности дисперсии третьего порядка ($\delta = 0$). При малых положительных значениях δ состояние равновесия (27) – устойчивый фокус. Отсюда следует, что учет малой неоднородности линейной дисперсии третьего порядка при ее возрастании ($\delta > 0$) сохраняет возможность компенсации эффекта индуцированного рамановского рассеяния. На рис. 5 приведены фазовые плоскости системы (24)–(25) при $p = 1, \sigma = 1$ и различных положительных значениях δ (траектории седла (26) не указаны).

При $a = 0$ имеется два состояния равновесия (26), а при $a \neq 0$ и малых положительных значениях δ имеем еще два состояния равновесия: устойчивый фокус и седло (рис. 5, а, б). Видно, что увеличение параметра δ приводит к увеличению области начальных значений, при которых неоднородность среды компенсирует эффект индуцированного рамановского рассеяния (рис. 5, а–в). В тоже время увеличение δ приводит к сближению фокуса и седла (рис. 5, а–г) и при $\delta = 0.78$ фокус и седло сливаются (рис. 5, д). При больших значениях δ система (24)–(25) не имеет устойчивых состояний равновесия (рис. 5, е).

Фазовые плоскости системы (24)–(25) при отрицательных значениях δ могут быть получены из фазовых плоскостей системы при положительных значениях δ заменой $k \rightarrow -k$ и изменением направления движения по фазовым траекториям на противоположное. Это следует из инвариантности системы (24)–(25) относительно одновременных преобразований $\delta \rightarrow -\delta, k \rightarrow -k, \tau \rightarrow -\tau$. В частности, при малых отрицательных значениях параметра δ состояние равновесия (27) системы (24)–(25) – неустойчивый фокус. На рис. 6 в качестве примера приведена фазовая плоскость системы (24)–(25) при $p = 1, \sigma = 1$ и $\delta = -0.3$.

Отсюда следует, что при неоднородной линейной дисперсии третьего порядка при $\gamma' < 0$ компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния невозможна: волновое число пакета на больших временах либо уходит на $-\infty$, либо стремится к конечной величине $1/\delta$ при $a \rightarrow 0$, соответствующей на рис. 6 устойчивому узлу. Следует отметить, что хотя упомянутый узел – устойчивый, но соответствующая ему амплитуда солитона $a = 0$, т.е. реально солитон не существует.

Было проанализировано влияние неоднородной дисперсии третьего порядка на стабилизацию эффекта индуцированного рамановского рассеяния без учета неоднородности нелинейной дисперсии. Далее проанализируем влияние неоднородной нелинейной дисперсии на

стабилизацию эффекта индуцированного рамановского рассеяния без учета неоднородной дисперсии третьего порядка.

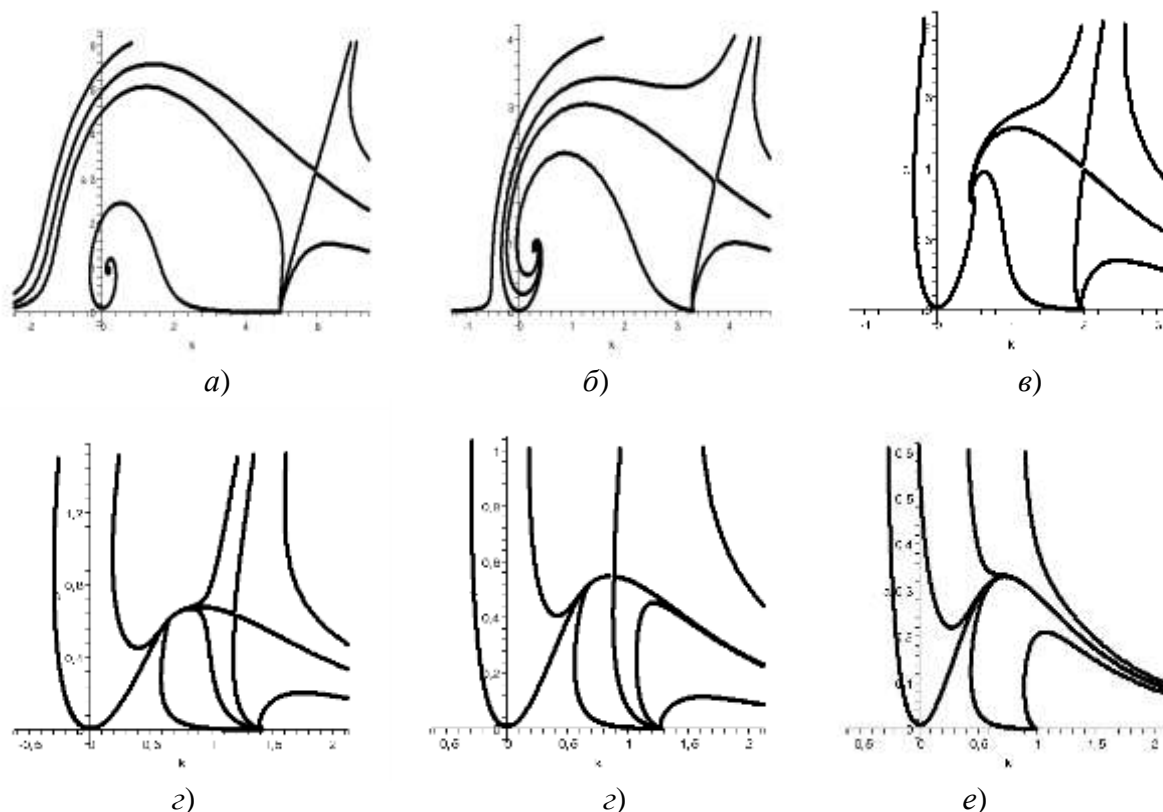


Рис. 5. Фазовые плоскости системы (24)–(25) при $p = 1, \sigma = 1$ и различных положительных значениях δ . Движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки: $a - \delta = 0.2$; $b - \delta = 0.3$; $c - \delta = 0.5$; $d - \delta = 0.7$; $e - \delta = 1.0$

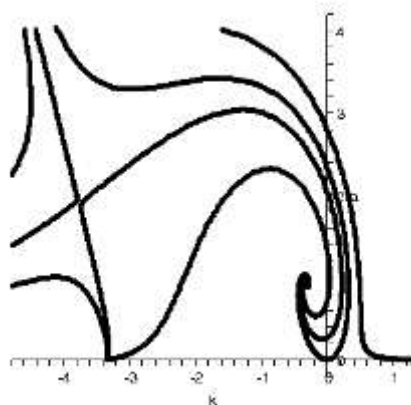


Рис. 6. Фазовая плоскость системы (24)–(25) при $p = 1, \sigma = 1$ и $\delta = -0.3$. Движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки. Состояния равновесия при ненулевой амплитуде солитона $a \neq 0$ неустойчивы

Неоднородность дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии

При неоднородности дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии (в этом случае $q' = \alpha' = 0$) система (10)–(11) принимает вид

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{16}{15} \varepsilon^2 \mu A^4 - \frac{1}{3} \beta' k A^2 + 2\gamma' k^3, \tag{28}$$

$$\frac{dA}{dt} = -3\gamma'k^2A - 4\gamma'\varepsilon^2A^3 + \beta'A^3. \quad (29)$$

Система (28) – (29) заменой $a = \varepsilon^2 A^2$ и $\tau = 2\gamma't$ может быть сведена к виду

$$\frac{dk}{dt} = -\lambda a^2 + k^3 - \frac{1}{6}vka, \quad (30)$$

$$\frac{da}{dt} = -3k^2a - 4a^2 + va^2, \quad (31)$$

где $v = \frac{\beta'}{\gamma'\varepsilon^2}$ – параметр отношения градиентов нелинейной дисперсии и линейной дисперсии

третьего порядка; $\lambda = \frac{8}{15} \frac{\mu}{\gamma'\varepsilon^2}$ – параметр отношения индуцированного рамановского рассеяния к градиенту линейной дисперсии третьего порядка. Система (30)–(31) всегда имеет состояние равновесия в начале координат $a = 0, k = 0$ – седло. Кроме этого седла, система (30)–(31) имеет два состояния равновесия (неустойчивый фокус и седло) при $v > 4$, одно состояние равновесия (неустойчивый седлофокус) при $v = 4$ и не имеет состояний равновесия при $v < 4$.

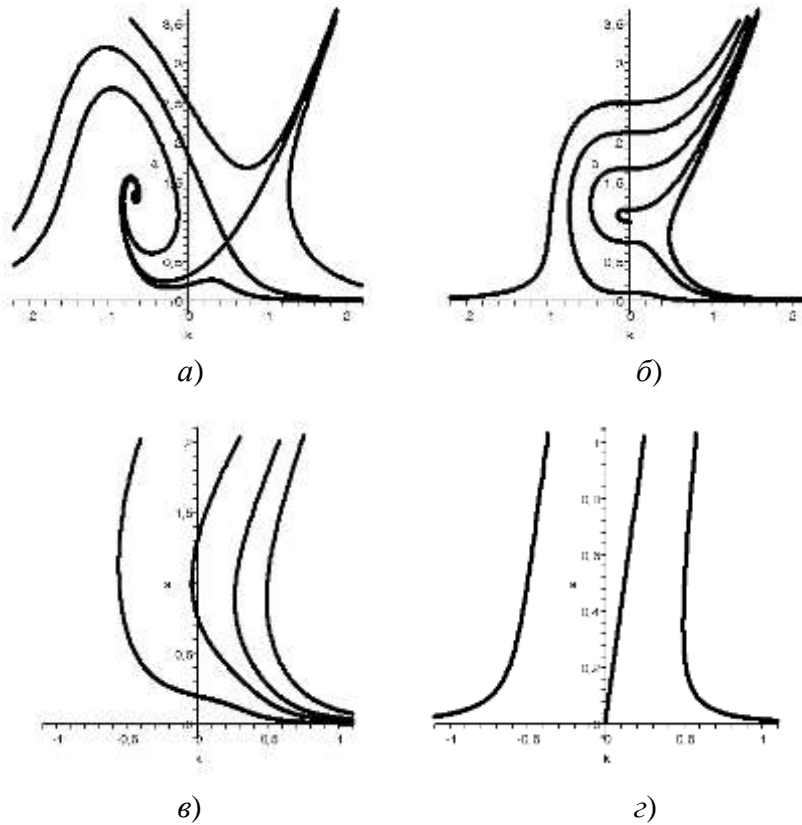


Рис. 7. Фазовая плоскость системы (30)–(31) при $\lambda = 1$ и различных значениях ν .

Движение по фазовым траекториям происходит против часовой стрелки:

$a - \nu = 5.0$ (состояния равновесия – неустойчивый фокус и седло);

$\bar{b} - \nu = 4.0$ (состояние равновесия – неустойчивый седлофокус);

$v - \nu = 3.0$ (нет состояний равновесия); $z - \nu = 0$ (нет состояний равновесия)

На рис. 7 показано фазовое пространство системы (30)–(31) при $\lambda = 1$ и при разных значениях ν (траектории седла в начале координат не показаны), так как в этих случаях не существует устойчивых состояний равновесия, то здесь невозможна стабилизация вынужденного рамановского рассеяния.

Неоднородность кубичной нелинейности

При неоднородности лишь кубичной нелинейности (в этом случае $q' = \gamma' = \beta' = 0$) система (10)–(11) сводится к одному уравнению первого порядка:

$$\frac{dk}{dt} = -\frac{16}{15} \varepsilon^2 \mu A_0^4 + \frac{1}{3} \alpha' A_0^2, \quad (32)$$

где $A_0 = A(0)$. При $\alpha' > 0$ уравнение (32) имеет состояние равновесия при отличной от нуля амплитуде солитона $A_*^2 = \frac{5}{16} \frac{\alpha'}{\varepsilon^2 \mu}$. Данное состояние является неустойчивым: при превышении амплитудой солитона критического значения $A_0 > A_*$ индуцированное рамановское рассеяние доминирует над эффектом неоднородности кубичной нелинейности, волновое число пакета монотонно уменьшается $\dot{k} < 0$, при $A_0 < A_*$ эффект неоднородности кубичной нелинейности преобладает над индуцированным рамановским рассеянием, волновое число пакета монотонно растет $\dot{k} > 0$. Однако решение (32) может находиться в окрестности этого неустойчивого состояния равновесия в течение продолжительного времени, т.е. в этом случае стабилизация индуцированного рамановского рассеяния за счет неоднородности кубичной нелинейности невозможна. И невозможно существование стационарного солитона, имеющего постоянные параметры.

Выводы

В данной работе рассмотрена динамика коротких солитонов огибающей в рамках уравнений Шредингера третьего порядка с учетом индуцированного рамановского рассеяния и неоднородной линейной дисперсии второго и третьего порядков, кубичной нелинейности и нелинейной дисперсии. Рассмотрение проведено в адиабатическом приближении, при котором волновой пакет распространяется с сохранением своей формы. При отсутствии неоднородности линейной дисперсии третьего порядка и нелинейной дисперсии показана возможность компенсации рамановского смещения волнового числа солитонов в длинноволновую область возрастающей дисперсией второго порядка, увеличивающей это волновое число. В этом случае фазовые траектории изменения параметров солитонов найдены в явном виде. Проанализирована роль неоднородности как линейной дисперсии третьего порядка, так и нелинейной дисперсии. Показано, что при учете либо возрастающей линейной дисперсии третьего порядка, либо убывающей нелинейной дисперсии устойчивый режим распространения солитонов с постоянным волновым числом сохраняется. При уменьшении линейной дисперсии третьего порядка либо увеличении нелинейной дисперсии компенсация эффекта индуцированного рамановского рассеяния невозможна.

Работа проведена при поддержке РФФИ (грант N 12-02-00436-a).

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. Agraval. Academic, San Diego, 2003.
4. **Agraval, G.P.** Fiber Optic Communication Systems / G.P. Agraval. 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. Pp. 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. Pp. 142–144.

7. **Oliviera J.R.** Analytical Solution for the Modified Nonlinear Schrodinger Equation Describing Optical Shock Formation / J.R. Oliviera, M.A. Moura // Phys. Rev. E. 1998. V. 57. Pp. 4751–4755.
8. **Gordon J.P.**, Theory of the soliton self-frequency shift // Opt. Lett. 1986. V. 11. P. 662–664.
9. **Kodama, Y.** Optical solitons in a monomode fiber / Y. Kodama // J. Stat. Phys. 1985. V. 39. Pp. 597–614.
10. **Zaspel C.E.**, Optical Solitary Wave and Shock Solutions of the Higher Order Nonlinear Schrodinger Equation // Phys. Rev. Lett. 1999. V.82. N. 4. Pp. 723–726.
11. **Hong Ю В.** 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. Pp. 360–367.
12. **Karpman V.I.**, The extended third-order nonlinear Schrodinger equation and Galilean transformation // The European Physical Journal B. 2004. V. 39. Pp. 341–350.
13. **Gromov, E.M.** Nonlinear dynamics of short wave trains in dispersive media / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Zh. Eksp. Teor. Fiz. 1996. V. 110. P. 137.; JETP. 1996. V. 83. P. 73–79.
14. **Gromov, E.M.** Short optical solitons in fibers / E.M. Gromov, V.I. Talanov // Chaos. 2000. V. 10. N. 3. P. 551–558.
15. **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.
16. **Essiambre, R.-J.** Timing jitter of ultrashort solitons in high-speed communication system. I. General formulation and application to dispersion-decreasing fibers / R.-J.Essiambre, G.P. Agraval // J. Opt. Soc. Of America B. 1997. V. 14. Pp. 314–322.

*Дата поступления
в редакцию 14.19.2011*

E.M. Gromov, V.V. Tyutin

STIMULATED RAMAN – SCATTERING COMPENSATION FOR SHORT SOLITON'S PROPAGATIONS IN INHOMOGENEOUS MEDIA

Dynamics of short solitons envelope in the frame of the third–order nonlinear Schrodinger equations taking into account stimulated Raman–scattering and inhomogeneous second– and third–order linear dispersion, nonlinear dispersion and cubic nonlinearity is considered. Compensation of the stimulated Raman–scattering effect by the increasing of the second–order linear dispersion is shown. In adiabatic approximation stable soliton's propagation regime is found. Third – order linear dispersion and nonlinear dispersion inhomogeneity effect to stimulated Raman – scattering compensation is analyzed.

Key words: stimulated Raman–scattering; inhomogeneous of the second– and third–order linear dispersion; nonlinear dispersion; cubic nonlinearity; short solitons envelope.

УДК 517.465

Н.С. Петрухин¹, Е.Н. Пелиновский^{1,2}

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОДНОГО ПОТОКА В РАМКАХ ОДНОМЕРНЫХ УРАВНЕНИЙ МЕЛКОЙ ВОДЫ

Высшая школа экономики¹,
Институт прикладной физики РАН²

Обсуждается роль аналитических решений в моделировании водного потока в каналах произвольного сечения. Получены аналитические решения, описывающие трансформацию стационарного потока в канале треугольного сечения с изменяющимися параметрами.

Ключевые слова: трансформация течения, критическая глубина, докритический режим, моделирование водяного потока.

Введение

Математические модели течений в реках основаны на известных гидродинамических моделях потоков однородной жидкости. Существующие модели учитывают разную степень детализации водного потока и гидрометеорологической информации. Модели первого уровня (одномерные или квазиодномерные) используют усредненные по поперечному сечению реки характеристики скорости течения.

Одномерные модели дают достаточно грубое описание процесса, однако легко реализуются в виде номограмм или программ для простейших компьютеров, поэтому они получили широкое распространение в оперативной практике гидрологических расчетов.

В настоящее время активно используются модели следующего уровня, основанные на двухмерных уравнениях мелкой воды, и их численное моделирование позволяет описать динамику загрязнений в реках и прогнозировать аварийные ситуации. Между тем, роль одномерных моделей не стоит недооценивать, поскольку они допускают простое аналитическое исследование, и получаемые здесь решения могут быть использованы как для тестирования численных моделей, так и для экспресс-оценки характерных параметров задачи. В данной статье обсуждается роль аналитических решений в задачах речной гидравлики.

Исходная модель

Искомые уравнения квазиодномерной модели водного потока могут быть получены усреднением (интегрированием) уравнений нелинейной теории мелкой воды по поперечному сечению, на чем мы останавливаться не будем, и приведем здесь основные уравнения без вывода:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = g \frac{dh_0}{dx}, \quad (1)$$

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [A(x,t)u] = 0, \quad (2)$$

где $u(x,t)$ – средняя (усредненная по поперечному сечению) скорость водного потока; $A(x,t)$ – площадь поперечного сечения потока (реки); $H(x,t)$ – полная глубина бассейна на оси канала; $h_0(x)$ – ее невозмущенное значение; g – ускорение свободного падения; x – координата вдоль реки (причем предполагается ее русло прямым в первом приближении); t – время. Эта

система незамкнута, и недостающее уравнение связи между A и H находится по заданной геометрии водного потока в вертикальной плоскости. Для этого необходимо знать профиль дна реки $z(y;x,t)$ в каждый момент времени и в каждом сечении вдоль реки, тогда

$$A(x,t) = \int z(y;x,t) dy. \quad (3)$$

Приведем здесь несколько примеров поперечного сечения реки.

Русло прямоугольного сечения. Пусть канал постоянной глубины ограничен вертикальными стенками (рис. 1)

$$z(y) = -h_0 \quad |y| < B/2. \quad (4)$$

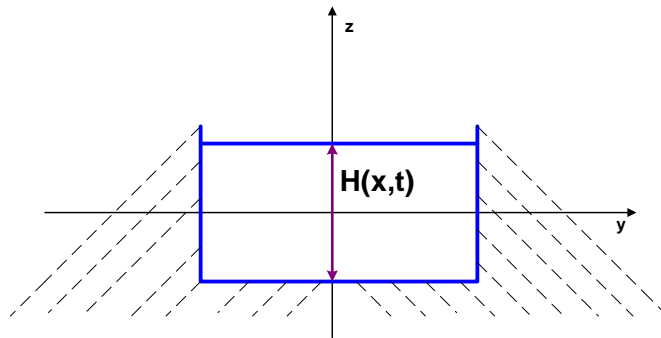


Рис. 1. Канал прямоугольного сечения

Тогда функция $A(x,t)$ вычисляется в явном виде

$$A(x,t) = H(x,t)B(x), \quad (5)$$

где B – ширина канала, и система уравнений (1)–(2) становится замкнутой. Две входящие в нее функции: ширина канала $B(x)$ и невозмущенная глубина $h_0(x)$ (точнее, в уравнения входит уклон русла реки dh_0/dx) – являются заданными и определяются конкретными (локальными) условиями. Канал прямоугольного сечения является наиболее простой аппроксимацией реального русла реки.

Русло параболического канала. Пусть дно канала описывается степенной функцией (рис. 2)

$$z(y) = -h_0 + \alpha |y|^m, \quad (6)$$

где α , m – произвольные положительные константы. В случае если $m = 1$, русло реки является треугольным, а при $m = 2$ канал имеет параболическое сечение. Если $m \rightarrow \infty$, то форма канала стремится к прямоугольной. Иногда для простоты мы будем называть каналы профиля (6) *параболическими*. Площадь поперечного сечения канала вычисляется в явном виде

$$A = \frac{2}{m\alpha^{1/m}} H^{1+1/m}. \quad (7)$$

Если константы α и m не зависят от координаты x , то после подстановки (7) в (2) константа α исчезает из уравнений, и система уравнений становится замкнутой относительно скорости потока и полной глубины на оси канала. Естественно, что в качестве коэффициента сюда входит параметр m , характеризующий форму поперечного сечения русла. Такая геометрия использована при решении задач наката длинных волн на берег и изучения возможности появления аномально больших волн (так называемых «волн-убийц») на мелкой воде.

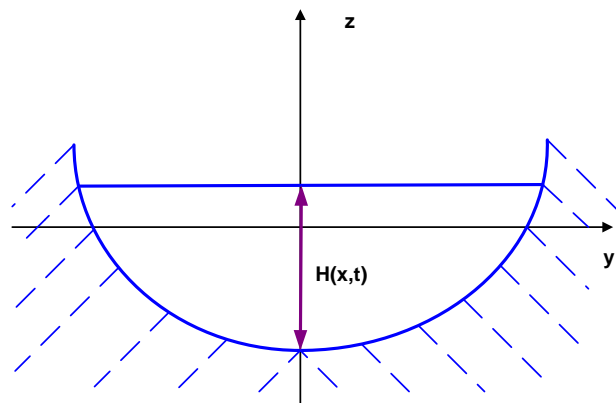


Рис. 2. Канал параболического сечения

Канал трапецидального сечения. Пусть форма канала описывается функцией (рис. 3)

$$z = \begin{cases} -h_0 & |y| < B/2 \\ -h_0 + \beta(|y| - B/2) & |y| > B/2 \end{cases} \quad (8)$$

где β - произвольная положительная константа. В этом случае площадь поперечного сечения вычисляется в явном виде

$$A(x,t) = B(x)H(x,t) + \frac{H^2(x,t)}{\beta(x)}. \quad (9)$$

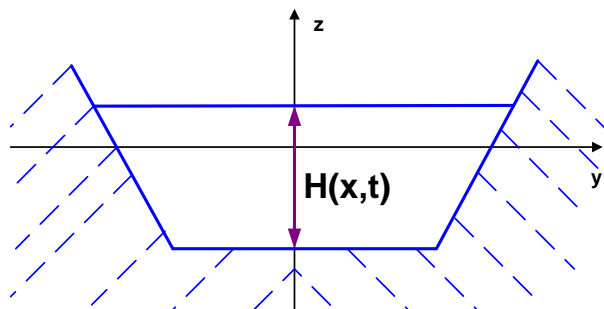


Рис. 3. Канал трапецидального сечения

Естественно, что площадь поперечного сечения может быть вычислена для канала произвольного сечения, по крайней мере, численно. В принципе, параметры речных русел меняются также и со временем, а не только вдоль русла (известные процессы миграции рек, а также процессы эрозии берегов), однако характерные временные изменения миграции достаточно медленные, так что для описания гидравлических и волновых режимов можно пренебречь временной зависимостью.

Таким образом, в самом общем виде мы имеем функциональную связь

$$A(x,t) = A[H(x,t), x], \quad (10)$$

и система уравнений (1) – (2) становится замкнутой относительно скорости течения и полной глубины.

Отметим полную аналогию между уравнениями одномерной гидравлики и газовой динамики, если ввести обозначения

$$\rho = A, \quad p = g \int A(H) dH. \quad (11)$$

В частности, для канала прямоугольного сечения (5) мы получаем связь $p \sim \rho^2$, известную для адиабатического газа с показателем адиабаты γ , равным 2. Эта аналогия уже была известна ранее. Для каналов параболического сечения аналогично получаем

$$\gamma = \frac{2m+1}{m+1}. \quad (12)$$

Такая газодинамическая аналогия для речных потоков оказывается полезной для переноса многих «волновых» результатов из газовой динамики на гидравлику и наоборот.

Стационарные потоки

Для демонстрации основных эффектов в гидравлике рассмотрим только один пример стационарных речных потоков. В этом случае уравнения (1)–(2) интегрируются:

$$Au = \text{const}, \quad (13)$$

$$H - h_0 + \frac{u^2}{2g} = \text{const}. \quad (14)$$

Переменность характеристик водного потока вдоль реки может быть связана только с переменностью русла реки: либо уклоном русла реки, либо изменением поперечного сечения реки. Уклоны русла реки достаточно малы (порядка 10^{-4}), и для простоты расчетов этим эффектом в данном случае можно пренебречь. Пусть канал имеет треугольный профиль (6) с $m = 1$, наклон стенок которого меняется с расстоянием, так что $\alpha = \alpha(x)$. В результате получаем систему алгебраических уравнений

$$H^2(x)u(x) = \frac{\alpha(x)}{\alpha_0} H_0^2 u_0, \quad (15)$$

$$H(x) + \frac{u(x)^2}{2g} = H_0 + \frac{u_0^2}{2g}, \quad (16)$$

где индекс 0 соответствует значениям потока в фиксированной точке $x = 0$. Следует нормировать все функции на их значения в этой точке, тогда

$$H^2(x)u(x) = \alpha(x), \quad (17)$$

$$H(x) + \text{Fr}u^2(x) = 1 + \text{Fr}, \quad (18)$$

где число Фруда есть

$$\text{Fr} = \frac{u_0^2}{2gH_0}. \quad (19)$$

Удобно исключить скорость течения и придти к одному уравнению для глубины потока

$$H + \text{Fr} \frac{\alpha^2}{H^4} = 1 + \text{Fr}. \quad (20)$$

Водный режим зависит от одного параметра – числа Фруда. Результаты расчета для малого значения ($\text{Fr} = 0.01$) представлены на рис. 4 для глубины потока, рис. 5 – для скорости

потока и на рис. 6 – для локального числа Фруда. Если коэффициент α уменьшается (канал расширяется), то глубина потока незначительно возрастает (кривая на рис. 4 слева от $\alpha = 1$), скорость потока падает значительно (кривая на рис. 5 слева от $\alpha = 1$). В результате локальное число Фруда также уменьшается (кривая на рис. 6 слева от $\alpha = 1$).

Таким образом, перестройка медленного, «до критического» потока происходит адиабатически и монотонно. Иная ситуация реализуется при сужении канала ($\alpha > 1$). В этом случае локальное число Фруда возрастает до критического значения 0,25 (кривая на рис. 6), при этом глубина потока падает (рис. 4), а скорость растет (кривая на рис. 5). Переход через критическое значение при дальнейшем сужении канала меняет характер процесса и решение алгебраического уравнения (20) отсутствует. Здесь необходимо учитывать возможность образования неустановившихся гидравлических прыжков. Такие процессы хорошо изучены для каналов прямоугольного сечения, однако для каналов произвольного сечения нам не удалось найти в литературе соответствующих решений.

Параметры течения при переходе через критическое значение числа Фруда могут быть найдены аналитически из (20), исследуя функцию $\alpha(H)$ на экстремум.

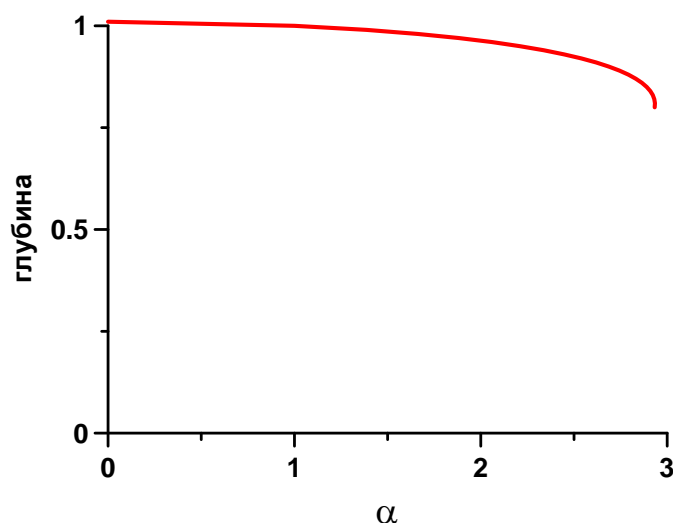


Рис. 4. Изменение глубины потока в треугольном канале при $Fr = 0.01$

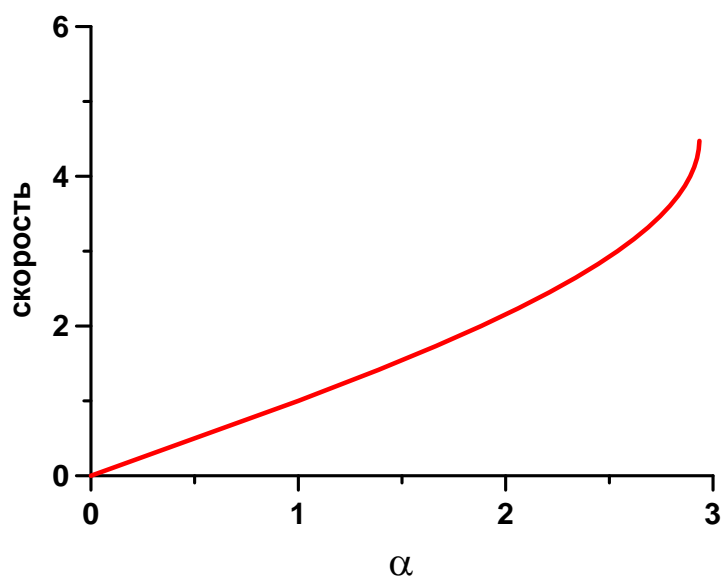


Рис. 5. Изменение скорости потока в треугольном канале при $Fr = 0.01$

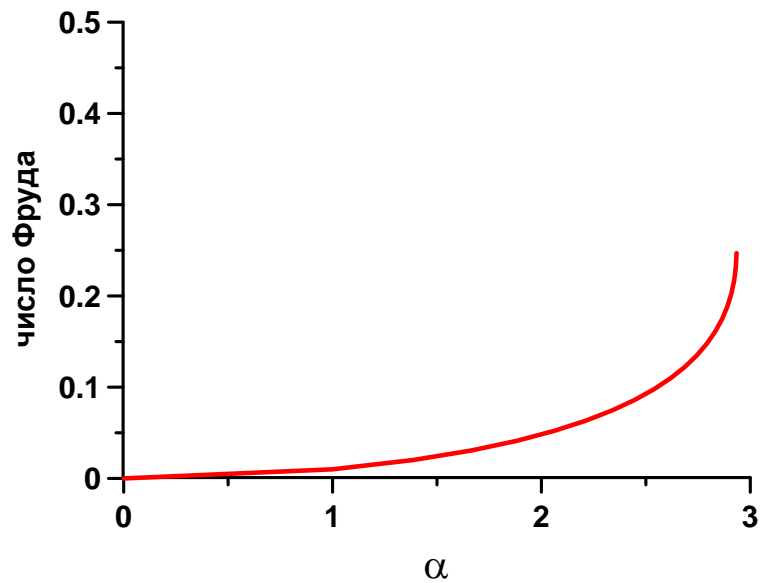


Рис. 6. Изменение локального числа Фруда в треугольном канале при $Fr = 0.01$

$$\alpha_* = \frac{16(1 + Fr)^{5/2}}{25\sqrt{5}Fr}, \quad (21)$$

$$H_* = \frac{4}{5}(1 + Fr), \quad (22)$$

$$u_* = \sqrt{\frac{1 + Fr}{5Fr}}. \quad (23)$$

Глубина потока и его скорость в критической точке в зависимости от начального значения числа Фруда представлены на рис. 7 и рис. 8. При малых значениях числа Фруда глубина потока уменьшается на одну треть, по сравнению с начальным значением, а скорость потока неограниченно возрастает. При приближении к критическому значению начального числа Фруда ($Fr = 0.25$) изменения глубины потока и его скорости становятся слабыми.

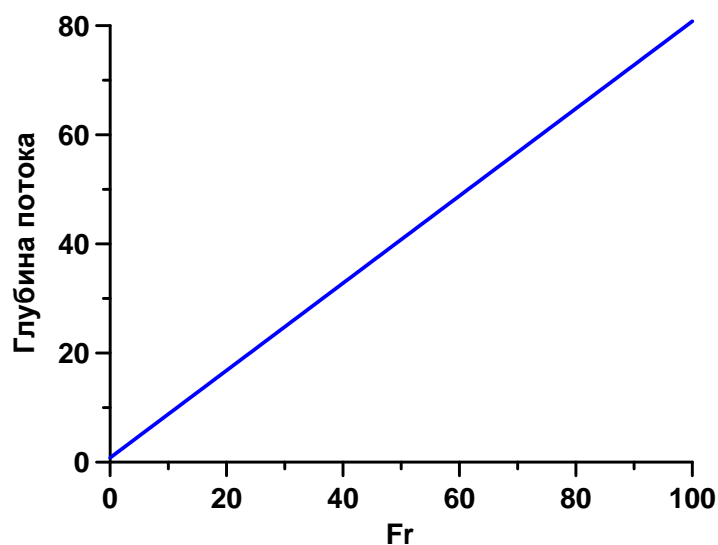


Рис. 7. Глубина потока в критической точке

Если начальный поток сверхкритический ($Fr = 100$), то характер изменений меняется на противоположный, по сравнению с докритическим режимом. Так, уменьшение наклона стенок канала (уширение канала) приводит к еще более сверхкритичности потока (число Фруда возрастает, рис. 11), при этом глубина потока уменьшается (рис. 9), а скорость потока возрастает, но незначительно (рис. 10). Сужение канала приводит к уменьшению числа Фруда (рис. 11), глубина потока увеличивается (рис. 9), скорость потока несколько уменьшается (рис. 10). И здесь переход через критическое значение числа Фруда (0.25) невозможен в рамках установившегося течения. В критической точке глубина потока может быть значительна при больших значениях числа Фруда (рис. 7), а его скорость стремится к $(1/5)^{1/2}$.

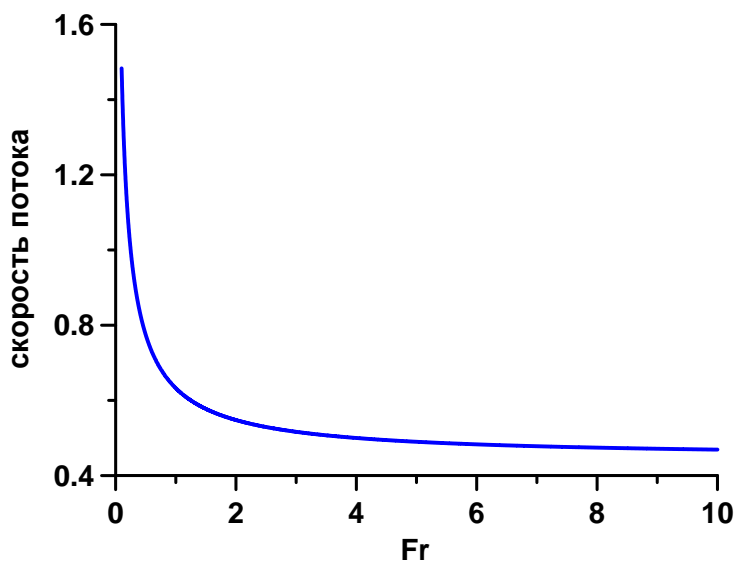


Рис. 8. Скорость потока в критической точке

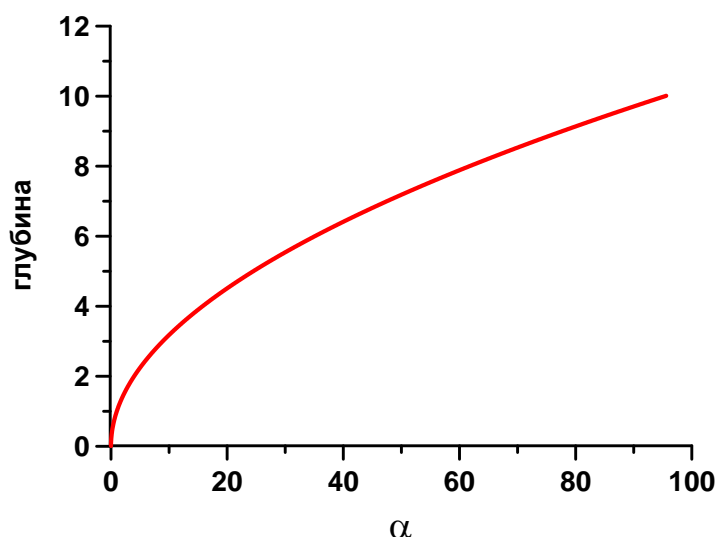


Рис. 9. Изменение глубины потока в треугольном канале при $Fr = 100$

Приведенный пример стационарного течения в треугольном канале переменного сечения демонстрирует важность анализа критического режима в течении воды, в окрестности ее неустановившиеся процессы с образованием гидравлических прыжков будут играть определяющую роль.

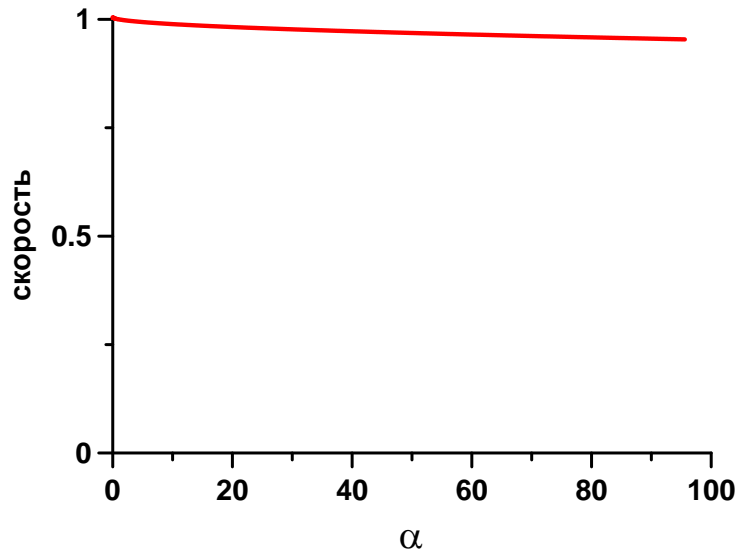


Рис. 10. Изменение скорости потока в треугольном канале при $Fr = 100$

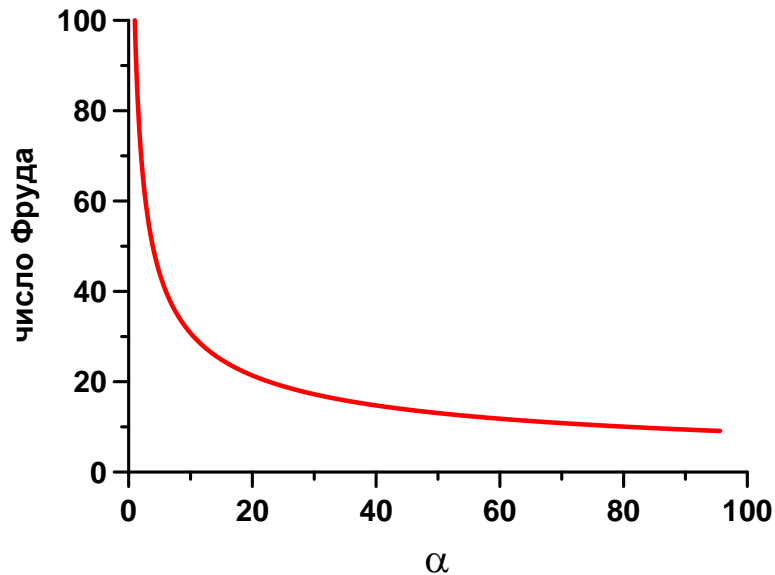


Рис. 11. Изменение локального числа Фруда в треугольном канале при $Fr = 100$

В качестве другого примера рассмотрим трансформацию течения в треугольном канале постоянного сечения, ось которого наклонена к горизонту. В этом случае система уравнений (13)–(14), нормированная на значения переменных в какой то фиксированной точке есть

$$\Delta h(x) = H(x) + \frac{Fr}{H^4(x)} - 1 - Fr, \quad u(x) = \frac{1}{H^2(x)}, \quad (24)$$

где Δh – есть перепад в глубинах оси канала, по сравнению с невозмущенным горизонтальным уровнем (в океанологии за него принимают нулевой уровень моря, а в гидравлике рек России – уровень так называемой Балтийской системы). И здесь при любых начальных значениях числа Фруда зависимость глубины воды H от глубины канала h оказывается немонотонной (рис. 11), что соответствует существованию двух режимов: докритического (левая ветка на рисунке) и сверхкритического (правая ветка на рисунке), не связанных между собой. Критическое значение числа Фруда равно по-прежнему $Fr_{cr} = 0.25$, и параметры потока в критической точке есть

$$H_{cr} = \sqrt[5]{4Fr}, \quad u_{cr} = \frac{1}{H_{cr}^2}, \quad \Delta h_{cr} = H_{cr} + \frac{Fr}{H_{cr}^4} - 1 - Fr. \quad (25)$$

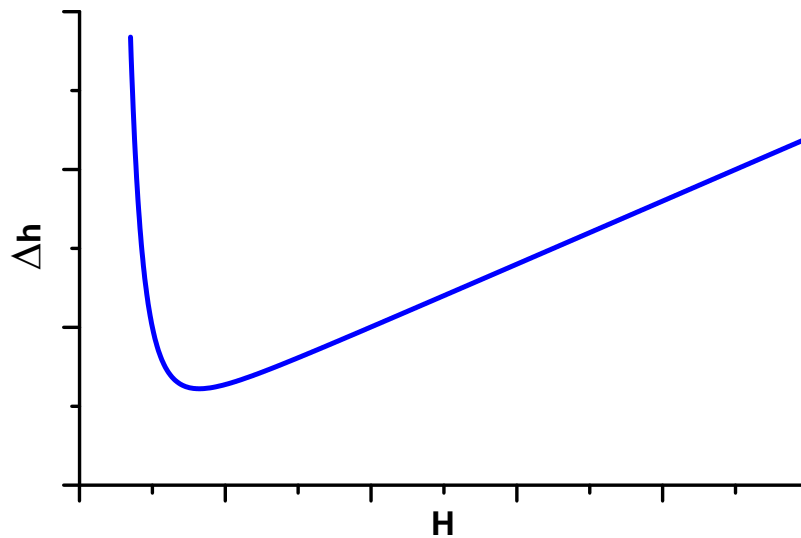


Рис. 12. Связь глубины воды с глубиной наклонного канала треугольного сечения

Связь критической глубины воды в треугольном канале с начальным значением числа Фруда потока представлена на рис. 12. В случае больших значений числа Фруда критическая глубина слабо зависит от него, и в сверхкритическом потоке глубина воды, как и скорость потока, меняются медленно (рис. 13).

Аналогичные расчеты могут быть проделаны и для каналов другой формы (трапециидальной и параболической), во всех случаях очевидно существование критического режима по числу Фруда.

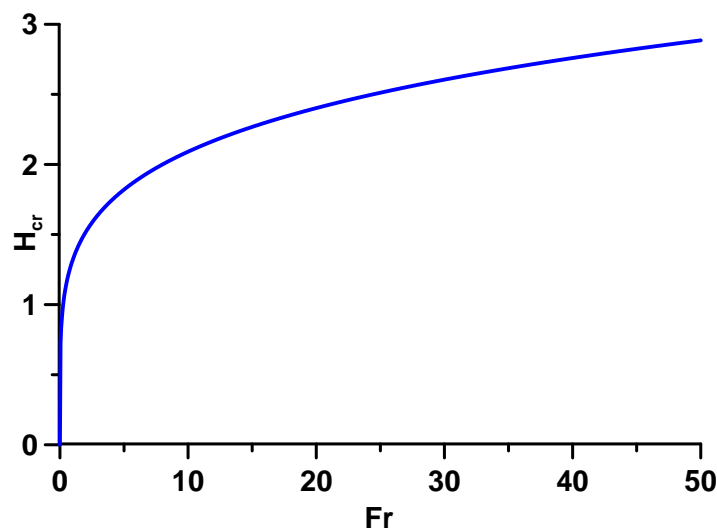


Рис. 13. Критическая глубина воды в наклонном канале треугольного сечения при достижении критического значения числа Фруда

Выводы

Рассмотренные аналитические примеры позволяют качественно выполнить анализ возможных гидрологических режимов в водных потоках, в частности, в малых реках. Что же касается равнинных больших рек, типа рек Ока и Волга, то скорость течения в них мала (около 50 см/с), а глубина велика (несколько метров), так что числа Фруда достаточно малы,

и для них всегда реализуется докритический режим. Ширина реки велика (сотни метров), так что одномерное приближение здесь не работает. Для таких рек двумерные эффекты, приводящие к неоднородности течения поперек реки, являются принципиальными и требуют разработки более точных моделей. Некоторые из них уже применялись к анализу гидрологических процессов в реках Ока и Волга в пределах Нижегородской области.

Работа выполнена при финансовой поддержке регионального гранта РФФИ № 11-05-97006.

Библиографический список

1. **Иванов, А.В.** Математическое моделирование в задачах прогнозирования аварийных ситуаций на Оке в пределах Нижегородской обл. / А.В. Иванов [и др.] // Водные ресурсы, 2000. Т. 27. №3. С. 305–312.
2. **Красильщиков, А.А.** Моделирование аварийных ситуаций и распространения загрязнений на р. Оке / А.А. Красильщиков [и др.] // Известия Академии инженерных наук РФ. Прикладная математика и информатика; НГТУ. – Нижний Новгород, 2000. С. 42–49.
3. **Козырев, О.Р.** Контроль и прогнозирование загрязняющих веществ в реках / О.Р. Козырев [и др.] // Экологическое управление природными ресурсами. – Нижний Новгород, 2002. С. 211–223.
4. **Усовершенствованные методические рекомендации** по оперативному прогнозированию распространения зон опасного аварийного загрязнения в водотоках и водоемах, а также уровней содержания в воде основных загрязняющих веществ. – С.- Петербург, Гидрометеиздат. 1992. – 94 с.
5. **Вольцингер, Н.Е.** Длинноволновая динамика прибрежной зоны / Н.Е. Вольцингер, К.А. Клеванный, Е.Н. Пелиновский. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1989. – 272 с.
6. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Нижний Новгород: Институт прикладной физики РАН. 1996.
7. **Вольцингер, Н.Е.** Расчет гидрологического режима Невской губы / Н.Е. Вольцингер [и др.] // Метеорология и гидрология, 1990. № 1. С. 70–77.
8. **Didenkulova, I.** Nonlinear wave evolution and runup in an inclined channel of a parabolic cross-section / I. Didenkulova, E. Pelinovsky // Phys Fluids 2011. Vol. 23. Issue 8, 086602 (a).
9. **Didenkulova, I.** Runup of tsunami waves in U – shaped bays / I. Didenkulova, E. Pelinovsky // PAGEOPH, 2011. Vol. 168. No. 6-7, 1239-1249 (б).
10. **Didenkulova, I.** Rogue waves in nonlinear hyperbolic systems (shallow-water framework) / I. Didenkulova, E. Pelinovsky // Nonlinearity, 2011. Vol. 24. Pp. 1–18.
11. **Стокер, Дж.** Волны на воде / Дж. Стокер. – М.: ИЛ, 1959.

Дата поступления
в редакцию 25.10.2011

N. Petrukhin, E. Pelinovsky

WATER FLOW MODELING IN THE FRAMEWORK OF 1D SHALLOW-WATER EQUATIONS

The role of analytic solutions in the modeling of the water flow in channels of arbitrary cross-section is discussed. New analytical solutions described the transformation of the steady flow in the triangle channel with variable parameters are obtained.

Key words: transformation of the flow, critical depth, subcritical regime, the simulation of water flow.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.02

Р.М. Дмитриенко¹, А.А. Емельянов², С.А. Золотов², В.Ю. Климашов¹,
С.А. Савихин¹, А.Б. Терентьев²

ПРОБЛЕМА ТОЧНОСТИ ВЫЧИСЛЕНИЙ В МЕТОДЕ ВАРИАЦИИ ФАЗЫ

ФГНУ «Научно-исследовательский радиопизический институт»¹,
ООО «Научно-исследовательский центр специальных вычислительных технологий»²

Описаны методы повышения точности и уменьшения погрешности вычислений в применении к задаче поиска корней уравнения при помощи вариации фазы, также оценивается эффективность применения графических процессоров при использовании данного метода.

Ключевые слова: численные методы, вариация, логарифмический вычет, мантисса, точность.

Введение

В последнее время, в связи с постоянным ростом производительности компьютеров, все чаще поднимаются вопросы о достоверности и надежности компьютерных вычислений. Основной недостаток арифметики с плавающей точкой состоит в том, что фиксируется только относительная ошибка округления. Этот недостаток может привести к потере точности и получению заведомо ложных результатов, например, при суммировании рядов. В случаях, когда ошибки в исходных данных и ошибки округления оказывают сильное влияние на результат вычислений, например, при решении плохо обусловленных систем уравнений, целесообразно вести расчеты с повышенной точностью.

Постановка задачи поиска комплексного корня уравнения

Одним из показательных примеров задач, для которых требуется повышенная точность вычислений и минимизация погрешности, является численное решение уравнений. Рассмотрим задачу нахождения комплексных корней произвольного уравнения

$$f(z) = 0$$

с помощью метода вариации фазы.

Будем считать, что функция $f(z)$ является аналитической внутри некоторой замкнутой области S за исключением конечного числа изолированных особых точек и непрерывна вплоть до границы этой области. Из теории комплексного анализа известно, что разность между полным числом нулей N и полюсов P функции $f(z)$ в области S вычисляется с помощью логарифмического вычета:

$$N - P = \frac{1}{2\pi i} \oint_L \frac{f'(\zeta)}{f(\zeta)} d\zeta,$$

где интегрирование ведется в положительном направлении (против часовой стрелки) по за-

мкнутому спрямляемому контуру L , который ограничивает область S . С другой стороны, известно, что логарифмический вычет функции равен вариации аргумента данной функции, подсчитанной вдоль контура L , то есть

$$\oint_L \frac{f'(\zeta)}{f(\zeta)} d\zeta = i \operatorname{var} (\arg f(z))|_L.$$

На практике применима именно вторая формула. Предполагаем, что нам известны полюса функции $f(z)$ с их кратностями, тогда по числу полных оборотов годографа исходного контура L вокруг начала координат можно найти число нулей внутри контура L . Основная проблема заключается как раз в определении числа полных оборотов, так как годограф в малой окрестности нуля может вести себя довольно сложным образом.

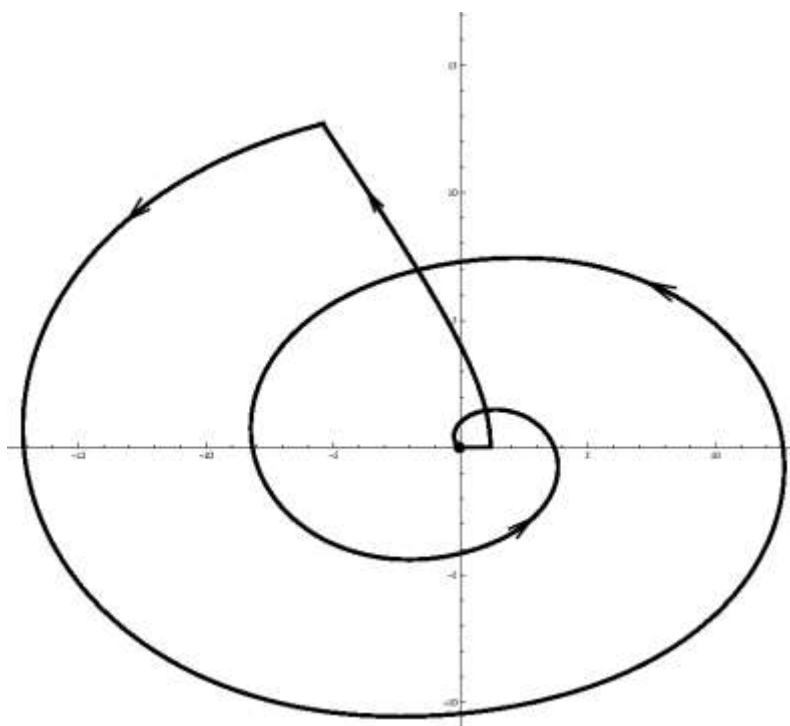


Рис. 1. Пример годографа прямоугольного контура

На рис. 1 показан пример кривой, в которую может перейти прямоугольный контур. По внешнему виду трудно подсчитать все ветки полученной кривой в окрестности нуля: изначально приближаясь к началу координат по спирали, она затем резко уходит в сторону.

Проблема детального исследования поведения годографа может быть решена увеличением шага разбиения исходного контура и повышением точности вычислений.

Авторами предложено два способа повышения точности и уменьшения погрешности, которые были применены к данной задаче. Эксперименты проводились с использованием графических процессоров, и далее будет представлено сравнение эффективности использования CPU и GPU. Но прежде чем переходить к описанию названных методов, целесообразно указать основы представления чисел с плавающей точкой.

Числа с плавающей точкой

В памяти компьютера числа с плавающей точкой представляются последовательным набором битов в следующем формате:

| знак | показатель степени | мантисса |

Под знак отводится один бит (0 — число положительное, 1 — число отрицательное).

Показатель степени и мантисса имеют фиксированный размер, поэтому диапазон представимых в данном формате чисел ограничен. Следовательно, существует наименьшее и наибольшее представимое число. Для формата `double` эти числа 10^{-308} и 10^{308} соответственно. Так как мантисса и показатель степени содержат только определенное количество значащих цифр, то, например, при сложении двух чисел, порядки которых сильно отличаются, можно получить неверный результат.

Рассмотрим пример. Пусть мантисса содержит три значащих цифры, а показатель степени – одну. Тогда при сложении двух чисел $1.23 * 10^3$ и $3.45 * 10^{-2}$ получим

$$1.23 * 10^3 + 3.45 * 10^{-2} = 1230 + 0.0345 = 1230.0345 = 1.23 * 10^3,$$

что неверно. К настоящему моменту существует несколько библиотек для вычислений с повышенной точностью, например, GNU Multi-Precision Library (C++), ARPREC (C++/Fortran). Но все они не получили широкого распространения, так как время, затраченное на расчет с их помощью, в несколько раз превышает время расчета в формате `double`. Но сегодня этот недостаток можно компенсировать, если вести вычисления на графических процессорах, так как они существенно превосходят по производительности центральные процессоры, при большом объеме данных.

Переходим к описанию способов повышения точности и уменьшения погрешности.

Первый способ заключается в эмуляции повышенной точности путем увеличения разрядности мантиссы и показателя степени. Смысл второго способа состоит в том, чтобы уменьшить погрешности вычислений стандартных форматов с плавающей точкой.

Эмуляция повышенной точности

Увеличим объем памяти, выделяемый под мантиссу, и показатель степени и переопределим основные операции арифметики: `+`, `-`, `*`, `/`. Это можно сделать следующим образом. Создадим структуру, которая будет содержать 32 бита под мантиссу, 32 бита под показатель степени и 1 бит под знак. По точности наш формат будет превосходить формат `float` на две десятичных значащих цифры. Для дальнейшего увеличения точности и определения мантиссы можно использовать массив чисел формата `unsigned int`.

```
struct myFloat
{
    unsigned int mantissa;
    unsigned int exp;
    bool sign;
    myFloat operator+ ( myFloat & );
};
```

Далее определим операцию суммирования. Чтобы сложить два числа, сначала выровняем показатели степеней. Для этого сдвинем мантиссу числа с меньшим показателем степени вправо на количество бит, равное разнице между показателями степени, после чего складываем мантиссы. При сложении мантисс может появиться единица в старшем бите, поэтому надо проверить результат операции. Если в результате сложения получилось число меньше какого-либо слагаемого, то есть произошло переполнение, то необходимо сдвинуть мантиссу результата на один бит вправо и записать единицу в нулевой бит. Далее приведен код программы на C++, реализующий операцию сложения.

```
myFloat myFloat :: operator+ ( myFloat & ff2 )
{
    myFloat res;
    if ( exp >= ff2 . exp )
    {
        unsigned int diff = ff2.mantissa >> ( exp - ff2.exp );
        res.exp = exp;
        res.sign = sign;
    }
```

```

res.mantissa = mantissa + diff;
if (res.mantissa < mantissa || res.mantissa < ff2.mantissa)
{
res.mantissa = res.mantissa >> 1;
res.mantissa = res.mantissa | 0x80000000 ;
res.exp++;
}
return res;
}
else
{
unsigned int diff = mantissa >> ( ff2.exp - exp );
res.exp = ff2.exp;
res.sign = ff2.sign;
res.mantissa = ff2.mantissa + diff;
if (res.mantissa < mantissa || res.mantissa < ff2.mantissa)
{
res.mantissa = res.mantissa >> 1;
res.mantissa = res.mantissa | 0x80000000;
res.exp++;
}
return res;
}
}

```

Теперь определим операцию умножения. При умножении двух чисел нашего формата необходимо перемножить мантиссы, сложить показатели степени и определить знак результата. Перемножение мантисс делается следующим образом. Если в мантиссе второго сомножителя на i -м месте стоит единица, то необходимо сдвинуть мантиссу первого множителя на i бит вправо и прибавить к результату. Знак результата операции будет положительным, если знаки сомножителей совпадают, и отрицательным, – если не совпадают.

```

myFloat myFloat :: operator* ( myFloat & ff2 )
{
myFloat res;
res.mantissa = mantissa;
res.exp = 0;
uint tmp = mantissa;
for ( uint i = 0x40000000; i != 0; i >> 1)
{
tmp = tmp >> 1;
if (( ff2.mantissa & i) == i)
{
uint oldmantissa = res.mantissa;
res.mantissa = res.mantissa + tmp;
if ( res.mantissa < oldmantissa )
{
res.mantissa = res.mantissa >> 1;
res.mantice = res.mantissa | 0x80000000;
res.exp = res.exp + 1;
tmp = tmp >> 1;
}
}
}
}
}

```

```

res.exp = res.exp + exp + ff2.exp;
if ( sign == ff2.sign )
res.sign = 0;
else
res.sign = 1;
}

```

Подобным образом можно определить операции вычитания и деления. При применении рассматриваемого метода к решению исходной задачи мы получили, что время работы алгоритма с применением графического процессора с двойной точностью сопоставимо со временем работы центрального процессора с типом данных float. Тем самым, использование типа double с применением графического процессора перестает быть затратным по времени.

Отсутствие большего выигрыша по скорости можно объяснить тем, что при вычислениях по данному методу относительно редко встречаются операции, которые значительно быстрее выполняются на GPU (например, перемножение элементов массива), а выигрыш от использования графического процессора при поэлементном сложении двух массивов незначителен.

Снижение погрешностей в вычислениях с плавающей точкой одинарной и двойной точности

Смысл этого метода состоит в том, чтобы складывать или вычитать числа, близкие по показателям степени. Рассмотрим пример. Пусть имеется число f формата float, равное 100.000.000. Будем прибавлять к нему миллион раз единицу. В результате получим тоже число, равное 100.000.000, что неверно, поскольку формат float вмещает только 7-8 значащих цифр. Рассмотрим подробнее операцию сложения. Для этого определим наш формат как структуру, состоящую из вектора чисел формата float.

```

struct newFloat
{
std :: vector < float > ff;
newFloat operator+ ( newFloat & );
};

```

Пусть есть два экземпляра структуры newFloat: ff1, ff2. Чтобы сложить их, будем переписывать числа из вектора ff2::ff в ff1::ff следующим образом: берем число из ff2::ff и ищем в векторе ff1::ff такое число, чтобы модуль разности показателей степени этих чисел был меньше определенного числа. Выбор этого числа зависит от формата чисел в векторе. Если в векторе ff1::ff, такое число нашлось, то мы их суммируем, если нет, то дописываем число из ff2::ff в конец ff1::ff. После того, как все необходимые сложения в программе выполняются, мы получим вектор чисел. Далее, чтобы получить ответ, необходимо упорядочить этот вектор по возрастанию и просуммировать все его элементы начиная с нулевого. В результате всех этих операций мы значительно уменьшим количество сложений чисел с сильно различающимися показателями степени.

Далее приведем исходный код основных операций для операции сложения. Суммирование двух элементов формата myFloat:

```

newFloat & newFloat::operator+ ( newFloat & ff2 )
{
for ( uint i = 0; i < ff2.size(); i++)
{
uint* bb = ( uint*)( void*)& ff2 [i];
uint exp2 = (bb << 1) >> 16;
for ( uint j = 0; j < this.size (); j++)
{
uint* aa = ( uint*)( void*)& this [j];
uint exp1 = (aa << 1) >> 16;

```

```
if ( abs(exp1 - exp2 ) < 8)
{
this [j] = this [j] + ff2 [i];
}
}
}
```

Сортировка вектора и суммирование вектора чисел:

```
float answer ( newFloat & ff)
{
for ( uint i = 0; i < ff.size(); i ++)
{
for ( uint j = i; j < ff.size(); j ++)
{
if (ff[i] > ff[j])
{
float tmp;
tmp = ff[i];
ff[i] = ff[j];
ff[j] = tmp;
}
}
}
float answ = 0;
for ( uint i = 0; i < ff.size(); i++)
answ = answ + ff[i];
return answ;
}
```

Вновь рассмотрим предыдущий пример. В результате первого сложения чисел 100.000.000 и 1, мы получим вектор <100.000.000, 1>. При следующем сложении вектор будет иметь вид <100.000.000, 2>. В конечном итоге, нам придется складывать числа, близкие по показателю степени, что даст верный результат.

Эксперименты по использованию данного метода при решении описанной в начале статьи задачи показали, что с применением графического процессора скорость выполнения указанного алгоритма увеличивается в два раза. Этот показатель ниже заявленного производителями графических карт. Объяснение подобной ситуации заключается в том, что данный метод использует сортировку и прочие операции с данными, которые могут вызывать множественные коллизии обращения к памяти.

Выводы

Рассмотренные способы реализации вычислений повышенной точности требуют много времени на выполнение расчетов. Но при больших объемах данных и высокой сложности вычислений данные способы можно реализовать на архитектуре графических процессоров, что позволит существенно сократить время выполнения вычислений. Выигрыш во времени вычислений достигается благодаря тому, что графические процессоры содержат сотни потоковых ядер, что позволяет запустить вычислительный алгоритм, если его можно распараллелить, в большом количестве потоков выполнения. Для сравнения, в настоящий момент максимальное число ядер для центрального процессора равняется 12 (AMD Opteron 6174), для графических процессоров это число составляет 1600 (ATI Radeon HD 5870).

Представленные методы были применены к вычислительной задаче поиска решения уравнения. Результаты показали, что использование графических процессоров в сочетании с правильной организацией данных и действий над ними дают неплохой результат. Пред-

ложенный подход к решению поставленной задачи позволил увеличить размер разрядной сетки, не уменьшая скорости, а также понизить погрешность в вычислениях с плавающей точкой.

-
1. **Литвинов, Г.Л.** Приближенная рациональная арифметика с контролируемыми ошибками округления / Г.Л. Литвинов, А.Я. Радионов, А.В. Чуркин. – М.: Вычислительные технологии, 2001. Т. 6. С. 87–94.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

**R.M. Dmitrienko, A.A. Emelyanov, S.A. Zolotov, V.U. Klimashov,
S.A. Savikhin, A.B. Terentev**

**THE PROBLEM OF THE COMPUTING PRECISION
OF THE PHASE VARIATION METHOD**

This paper describes methods of precision improvement and computing error reduction as applied to the problem of phase variation-based equation roots solving. Estimations for the performance of GPU-based implementations of this method are given in the paper as well.

Key words: numerical computing, variation, logarithmic residue, mantissa, precision.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Модернизованы формулы, методы и алгоритмы построения высокореалистичных изображений сцен как с простыми, так и сложными оптическими эффектами: глобальным освещением, полутенями, многократными отражениями и преломлениями. Направления лучей в пересекающихся объектах определяются с помощью приоритетного стека трассировки.

Ключевые слова: освещение, тень, отражение, преломление, трассировка лучей, стек, приоритет.

Создание фотореалистичных изображений сложных сцен, включающих множество объектов и источников освещения с разнообразными оптическими свойствами, невозможно без изучения физических процессов взаимодействия света с материалами и средами распространения, а также без разработки и использования адекватных этим процессам моделей и алгоритмов.

Целью компьютерного моделирования оптических процессов является получение изображения, в котором цвет каждого пиксела рассчитан с учетом суммарной световой энергии, пришедшей в соответствующий светочувствительный рецептор наблюдателя.

Наибольшими возможностями моделирования распространения света обладает метод трассировки лучей (МТЛ). В его *обратном* варианте от наблюдателя проводятся первичные лучи $\mathbf{p}_{ij} + \mathbf{V}_{ij}t$, приведенные к центрам каждого из $n \times m$ рецепторов виртуальной проективной плоскости \mathbf{p}_{ij} (рис. 1). В зависимости от удаленности наблюдателя от сцены выбираются формулы расчета вектора направления луча \mathbf{V}_{ij} и проекции сцены:

- в сцене с *дальним* наблюдателем, удаленным в бесконечность по вектору \mathbf{S} , все лучи с параметром $t \in (-\infty, \infty)$ идут в одном и том же направлении $\mathbf{V}_{ij} = -\mathbf{S}$, образуя параллельную проекцию сцены. Лучи, проходящие через угловые рецепторы проективной плоскости, ограничивают призму видимости с двумя бесконечно удаленными основаниями;
- в сцене с *ближним* наблюдателем все лучи выходят из *точки* \mathbf{S} и идут в разных направлениях $\mathbf{V}_{ij} = \mathbf{p}_{ij} - \mathbf{S}$ с параметром $t \in (-1, \infty)$, создавая перспективную проекцию. Угловые лучи ограничивают пирамиду видимости с вершиной \mathbf{S} и бесконечно удаленным основанием.

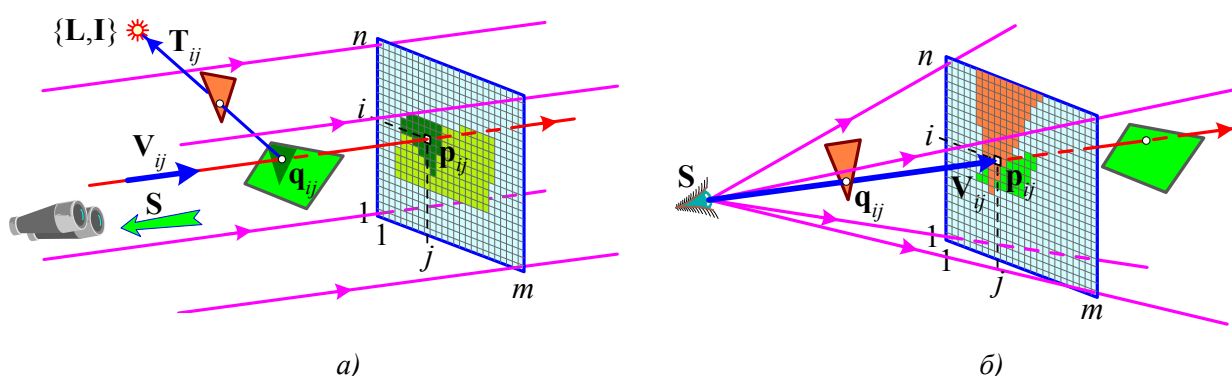


Рис. 1. Обратная трассировка лучей:
 а – дальний наблюдатель; б – ближний наблюдатель

Рассмотрим задачи, решаемые компьютерной трассировкой световых лучей на основе трех законов геометрической оптики [1] (четвертый закон обратимости хода луча положен в

основу выбора направления трассировки – обратного ходу реальных лучей), а также их способность моделировать *простые* оптические эффекты.

1. Распространение луча в однородной среде по принципу Ферма происходит *прямолинейно*. Отсюда возникает *первая* и *главная* в МТЛ комплексная задача: нахождение точек пересечения лучей с объектами сцены. В этот комплекс входят:

- расчет параметров и точек пересечения *неограниченной* прямой с *неограниченными* поверхностями объектов сцены;
- тест принадлежности одного из параметров t интервалу определения луча Ω_t ;
- тест принадлежности найденных точек *ограниченным* областям поверхностей Π ;
- выбор из множества точек пересечений луча с разными поверхностями ближайшей к его началу точки \mathbf{q} с минимальным значением параметра t ;
- расчет вектора нормали \mathbf{N} в точке \mathbf{q} ближайшей поверхности.

Пересечение луча $\mathbf{l}(t) = \mathbf{p} + \mathbf{V}t$, $t \in \Omega_t$, с поверхностью, описываемой неявной моделью $f(\mathbf{q}) = 0$, находится решением уравнения $f(\mathbf{p} + \mathbf{V}t) = 0$ относительно параметра t , проверкой условия $t \in \Omega_t$ и получением искомой точки $\mathbf{q} = \mathbf{l}(t)$. Как показано на рис. 2, *а*, одни лучи (1) могут проходить мимо поверхности (тогда уравнение не имеет действительного решения), другие (2) удаляются от нее (уравнение имеет недопустимое решение $t \notin \Omega_t$). Если же решение допустимо, но не единственно, то луч (3) пересекает поверхность в нескольких точках, из которых берется ближайшая к началу луча с минимальным параметром t . Пересечение лучом (4) поверхности вне области Π обнаруживается специальными пространственными тестами принадлежности $\mathbf{q} \in \Pi$.

В частном случае бесконечная плоскость, заданная точкой \mathbf{o} и вектором нормали \mathbf{N} (рис. 2, *б*), описывается неявной функцией $f(\mathbf{q}) = (\mathbf{q} - \mathbf{o}) \circ \mathbf{N}$. При условии $\mathbf{V} \circ \mathbf{N} \neq 0$ непараллельности плоскости и прямой существуют параметр и точка их пересечения:

$$t = \frac{(\mathbf{o} - \mathbf{p}) \circ \mathbf{N}}{\mathbf{V} \circ \mathbf{N}} \Rightarrow \mathbf{q} = \mathbf{p} + \frac{(\mathbf{o} - \mathbf{p}) \circ \mathbf{N}}{\mathbf{V} \circ \mathbf{N}} \mathbf{V}. \quad (1)$$

Принадлежность точки \mathbf{q} ограниченному участку плоскости Π , например, полигональной грани полиэдра, определяется тестами ориентации, рассмотренными в [2].

Пересечение прямой $\mathbf{l}(t)$ с параметрической поверхностью $\mathbf{q}(\tau, \theta)$ находится решением векторного уравнения $\mathbf{p} + \mathbf{V}t = \mathbf{q}(\tau, \theta)$ относительно параметров t , τ и θ , проверкой их попадания в допустимые области Ω_t , $\Omega_{\tau\theta}$ и расчетом точки $\mathbf{q} = \mathbf{l}(t)$ с минимальным значением t . В частности, бесконечная плоскость, заданная точкой \mathbf{o} и направляющими векторами \mathbf{U} и \mathbf{W} (рис. 2, *б*), описывается параметрической функцией $\mathbf{q}(\tau, \theta) = \mathbf{o} + \mathbf{U}\tau + \mathbf{W}\theta$ с неограниченными параметрами τ и θ . При непараллельности плоскости и прямой (невырожденности матрицы, составленной из векторов \mathbf{V} , \mathbf{U} и \mathbf{W}) существуют параметры и точка пересечения:

$$[t \ \tau \ \theta] = (\mathbf{o} - \mathbf{p}) \begin{bmatrix} \mathbf{V} \\ -\mathbf{U} \\ -\mathbf{W} \end{bmatrix}^{-1} \Rightarrow \mathbf{q} = \mathbf{p} + \mathbf{V}t. \quad (2)$$

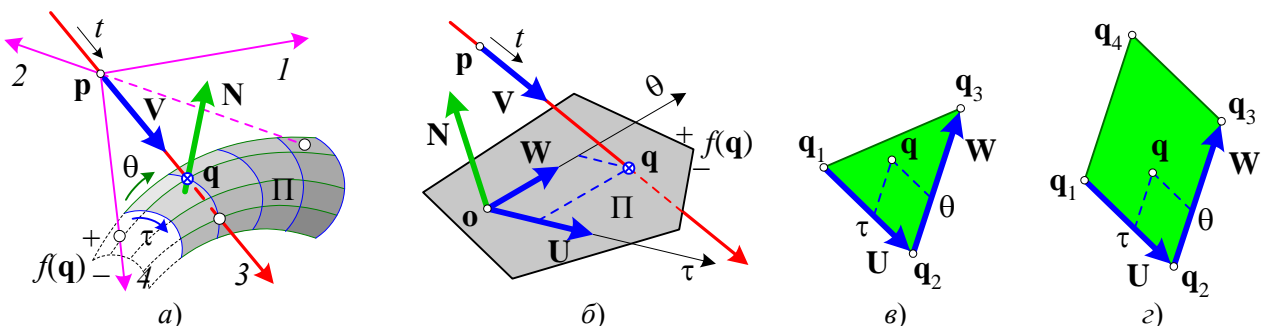


Рис. 2. Пересечение луча с поверхностью

Знание параметров τ и θ позволяет заменить сложный пространственный тест $\mathbf{q} \in \Pi$ простой проверкой $\{\tau, \theta\} \in \Omega_{\tau\theta}$. К примеру, треугольник $\mathbf{q}_1\mathbf{q}_2\mathbf{q}_3$ и параллелограмм $\mathbf{q}_1\mathbf{q}_2\mathbf{q}_3\mathbf{q}_4$ (из этих плоских фигур можно составить большинство полигональных граней 3d-объектов) задаются точкой $\mathbf{o} = \mathbf{q}_1$ и векторами $\mathbf{U} = \mathbf{q}_2 - \mathbf{q}_1$ и $\mathbf{W} = \mathbf{q}_3 - \mathbf{q}_2$, а область допустимых параметров определяется следующими неравенствами:

- у треугольника $0 \leq \theta \leq \tau \leq 1$ (рис. 2, в);
- у параллелограмма $0 \leq \tau \leq 1$ и $0 \leq \theta \leq 1$ (рис. 2, г).

Вектор нормали неявной поверхности $f(\mathbf{q}) = 0$ есть вектор градиента $\mathbf{N}(\mathbf{q}) = df(\mathbf{q})/d\mathbf{q}$, а нормаль параметрической поверхности в точке $\mathbf{q}(\tau, \theta)$ находится как векторное произведение $\mathbf{N}(\tau, \theta) = \mathbf{U}(\tau, \theta) \times \mathbf{W}(\tau, \theta)$ направляющих векторов $\mathbf{U}(\tau, \theta) = \partial\mathbf{q}/\partial\tau$ и $\mathbf{W}(\tau, \theta) = \partial\mathbf{q}/\partial\theta$.

На расчете пересечений основаны алгоритмы геометрической *визуализации* – нахождения и вывода на экран только видимых элементов объектов сцены – и построения простого оптического эффекта – *тени* одного объекта на другой. В алгоритме визуализации в экранный пиксел \mathbf{p}_{ij} выводится суммарная освещенность ближайшей видимой точки \mathbf{q}_{ij} всеми источниками света с учетом ее собственного цвета (см. рис. 1).

В алгоритме тенеобразования из найденной точки \mathbf{q}_{ij} выпускается теневой зонд $\mathbf{q}_{ij} + \mathbf{T}_{ij}t$. В случае *ближнего* расположения источника света в *точке* \mathbf{L} вектор направления луча берется равным $\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{L} - \mathbf{q}_{ij}$, а параметр луча – в отрезке $t \in [0, 1]$. К *дальному* источнику, удаленному в бесконечность по *вектору* \mathbf{L} , все зондирующие лучи идут в одном направлении $\mathbf{T}_{ij} = \mathbf{L}$, а параметр определен в интервале $t \in [0, \infty)$. В отсутствие пересечения зонда с объектами сцены к освещенности точки \mathbf{q}_{ij} добавляется цвет источника \mathbf{I} . В противном случае в этой точке будет пониженная освещенность, присущая области тени.

Работу рассмотренных алгоритмов иллюстрируют изображения, построенные на рис. 3: визуализация системы непересекающихся (а, в) и пересекающихся (б, г) тел, а также построение всех физически возможных простых теней в сценах (в, г) с одним источником света.

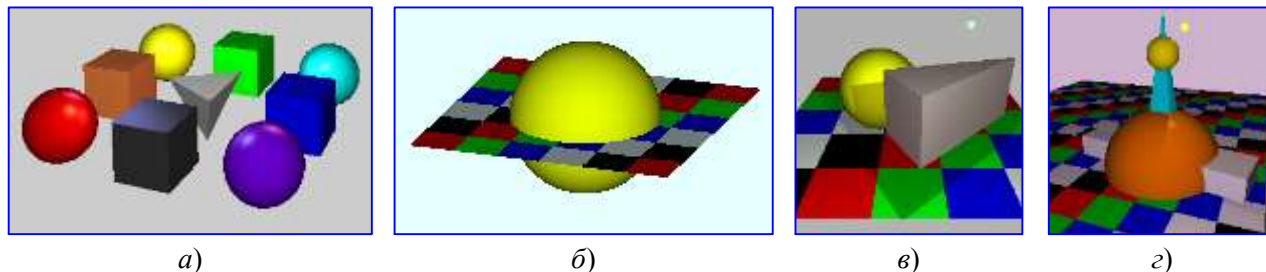


Рис. 3. Оптические эффекты визуализации и простой тени

В сцене с несколькими точечными источниками света возможно появление *сложной* тени (рис. 4, а): в точках типа \mathbf{q}_1 , экранированных от всех источников, возникает *полная* тень, окрашенная лишь фоновым освещением. В частично экранированных точках типа \mathbf{q}_2 появляется *полутень*. Этот оптический эффект иллюстрирует рис. 4, б. Пространственно протяженный линейный либо площадный источник аппроксимируется системой точечных источников и создает размытые границы теней (рис. 4, в).

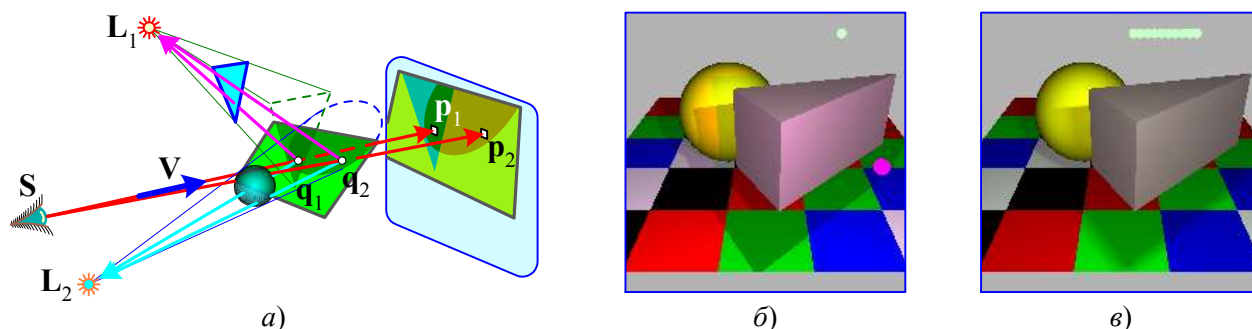


Рис. 4. Оптический эффект сложной тени

Вторая задача состоит в обнаружении прохождения луча через точку \mathbf{L} , где расположен источник света интенсивности \mathbf{I} , и прекращении его дальнейшей трассировки с выводом на экран изображения источника. Основные затруднения:

- ни один из приведенных лучей не проходит точно через бесконечно малую точку;
- даже если «притянуть» точечную проекцию источника к центру ближайшего рецептора, то изображение размером в один пиксел будет с трудом различимо в окне вывода;
- выводу на экран подлежит источник, не заслоненный никакими объектами;
- близкие к наблюдателю источники должны выглядеть крупнее, чем дальние.

Для разрешения этих проблем заменим точечный источник сферой радиуса ρ , вычислим по [2] расстояние от точки \mathbf{L} до луча и параметр ее проекции на вектор \mathbf{V} (рис. 5):

$$d = |(\mathbf{L} - \mathbf{p}) \times \bar{\mathbf{V}}|, \quad t_L = \frac{(\mathbf{L} - \mathbf{p}) \circ \mathbf{V}}{\mathbf{V} \circ \mathbf{V}}.$$

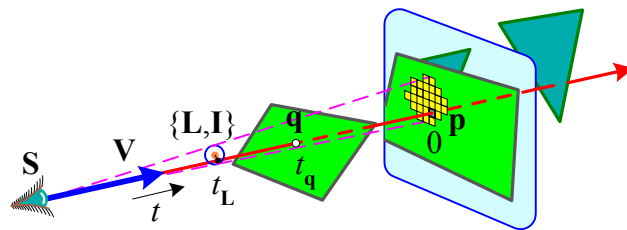


Рис. 5. Прохождение луча через источник

Если луч $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ пересекает какие-нибудь объекты сцены, то в (1) или (2) уже найден параметр $t_q \in \Omega_t$ самой близкой точки пересечения \mathbf{q} (в отсутствие пересечений $t_q = \infty$). При выполнении условий прохождения луча в ρ -окрестности видимой и ближайшей точки \mathbf{L} :

$$(d \leq \rho) \wedge (t_L \in \Omega_t) \wedge (t_L \leq t_q) \tag{3}$$

пиксел \mathbf{p} окрашивается в цвет источника \mathbf{I} . Множество таких пикселов составляет на экране круглое либо эллиптическое пятно, условно изображающее точечный источник света. Примером служит сцена на рис. 4, б, в которой есть как приближенный, так и удаленный от наблюдателя точечные источники.

Третья задача, связанная с распространением света в однородной среде, изучает уменьшение интенсивности луча по закону Бугера [1] в экспоненциальной зависимости

$$\delta(d) = \exp(-\lambda d) \leq 1 \tag{4}$$

от пройденного им расстояния d и показателя затухания $\lambda \geq 0$. Благодаря этому эффекту, в изображении сцены появляется воздушная перспектива – ослабление цветовой окраски далеких объектов. Это хорошо заметно при сравнении рис. 3, з и рис. 6, построенном обратным МТЛ с показателем затухания внешней среды $\lambda = 1 / 100r_c$, где r_c – радиус верхней сферы.

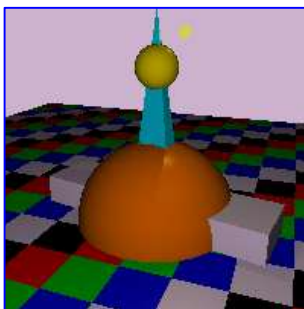


Рис. 6. Затухание света

С помощью умножения вектора падающего луча \mathbf{V} в момент пересечения с поверхностью на коэффициент затухания $\delta(d) < 1$, можно своевременно остановить его трассировку при уменьшении длины вектора $|\mathbf{V}|$ в заданное число раз.

2. В точке \mathbf{q} пересечения падающего луча $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ с гладкой поверхностью возникает отраженный луч $\mathbf{q} + \mathbf{M}t$ (рис. 7, а). Вектор его направления \mathbf{M} имеет длину $|\mathbf{M}| = |\mathbf{V}|$ и складывается из тангенциальной $\mathbf{V}_{||} = \mathbf{V} - v\bar{\mathbf{N}}$ и инверсии нормальной $\mathbf{V}_{\perp} = v\bar{\mathbf{N}}$ составляющих вектора падающего луча \mathbf{V} , где $v = \mathbf{V} \circ \bar{\mathbf{N}}$:

$$\mathbf{M} = \mathbf{V} - 2v\bar{\mathbf{N}}. \tag{5}$$

Этот вектор образует с нормалью \mathbf{N} угол отражения $\beta = \angle(\mathbf{M}, \mathbf{N})$, равный углу падения $\alpha = \angle(\mathbf{V}, -\mathbf{N})$. Далее производится трассировка отраженного луча до пересечения с ближай-

шим объектом сцены. В результате на гладких поверхностях в точках типа q_1 видны отражения других объектов (рис. 7, б). В точках типа q_2 , из которых отраженные лучи идут в точки L расположения источников, видны световые блики цвета I , окруженные радиально затухающим ореолом диффузно отраженных лучей источника. Остальные вторичные лучи покидают пространство сцены, добавляя в рецептор p фоновую освещенность.

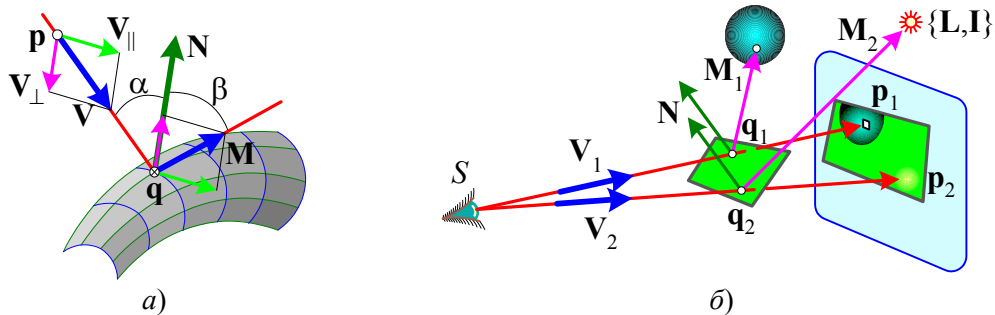


Рис. 7. Отражение луча

На рис. 8 смоделированы простые (*однократные*) отражения световых лучей от зеркальных поверхностей. В сценах (а, в) построены все видимые отражения объектов друг в друге, а в сцены (б, г) добавлено по два точечных источника света, отражения которых видны в точках, принадлежащих ограниченным областям отражающих поверхностей.

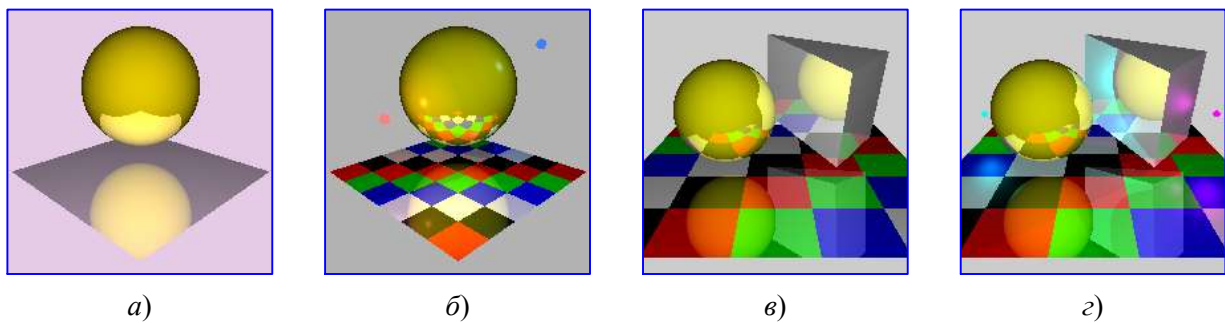


Рис. 8. Сцены с простыми отражениями

Если продолжить трассировку второго, третьего и последующих отраженных лучей, накапливая освещенности в точках пересечений, то в корне дерева трассировки (i, j -го рецептора соберется суммарный цвет точек отражения всех объектов, принесших в него световую энергию по всем ветвям отраженных лучей. Так моделируется оптический эффект *сложного* отражения. На рис. 9, а показан ход лучей, ограничивающих первое (1) и второе (2) отражения зеркальной сферы в зеркальной плоскости. Изображения двух сцен (рис. 8, б, в) рассчитанных максимум до четвертых отражений, показаны на рис. 9, б, в.

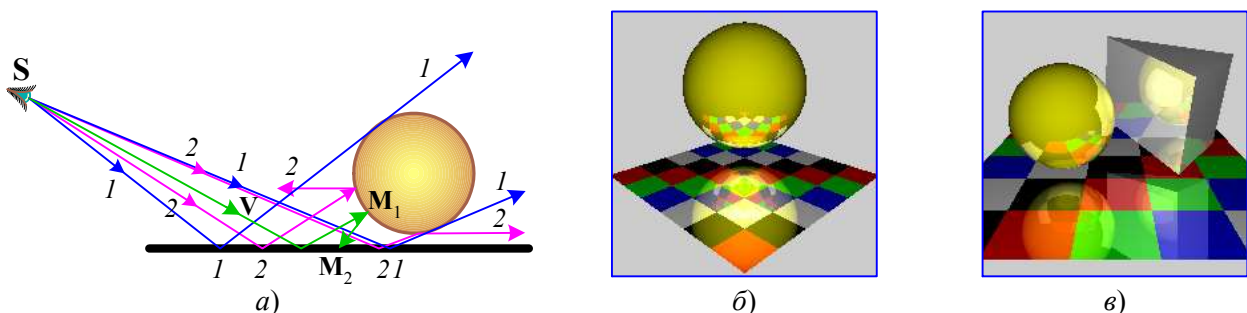


Рис. 9. Оптический эффект сложного отражения

3. При пересечении лучом $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ в точке \mathbf{q} границы раздела прозрачных сред с показателями преломления n_1 и n_2 возникает *преломленный* луч $\mathbf{q} + \mathbf{R}t$ (рис. 10). Вектор его направления \mathbf{R} образует с нормалью \mathbf{N} угол преломления $\gamma < 90^\circ$, связанный с углом падения $\alpha < 90^\circ$ законом Снеллиуса - Декарта $n_1 \sin(\alpha) = n_2 \sin(\gamma)$ [1]. Следует отметить, что в наиболее популярных учебниках по компьютерной графике [3, 4 и др.] формулы расчета вектора \mathbf{R} различны. Более того, они не являются универсальными. Для достижения результата их авторы предъявляют к исходным данным специальные требования:

- векторы \mathbf{V} и \mathbf{R} нормированы;
- нормаль \mathbf{N} направлена навстречу падающему лучу;
- иногда и вектор \mathbf{V} должен выходить из точки \mathbf{q} , что совсем противоречит здравому смыслу!

Все эти ограничения вынуждают перед каждым расчетом преломления делать дополнительные проверки и коррекции векторов, втискивающие общую задачу в прокрустово ложе частного случая. Без этих предвычислений направление преломленного луча может оказаться неверным, например, при сонаправленности векторов \mathbf{V} и \mathbf{N} либо при $n_1 > n_2$.

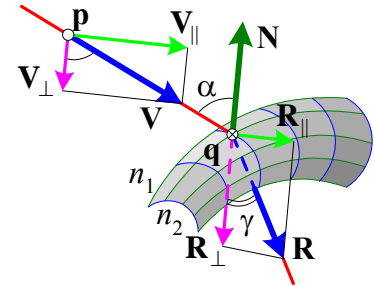


Рис. 10. Преломление луча

Обозначив относительный показатель преломления $n_n = n_1/n_2$, выведем *универсальную* формулу преломления, исходя из закона Снеллиуса-Декарта и естественного условия равенства длин векторов $|\mathbf{V}| = |\mathbf{R}|$, позволяющего эффективно моделировать затухание луча от пройденного им расстояния по закону Бугера (4). Найдем нормальную и тангенциальную составляющие вектора \mathbf{R} , используя число $v = \mathbf{V} \circ \bar{\mathbf{N}}$, его модуль $|v| = |\mathbf{V}| \cos(\alpha)$, ранее полученные зависимости $\mathbf{V}_\perp = v \bar{\mathbf{N}}$, $\mathbf{V}_\parallel = \mathbf{V} - v \bar{\mathbf{N}}$ и соотношение синусов углов $\sin(\gamma) = n_n \sin(\alpha)$:

$$\mathbf{R}_\perp = \frac{\cos(\gamma)}{\cos(\alpha)} \mathbf{V}_\perp = \frac{\sqrt{1 - n_n^2 (1 - \cos^2(\alpha))}}{\cos(\alpha)} v \bar{\mathbf{N}} = \sqrt{n_n^2 + (1 - n_n^2)} |\mathbf{V}/v|^2 v \bar{\mathbf{N}}, \quad \mathbf{R}_\parallel = \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\alpha)} \mathbf{V}_\parallel = n_n (\mathbf{V} - v \bar{\mathbf{N}}).$$

Суммируя составляющие, получаем вектор направления преломленного луча и условие его существования, вытекающее из положительности дискриминанта $1 - n_n^2 \sin^2(\alpha) > 0$:

$$\mathbf{R} = n_n \mathbf{V} + \left(\sqrt{n_n^2 + (1 - n_n^2)} |\mathbf{V}/v|^2 - n_n \right) v \bar{\mathbf{N}}, \quad n_n |\bar{\mathbf{V}} \times \bar{\mathbf{N}}| < 1. \quad (6)$$

Нарушение последнего неравенства дает эффект полного внутреннего отражения. Полученное решение автоматически верно при любом из двух возможных направлений нормали относительно падающего луча – как встречного, так и попутного. Это позволяет одинаково моделировать как одинарное, так и двойное преломления лучей, падающих на разные стороны одной и той же поверхности с односторонне ориентированными нормальными (рис. 11). Направление второго преломленного луча рассчитывается по (6) следующим образом

$$\mathbf{R}_2 = n_n^{-1} \mathbf{R}_1 + \left(\sqrt{n_n^{-2} + (1 - n_n^{-2})} |\mathbf{R}_1/\rho|^2 - n_n^{-1} \right) \rho \bar{\mathbf{N}}_2 \quad \text{при} \quad \rho = \mathbf{R}_1 \circ \bar{\mathbf{N}}_2, \quad n_n^{-1} |\bar{\mathbf{R}}_1 \times \bar{\mathbf{N}}_2| < 1.$$

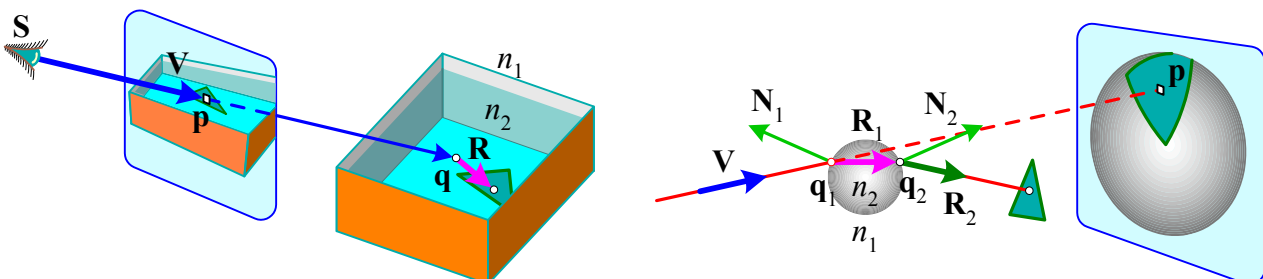


Рис. 11. Одинарное и двойное лучепреломление

Отнесем одинарное и двойное преломление лучей в *непересекающихся* прозрачных объектах к категории *простых* преломлений, в которых луч от входа до выхода распространяется в одной и той же среде. Для автоматизации учета пересечений лучом границы раздела окружающей среды с показателем преломления n_0 (у воздуха $n_0 \approx 1$, у воды $n_0 \approx 1.33$) и m -й прозрачной среды с показателем n_m инициализируем динамический *флаг пересечений* $f_p = 1$ и будем его инвертировать после каждого пересечения поверхности обособленного объекта.

Тогда в (6) можно использовать относительный показатель $n_i = (n_0/n_m)^{f_i}$ без анализа четности числа пересечений. Моделирование простых преломлений в сценах с желтой янтарной сферой ($n_{\text{янт}} = 1.6$) и белой стеклянной призмой ($n_{\text{стекл}} = 1.52$) произведено на рис. 12.

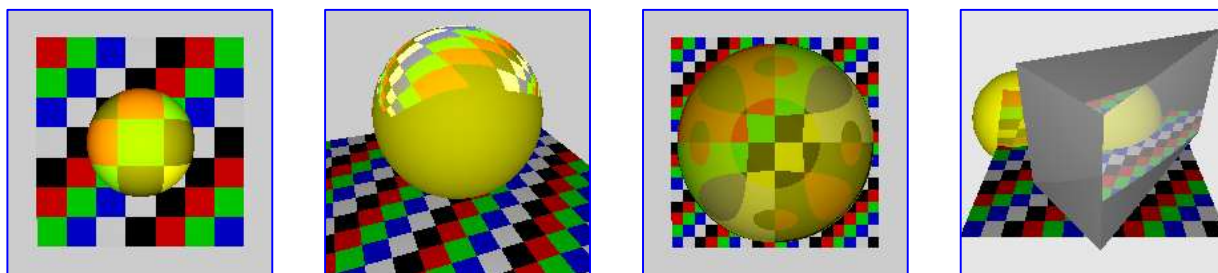


Рис. 12. Сцены с простыми преломлениями

На рис. 13 построен ряд компьютерно синтезированных изображений сцен с *непересекающимися* объектами и сложными оптическими эффектами, демонстрирующими богатые возможности и мощь метода обратной трассировки лучей.

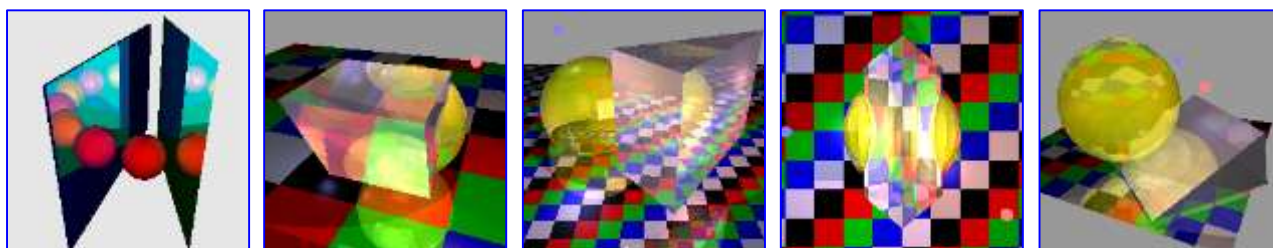


Рис. 13. Сцены со сложными отражениями и преломлениями

Сложнее обстоит дело с *пересекающимися* прозрачными объектами из-за необходимости выбора показателя преломления области пространства, принадлежащей обоим телам. Иногда (погруженные в жидкость инородные прозрачные тела, воздушные пузырьки в стекле и т. п.) интуитивно понятно, какая среда вытесняет собой другую. Но в сборных конструкциях, например в ювелирных изделиях, выбор замещающей среды производится не из физических, а из технологических соображений путем изменения формы деталей. В компьютерном моделировании также нетрудно геометрически частично либо полностью вдвинуть прозрачные объекты друг в друга. Как же тогда, не решая задачу логического конструирования, выбрать материал и показатель преломления области пересечения?

Решение этой проблемы состоит в присвоении $n_{об}$ объектам сцены *приоритетов* $pr_m > 0 \quad \forall m=1, n_{об}$ по следующему правилу: из пары объектов с соотношением приоритетов $pr_a > pr_b$ объект a замещает своим материалом пересекаемую область объекта b . Все потенциально пересекающиеся объекты должны иметь разные приоритеты. Внешней среде, вытесняемой всеми объектами, присваивается наименьший приоритет $pr_0 = 0$.

Для хранения истории распространения луча введем *приоритетный стек трассировки* (ПСТ) pst с вершиной $\sigma = pst_1$, хранящей номер текущей среды луча. Дальнейший ход лучей, выходящих из точки \mathbf{q} , определяется соотношением приоритетов σ -й среды распространения падающего луча $\mathbf{p} + \mathbf{V}t$ и номера m пересеченного им объекта:

- при $pr_m \geq pr_\sigma$ генерируются отраженный $\mathbf{q} + \mathbf{M}t$ и преломленный $\mathbf{q} + \mathbf{R}t$ лучи, а к освещенностям, доставленным этими лучами, добавляются освещенности фоновым и точечными источниками света;

- при $pr_m < pr_\sigma$ падающий луч пересекает поверхность менее приоритетного объекта и продолжает свой путь в прежнем направлении \mathbf{V} без добавления каких-либо освещенностей. В результате часть m -го объекта, погруженная в среду σ , становится *невидимой*.

Для реализации описанных эффектов распространения лучей организуем следующую дисциплину обслуживания приоритетного стека трассировки:

- начальное состояние $pst = \{0\}$ соответствует зарождению первичного луча во внешней среде с показателем преломления n_0 ;

- прохождение луча в среде m -го объекта с приоритетом $pr_m < pr_\sigma$ изменяет ПСТ следующим образом:

- ◊ на *входе* в объект (вход определяется по отсутствию числа m во *всем* списке pst) его номер вставляется между вершиной стека σ и его правым остатком $\overset{\leftarrow}{pst}$, полученным левым сдвигом списка pst :

$$m \notin pst \Rightarrow pst = \{\sigma, m, \overset{\leftarrow}{pst}\};$$

- ◊ на *выходе* луча из объекта его номер удаляется из стека:

$$m \in pst \Rightarrow pst = pst \setminus m;$$

- трассировка луча, *отраженного* от поверхности m -го объекта с приоритетом $pr_m \geq pr_\sigma$, производится с неизменным ПСТ;

- трассировка луча, *преломленного* на поверхности m -го объекта с приоритетом $pr_m \geq pr_\sigma$, изменяет приоритетный стек следующим образом:

- ◊ на *входе* в объект его номер добавляется в начало стека:

$$m \notin pst \Rightarrow pst = \{m, pst\};$$

- ◊ на *выходе* преломленного луча номер объекта удаляется из стека:

$$m \in pst \Rightarrow pst = pst \setminus m.$$

Значения вершины стека σ до и χ после его изменения используются для расчета необходимого в (6) относительного показателя преломления на поверхности раздела двух сред:

$$n_\pi = n_\sigma / n_\chi.$$

Проиллюстрируем динамику изменения приоритетного стека трассировки с начальное значение $pst = \{0\}$ на примерах прохождения преломленного луча из воздуха с приоритетом $pr_0 = 0$ через два пересекающихся объекта — сферу 1 и призму 2 с приоритетами $pr_1 \neq pr_2$:

- при $pr_1 = 2 > pr_2 = 1$ общая область объектов имеет показатель преломления сферы $n_1 = 1.6$ (рис. 14, а). Падающий из внешней среды луч \mathbf{V} , встретившись с ближайшим объектом 2, терпит в точке \mathbf{q}_1 первое преломление в луч \mathbf{R}_1 . Поскольку $pr_2 > pr_0$, то в вершину стека добавляется номер объекта 2, после чего стек становится равным $pst = \{2, 0\}$, а относительный показатель $n_\pi = n_0 / n_2$. Следующая ближайшая точка пересечения \mathbf{q}_2 принадлежит поверхности сферы 1 с *большим* приоритетом $pr_1 > pr_2$, поэтому ее номер также добавляется в вершину стека, после чего $pst = \{1, 2, 0\}$, а луч приобретает направление \mathbf{R}_2 , вычисленное при $n_\pi = n_2 / n_1$. В третьей точке пересечения \mathbf{q}_3 луч выходит из призмы с *меньшим* приоритетом $pr_2 < pr_1$, поэтому ее номер 2 удаляется из стека, после чего $pst = \{1, 0\}$. Луч при этом сохранил направление \mathbf{R}_2 . Наконец, в точке \mathbf{q}_4 он выходит из сферы, ее номер 1 удаляется из стека, и тот принимает исходный вид $pst = \{0\}$, что соответствует прохождению луча \mathbf{R}_3 , вычисленного при $n_\pi = n_1 / n_0$, снова во внешней среде;

- при $pr_2 = 2 > pr_1 = 1$ общая область объектов имеет показатель преломления призмы $n_2 = 1.52$ (рис. 14, б). Падающий луч \mathbf{V} изменяет в точке \mathbf{q}_1 направление на \mathbf{R}_1 , вычисленное по (6) при $n_\pi = n_0 / n_2$. Следующая ближайшая точка пересечения \mathbf{q}_2 лежит на поверхности сферы 1 с

меньшим приоритетом $pr_1 < pr_2$, поэтому ее номер добавляется под вершину стека, после чего $pst = \{2, 1, 0\}$, а луч сохраняет направление \mathbf{R}_1 . В третьей точке пересечения \mathbf{q}_3 луч выходит из призмы, поэтому ее номер 2 удаляется из стека: $pst = \{1, 0\}$, а луч меняет направление на \mathbf{R}_2 при $n_n = n_2 / n_1$. Наконец, в точке \mathbf{q}_4 он выходит из объекта l во внешнюю среду, число l удаляется из стека преломлений и тот восстанавливает исходное состояние $pst = \{0\}$.

Небольшие изменения направлений преломленных лучей при смене приоритетов объектов объясняют геометрические и оптические различия изображений в области пересечения призмы и сферы. Визуальные доказательства выводов из проведенного анализа представлены изображениями на рис. 14, б, в и 14, д, е, построенными за четыре уровня преломления.

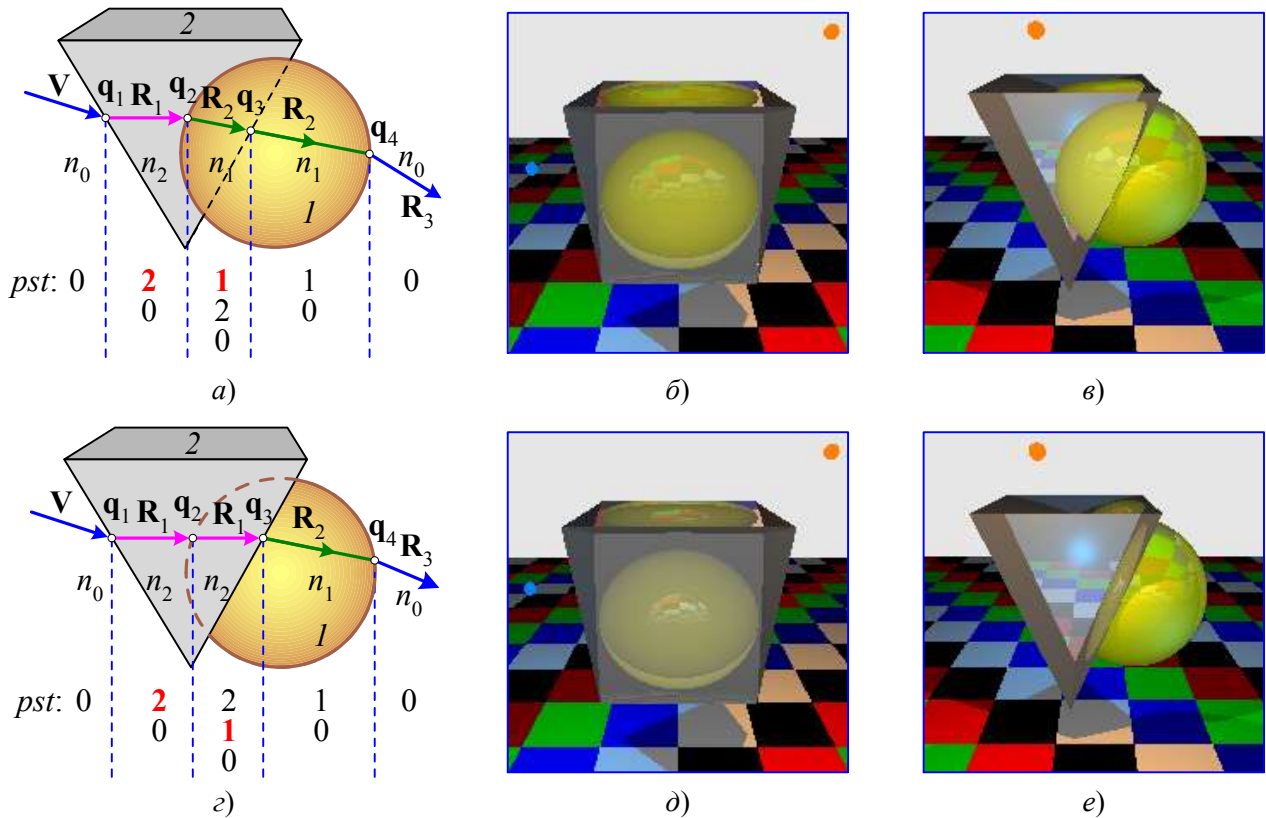


Рис. 14. Преломление в сценах с пересечением объектов

Метод приоритетного стека трассировки правильно работает и в случае полного охватывания одного прозрачного объекта другим, в чем убеждает рис. 15, где построены схема хода луча и изображения сцен, отличающихся соотношением приоритетов сферы pr_1 и призмы pr_2 . Последняя пара рисунков демонстрирует эффект невидимости неприоритетного объекта. При $pr_1 > pr_2$ и охватывании сферы призмой луч дважды подряд входит в эти объекты, а затем в обратном порядке выходит во внешнюю среду. Но стоило задать $pr_2 > pr_1$ — и пропали все следы присутствия сферы внутри призмы, в том числе и ее тень от точечного источника, также находящегося внутри призмы.

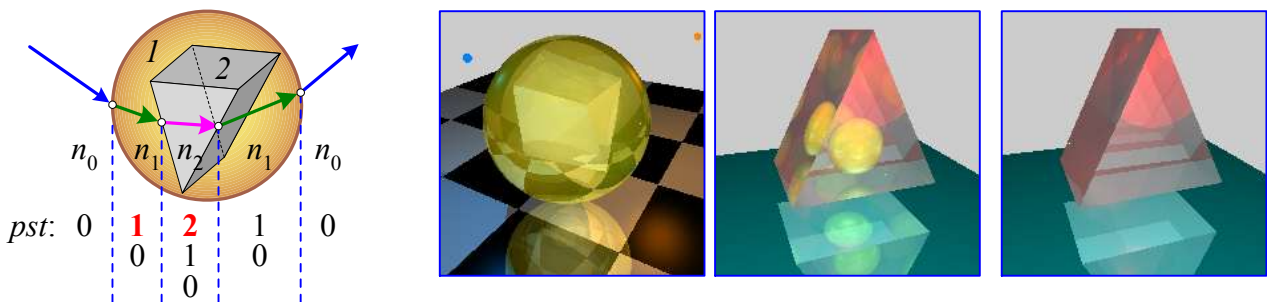


Рис. 15. Преломление в сценах с охватыванием объектов

Полное представление о динамике изменения приоритетного стека дает рис. 16, а, где схематично построено до четырех уровней трассировки одного первичного луча \mathbf{V} в сцене с тремя прозрачными пересекающимися объектами — сферы 1 с показателем преломления $n_1 = 2$, параллелепипеда 2 с $n_2 = 2.5$ и призмы 3 с $n_3 = 1.5$. Для удобства анализа стека приоритеты объектов приняты равными их номерам и упорядочены по правилу $pr_1 < pr_2 < pr_3$. Лучи, не встречающие на своем пути никаких объектов, дальнейшему ветвлению не подвергаются и обозначены тупиковыми.

Компьютерное моделирование данной сцены выполнено на рис. 16, б. Для сравнения на рис. 16, в показан визуальный результат перенумерации объектов и прежним соотношением приоритетов и номеров $pr_1 < pr_2 < pr_3$. Оба изображения построены максимум за шесть уровней отражения и 15 уровней преломления.

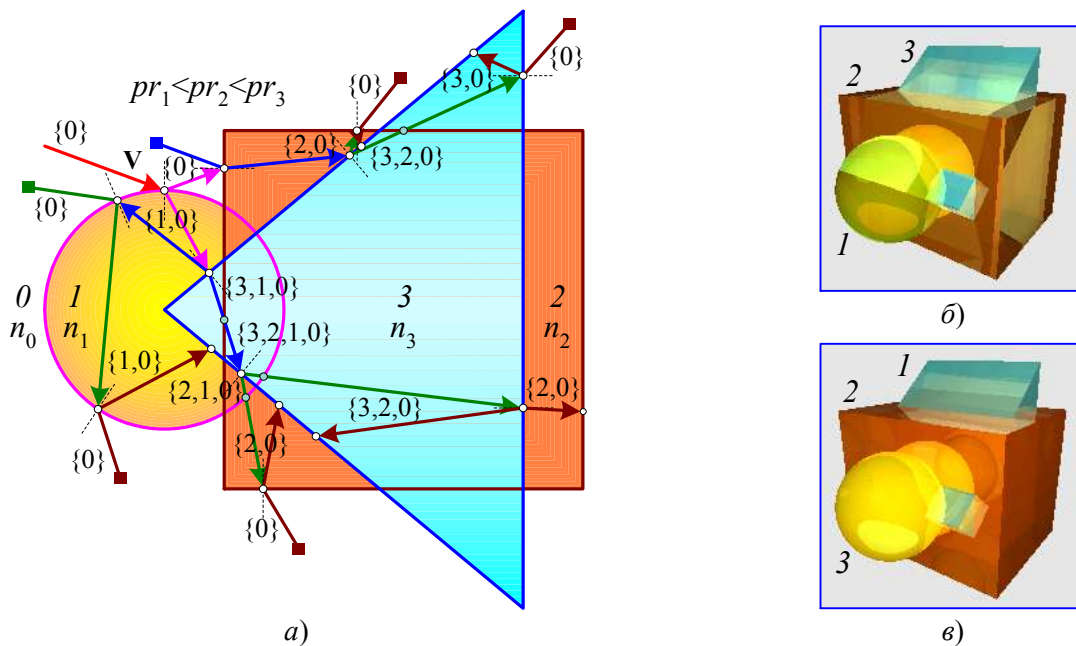


Рис. 16. Работа приоритетного стека трассировки

На рис. 17 представлены фотореалистичные изображения композиций, состоящих из пересекающихся тел с внутренними точечными источниками света. В данных, подготовленных для моделирования этих сцен, был задан полный комплект сложных оптических эффектов с глубиной ветвления дерева трассировки до 12 уровней по отражению и 18 уровней по преломлению. Особенно эффектно выглядит архитектурная композиция последней сцены, включающей пять объектов: клетчатую непрозрачную доску 3, стоящую на ней полусферу 4, которая пересекается со слабо отражающим свет непрозрачным параллелепипедом 5 и с вертикальной пирамидой 2, протыкающей своей вершиной сферу 1. Приоритеты этих объектов следуют в порядке уменьшения: $pr_3 > pr_5 > pr_2 > pr_1 > pr_4$.

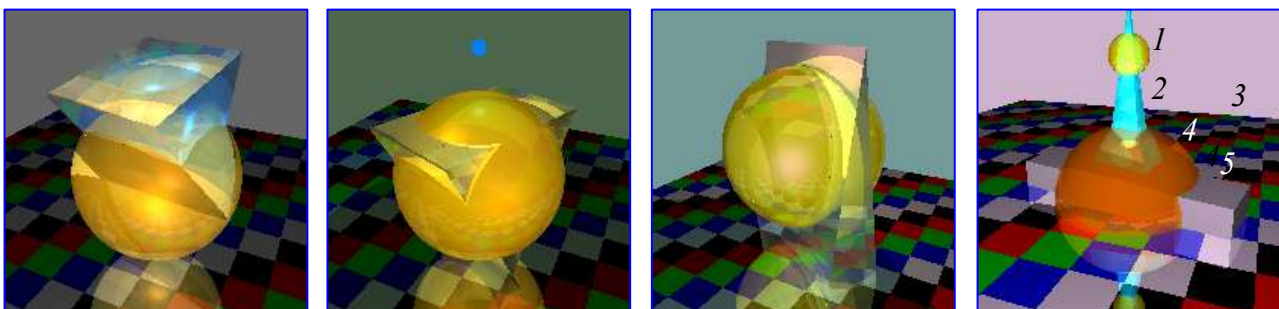


Рис. 17. Преломление в сценах с пересекающимися объектами

Выводы

В статье рассмотрен комплекс задач и методов синтеза фотореалистичных изображений сцен с разной сложности оптическими эффектами визуализации, тенеобразования, отражения и преломления. Получена универсальная формула расчета направления преломленного луча, правильно работающая при любых исходных данных. Корректное проведение отраженных и преломленных лучей в сценах с пересекающимися прозрачными объектами обеспечивается с помощью приоритетного стека трассировки. Изложение каждой темы сопровождается поясняющими схемами и иллюстрируется изображениями, созданными методом обратной трассировки лучей в программной среде MathCAD.

Обозначения

$|\mathbf{V}|$ – длина вектора \mathbf{V} .

$\bar{\mathbf{V}} = \mathbf{V}/|\mathbf{V}|$ – нормированный вектор \mathbf{V} единичной длины.

$\mathbf{V} \circ \mathbf{N}$ – скалярное произведение векторов \mathbf{V} и \mathbf{N} .

$\mathbf{V} \times \mathbf{N}$ – векторное произведение векторов \mathbf{V} и \mathbf{N} .

Библиографический список

1. Ландсберг, Г.С. Оптика / Г.С. Ландсберг. – М.: Наука. 1976. – 928 с.
2. Никулин, Е.А. Компьютерная геометрия и алгоритмы машинной графики: учеб. пособие для вузов / Е.А. Никулин. – СПб.: БХВ-Петербург. 2005. – 560 с.
3. Роджерс, Д. Алгоритмические основы машинной графики / Д. Роджерс. – М.: Мир. 1989. – 512 с.
4. Шикин, Е.В. Компьютерная графика. Динамика, реалистические изображения / Е.В. Шикин, А.В. Боресков. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ. 1995. – 288 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

Е.А. Nikulin

COMPUTER MODELLING OF OPTICAL EFFECTS

Improved formulae, methods and algorithms of highly realistic scenery rendering with both simple and complex optical effects — global illumination, penumbras, repeated reflections and refractions. To determine a ray deviation on an object intersection boundary, an approach of prioritized tracing stack is utilized.

Key words: illumination, shadow, reflection, refraction, raytracing, stack, priority.

УДК 681.3

В.В. Кангин, Д.Н. Ямолдинов

**SCADA ДЛЯ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ПРОМЫШЛЕННОЙ СЕТИ PLCNET**

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

Рассматриваются вопросы проектирования SCADA для распределенной системы управления (PCY), построенной на основе промышленной сети PlcNet. Показано, что при проектировании SCADA-систем проблема обмена информацией между контроллерным и диспетчерским уровнями PCY является центральной. Решение этой проблемы лежит в плоскости организации клиент-серверных отношений между SCADA-системой и OPC-сервером, поставляемым разработчиком сетевой аппаратуры. В этом случае проблемы обмена сводятся к информационному обмену между SCADA-системой, играющей роль OPC-клиента, и OPC-сервером. Разработаны алгоритмы просмотрщика тегов, позволяющего визуализировать значения 32 тегов, принятых по сети из контроллеров нижнего уровня, а также процедур и функций, обеспечивающих следующие возможности просмотрщика тегов: запуск OPC-сервера, добавление в него имени сегмента и имен тегов, определение типа тегов и вывода значений тегов в окна на форме просмотрщика тегов, останов OPC-сервера.

Ключевые слова: распределенная система управления, промышленная сеть, SCADA-система, клиент-серверные отношения, OPC-клиент, OPC-сервер.

Постановка задачи

В настоящее время наблюдается качественный скачок в развитии систем управления технологическим оборудованием и технологическими процессами. Системы управления стали децентрализованными, распределенными. Таким образом, в настоящее время можно говорить о распределенных системах управления.

Промышленные сети представляют собой физическую среду, на базе которой реализуются PCY. На нижнем уровне этой структуры находятся контроллеры – устройства, осуществляющие непосредственное управление технологическими процессами в реальном времени. Контроллер должен решать задачу управления быстро, в темпе протекания технологического процесса.

На верхнем уровне PCY расположены рабочие станции, позволяющие выполнять следующие задачи:

- сбор данных о параметрах технологического процесса, их обработка и архивирование принятой информации;
- визуализация информации о ходе технологического процесса, сигнализация о предаварийных и аварийных ситуациях;
- формирование сводок, журналов, отчетов и т.д.;
- формирование команд оператора по изменению параметров настройки и режимов работы контроллеров;
- автоматическое управление ходом технологического процесса (только в ряде случаев и для решения задач невысокого быстродействия).

Рабочие станции верхнего уровня представляют собой автоматизированные рабочие места (АРМ) производственного персонала, обслуживающего технологический процесс: операторы, технологи, наладчики, диспетчеры и т.д. Верхний уровень PCY называют *диспетчерским*, или *операторским*, уровнем. Диспетчерский уровень представлен персональными компьютерами (ПК), рабочими станциями, промышленными компьютерами и т.д.

Контроллеры, решая задачу непосредственного управления технологическим оборудованием, принимают сигналы с датчиков и выдают управляющие сигналы на исполнитель-

ные механизмы. Одновременно с этим они решают еще одну важную задачу: передают информацию о состоянии технологического процесса на компьютеры верхнего диспетчерского уровня. В ряде случаев контроллеры могут обмениваться данными и между собой. Промышленная сеть и есть та физическая среда, по которой происходит обмен информацией между активными компонентами (узлами) PCY.

Каждый технологический параметр представлен в сети в виде некоторой переменной – тега, который характеризуется величиной, качеством передачи (приема) по сети, типом и т.д.

Выделение в PCY двух уровней позволяет вести речь о программном обеспечении (ПО) для верхнего и для нижнего уровня. На нижнем уровне широко используются специализированные языки программирования по стандарту IEC 61131-3. К таким языкам, принадлежащим к группе языков Functional Block Diagrams (FBD) – функциональных блоковых диаграмм, относится язык, входящий в систему программирования контроллеров UltraLogik. Этот язык позволяет легко выполнить проектирование управляющих программ высокой степени сложности. Какие бы алгоритмы не реализовала управляющая программа контроллера, важно, чтобы она еще передавала определенную нужную информацию в сеть. В UltraLogik это делается просто. Достаточно той или иной переменной (параметр технологического процесса, состояние того или иного датчика, управляющий сигнал и т.д.) присвоить статус «сетевая», как она гарантированно будет периодически передаваться контроллером в сеть.

ПО верхнего уровня реализуется в виде SCADA-системы (Supervisory Control and Data Acquisition – система сбора данных и оперативного диспетчерского управления). Задачи, которые выполняют SCADA-системы, были обозначены ранее, но центральной является задача по приему тегов из сети. Для этих целей используются специальные приложения (программы), называемые OPC-серверами. OPC-сервер считывает значения тегов из сети и передает их приложению – клиенту. SCADA-системы являются клиентами OPC-серверов [1].

Высокая стоимость существующих SCADA-систем, отсутствие качественной технической документации, избыточность, за которую приходится платить пользователю, делают процесс внедрения SCADA-систем в производство весьма непростым. Однако проектирование SCADA-систем можно выполнить с помощью таких программных средств, как Delphi, Visual C++, VBA. Они имеют в своем составе все необходимые средства для работы с OPC – серверами, графикой, мультипликацией, базами данных и т.д.

Модель PCY

Многоуровневая модель современной PCY приведена на рис. 1. Ей можно поставить в соответствие модель сетевого обслуживания диспетчерского и контроллерного уровней PCY (рис. 2).

Контроллерный уровень обслуживается одной из промышленных сетей на основе протоколов CAN, PLCNET, PROFIBUS и других. Верхний, диспетчерский, уровень, как правило, обслуживается локальной сетью на основе протоколов Ethernet, TokenRing, ARCNet и других.

Один или несколько ПК в такой модели должны выполнять роль шлюза, т.е. обеспечивать передачу информации из сети одного типа в сеть другого типа.

На рис. 3 приведена более подробная реализация PCY. Нижний, контроллерный, уровень объединяет N контроллеров с помощью промышленной сети PlcNet. Верхний диспетчерский уровень объединяет ряд ПК с помощью сети Ethernet. Среди этих ПК один должен выполнять роль мастера (Master) для сети PlcNet, т.е. он должен иметь возможность принимать теги из сети PlcNet от контроллеров.

Для сети типа PlcNet в качестве контроллеров можно использовать PC-base контроллеры ADAM-5510. Сеть PlcNet организована на базе интерфейса RS-485 и реализуется в виде сегментов. Каждый из сегментов связан с одним из COM-портов ПК-мастера. Для преобразования сигналов интерфейса RS-232 в сигналы интерфейса RS-485 используется преобразователь интерфейсов ADAM-4520.



Рис. 1. Многоуровневая модель современной PCS

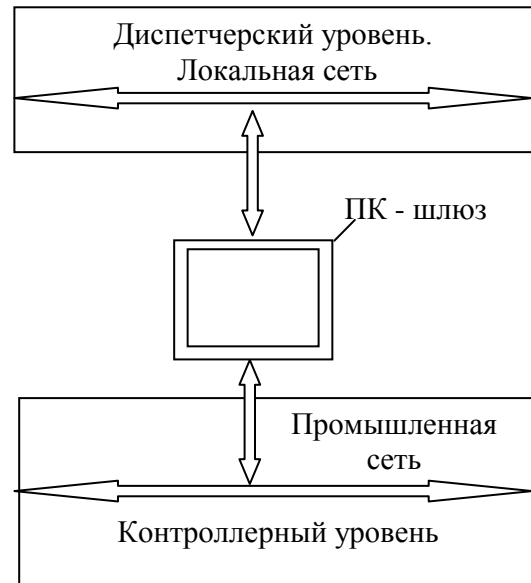


Рис. 2. Модель сетевого обслуживания диспетчерского и контроллерного уровней PCS

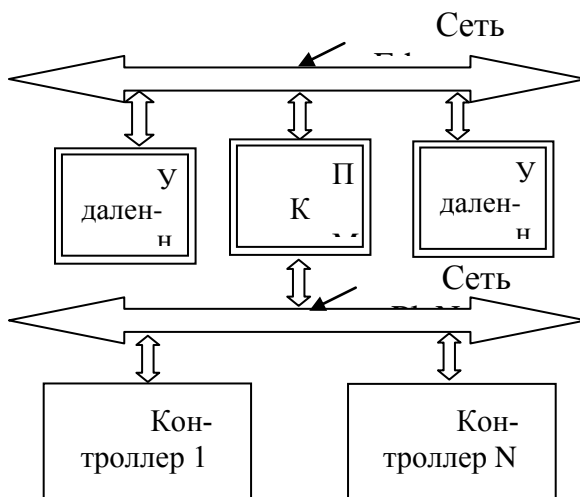


Рис. 3. PCS на основе промышленной сети PlcNet

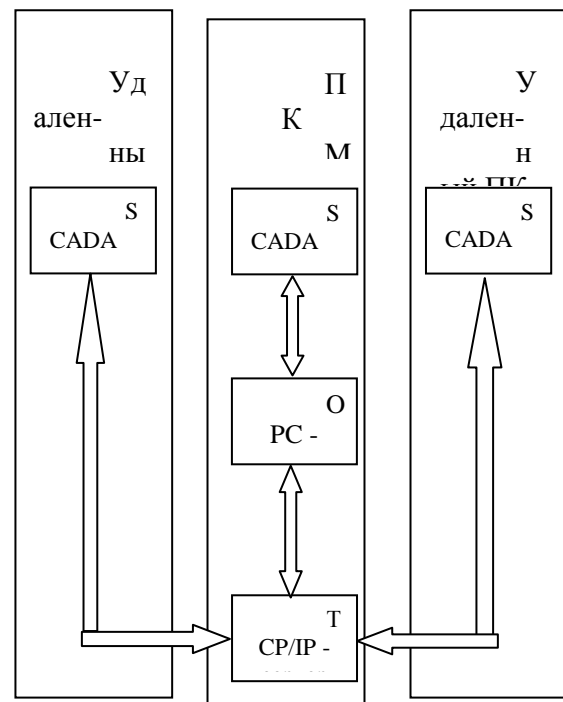


Рис. 4. Взаимодействие программного обеспечения компьютеров диспетчерского уровня

Максимальное количество контроллеров, подключенных к одному сегменту сети, равно 32. ПК-мастер принимает информацию с контроллеров по сети PlcNet и затем может ее передавать по сети Ethernet удаленным ПК, образующим диспетчерский уровень.

На рис. 4 показано взаимодействие программного обеспечения компьютеров диспетчерского уровня в части передачи информации, поступившей от контроллера в ПК-мастер по сети PlcNet.

Прием этой информации из сети выполняется с помощью специальной программы OPC-сервера.

SCADA-система, расположенная на ПК-мастере, взаимодействует с OPC-сервером напрямую. SCADA-системы, расположенные на других удаленных ПК сети Ethernet, получают информацию из OPC-сервера через другую программу (TCP/IP-сервер), которая должна располагаться на ПК-мастере. Для сети PlcNet широко используется OPC-сервер фирмы Fastwel – Fastwel PLCNet OPC Server. Этот сервер позволяет не только читать информацию из контроллеров, но и передавать ее в обратном направлении – из SCADA-системы в контроллеры PCY.

Организация SCADA-системы

Рассмотрим более подробно процесс приема информации из контроллеров PCY в SCADA-систему ПК-мастера. Для этого SCADA-систему реализуем в виде просмотрщика тегов – переменных сети PlcNet [2]. Внешний вид рабочего окна просмотрщика тегов показан на рис. 5.

Алгоритм работы просмотрщика тегов приведен на рис. 6. На рис. 7 показан алгоритм функции *GetItemType*, которая возвращает тип тега по его значению *ItemValue*.



ULTRANET_1.FE.MOTOR1	ULTRANET_1.FE.MOTOR2	ULTRANET_1.FE.MOTOR3	ULTRANET_1.FE.MOTOR4
True	True	False	False
ULTRANET_1.FE.MOTOR5	ULTRANET_1.FE.MOTOR6	ULTRANET_1.FE.MOTOR7	ULTRANET_1.FE.MOTOR8
False	False	False	False
ULTRANET_1.FE.M9	ULTRANET_1.FE.M10	ULTRANET_1.FE.M11	ULTRANET_1.FE.M12
True	True	True	True
ULTRANET_1.FE.M13	ULTRANET_1.FE.M14	ULTRANET_1.FE.M15	ULTRANET_1.FE.M16
True	True	True	True
ULTRANET_1.FE.Vxod1	ULTRANET_1.FE.Vxod2	ULTRANET_1.FE.Vxod3	ULTRANET_1.FE.Vxod4
0.8472669	4.3003874	0.0000489	0.0000989
ULTRANET_1.FE.Vxod5	ULTRANET_1.FE.Vxod6	ULTRANET_1.FE.Vxod7	ULTRANET_1.FE.Vxod8
-0.0000507	0.0000525	0.0000668	0.0000161
ULTRANET_1.FE.Strob1	ULTRANET_1.FE.Strob2	ULTRANET_1.FE.Strob3	ULTRANET_1.FE.Strob4
True	True	False	False
ULTRANET_1.FE.Strob5	ULTRANET_1.FE.Strob6	ULTRANET_1.FE.Strob7	ULTRANET_1.FE.Strob8
False	False	False	False

Рис. 5. Окно просмотрщика тегов

Важным обстоятельством при работе всего просмотрщика тегов является то, что вся информация, которую выдает OPC-сервер, представлена в строковом формате *string* [3]. Функция *GetItemType* используется в процедуре *TMainForm.Timer1Timer*.

Сначала (блок 2) типу тега присваивается значение *Timer*. Функция формирует результат в виде строки. Затем (блок 3) анализируется значение *ItemValue* на равенство True или *False*. Эти два значения может принимать только переменная или константа типа *Boolean*. При выполнении одного из этих условий, типу тега присваивается значение *Boolean*.

Если тег не имеет тип *Boolean*, то начинается посимвольная проверка *ItemValue* (блоки 5, 6, 7, 8). Если в результате этой проверки оказывается, что *i*-й символ принимает значение «.» или «,», то типу тега сразу присваивается значение *Float* – действительное число (блок 9). Точка или запятая являются обязательными разделителями в действительных числах.

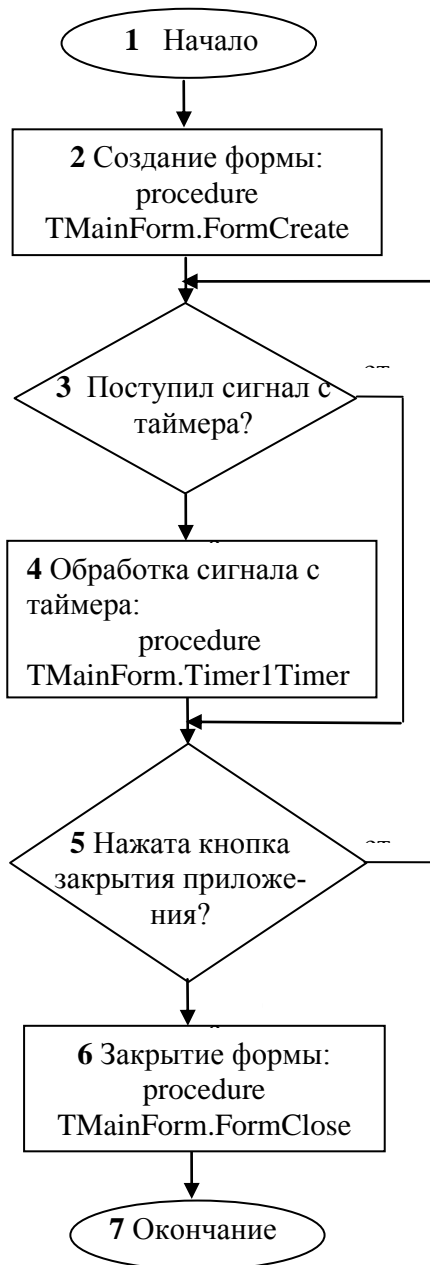


Рис. 6. Алгоритм работы просмотрщика тегов

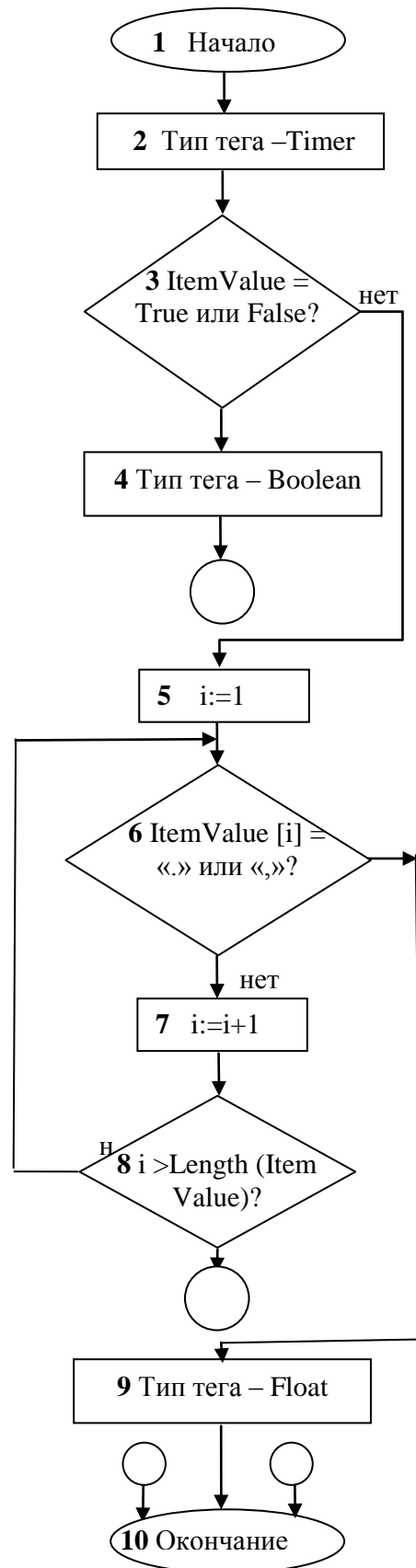


Рис. 7. Алгоритм функции GetItemType

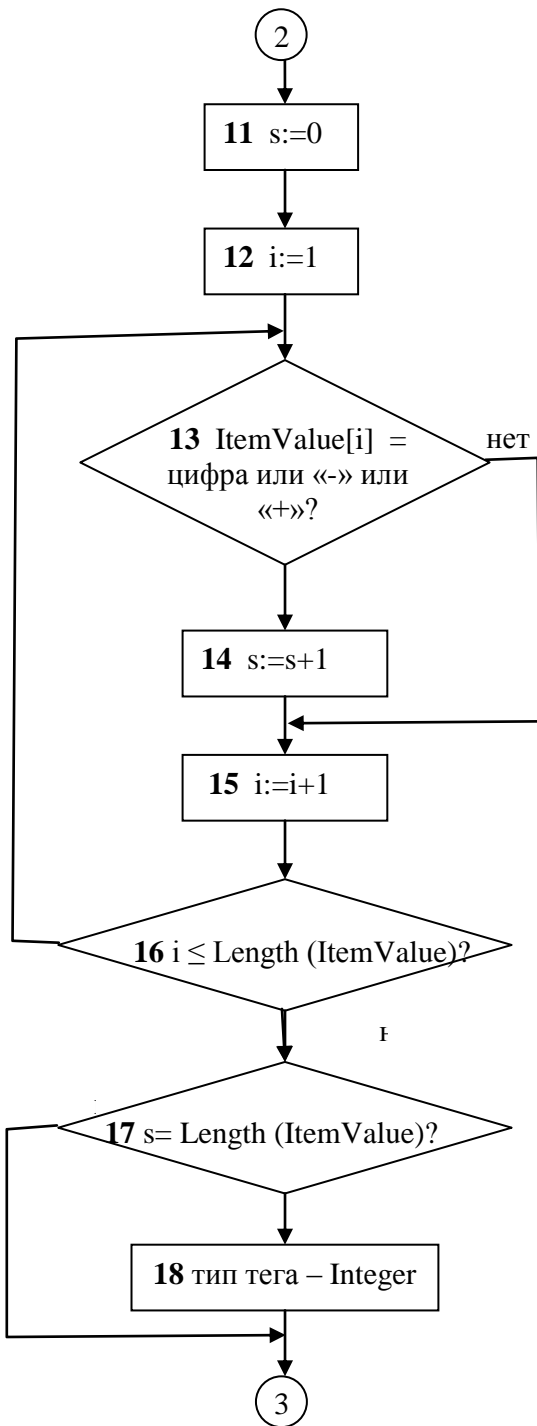


Рис. 7. (Окончание) Алгоритм функции GetItemType

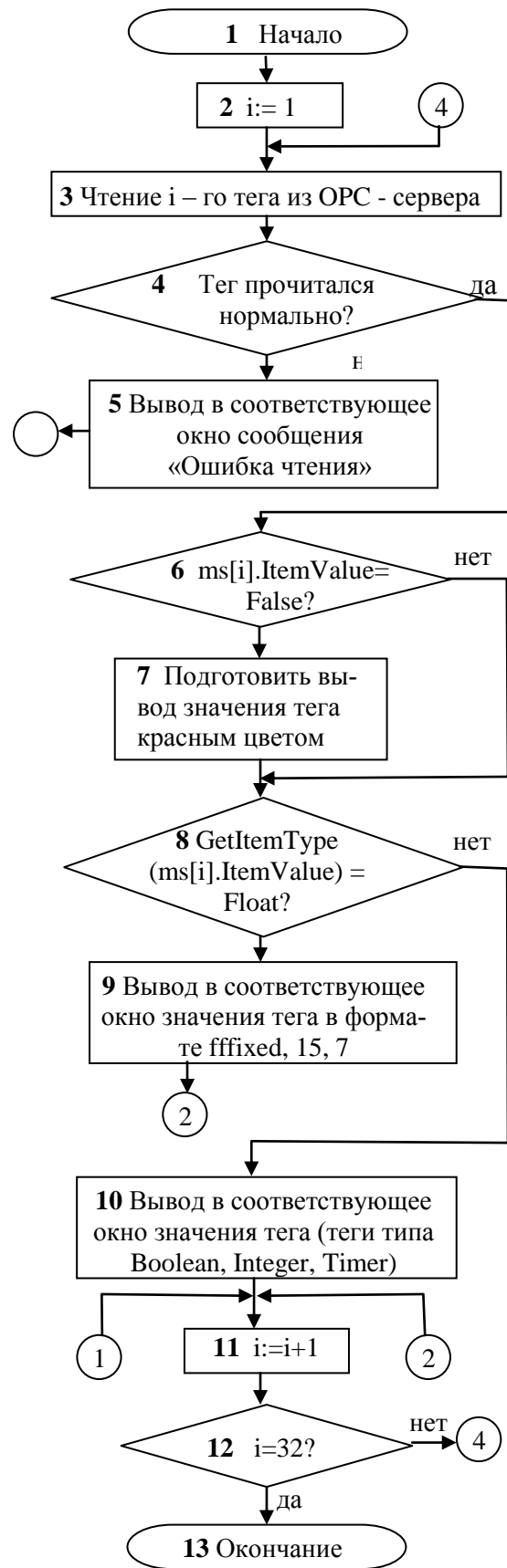


Рис. 8. Алгоритм процедуры TMainForm.Timer1Timer

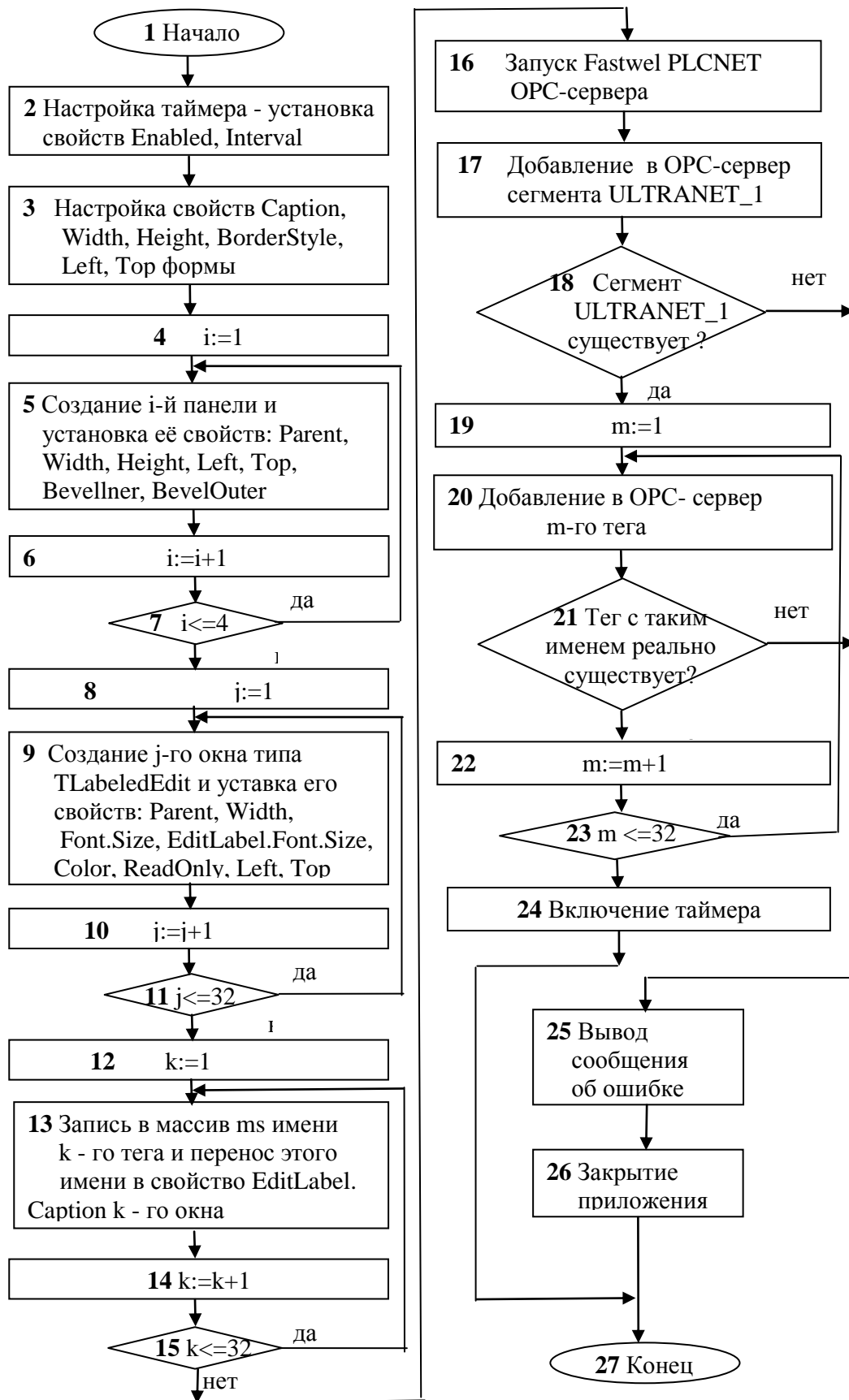


Рис. 9. Алгоритм процедуры TMainForm.FormCreate

Если точка или запятая в значении *ItemValue* отсутствуют, то начинается его проверка на тип *Integer* – целое число (блоки 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17). Признаком целого числа является наличие в нем лишь цифр от 0 до 9 и знаков «+» или «-». Естественно, что все эти знаки представлены символами в строковом выражении.

В данном фрагменте алгоритма: *i* – номер символа в строке, *s* – число искоемых символов в строке. Если в результате поиска оказалось, что все символы в строке относятся к цифрам или к знакам «+» или «-», то делается вывод, что тег имеет тип *Integer* (блок 18).

Процедура *TMainForm.Timer1Timer* является основной в приложении-просмотрщике тегов. Алгоритм процедуры приведен на рис. 8. Чтение тегов здесь выполняется циклически. После чтения *i*-го тега из OPC-сервера сразу выполняется проверка на правильность его чтения, что выполняется с помощью функции *Succeeded* (HR) (блок 4). Если тег прочитался неправильно, то в соответствующее окно формы выводится сообщение «Ошибка чтения» (блок 5). Далее проверяется (блок 6), равен ли тег значению *False* (тип *Boolean*). Если он имеет значение *False*, то подготавливается вывод его значения красным цветом (блок 7). Затем (блок 8) тип тега проверяется на *Float* – действительное число. Для проверки используется функция *GetItemType*. Если тег имеет тип *Float*, то его значение выводится (блок 9) в соответствующее окно в формате *ffixed*, 15, 7. Если тег не относится к типу *Float*, то его значение выводится в соответствующее окно (блок 10). Блоки 1, 11 и 13 предназначены для организации циклического вывода значений тегов в соответствующие окна формы просмотрщика тегов. Здесь параметр *i = 1..32* – номер тега. Процедура *TMainForm.FormClose* содержит всего один оператор *Server:=nil*, что приводит к выключению OPC-сервера.

Алгоритм процедуры *TMainForm.FormCreate* приведен на рис. 9. Настраиваются свойства таймера и формы (блоки 2 и 3). Затем (блоки 4, 5, 6, 7) выполняются создание четырех панелей и установка их свойств. Далее (блоки 8, 9, 10, 11) выполняется создание 32 окон типа *TLabelEdit*, размещение их по 8 в каждой из четырех панелей, установка их свойств.

Затем (блоки 12, 13, 14, 15) в массив *ms* заносятся имена всех тегов. Эти же имена выводятся над соответствующими окнами типа *TLabelEdit*.

В блоке 16 осуществляется запуск OPC-сервера *Fastwel PLCNet OPC Server*. В блоке 17 выполняется добавление в OPC-сервер сегмента *ULTRANET_1*. Если такой сегмент реально существует (блок 18), то OPC-сервер имеет об этом информацию и готов с ним работать. В противном случае осуществляется вывод соответствующего сообщения об ошибке (блок 25) и закрытие приложения (блок 26).

Если сегмент *ULTRANET_1* реально существует, то выполняется переход к блоку 19. В блоках 19, 20, 21, 22, 23 осуществляется добавление в OPC-сервер 32 тегов из массива *ms*. Имя каждого тега уникально и должно совпадать с именем реально существующего тега, циркулирующего по сети *PLCNET*. Если хотя бы в одном из имен имеется несоответствие, выполняется вывод соответствующего сообщения об ошибке (блок 25) и закрытие приложения (блок 26).

Если все 32 тега реально существуют, то процедура заканчивает свою работу включением таймера (блок 24).

Выводы

1. Показано, что одной из центральных проблем, решаемых при проектировании SCADA-систем, является проблема передачи информации между уровнями PCY.
2. Определено, что проблема передачи информации из промышленной сети *PlcNet* на диспетчерский уровень PCY может быть решена путем использования клиент-серверной архитектуры. В качестве OPC-клиента выступает SCADA-система, а в качестве OPC-сервера может быть использован *Fastwel PLCNet OPC Server*.
3. С использованием среды визуального программирования *Delphi* разработана SCADA-система, реализованная в виде просмотрщика тегов типов *Boolean*, *Float*, *Integer*, *Timer*.

4. Рассмотрены механизмы взаимодействия SCADA-системы и OPC-сервера: запуск OPC-сервера, добавление в него имени сегмента и имен тегов, определение типа тегов и вывода значения тегов в окна на форме просмотрщика тегов. Приведены алгоритмы соответствующих процедур и функций.

Библиографический список

1. **Анашкин, А.С.** Техническое и программное обеспечение распределенных систем управления / А.С. Анашкин, Э.Д. Кадыров, В.Г. Харазов. – СПб.: «П-2», 2004. – 368 с.
2. **Кангин, В.В.** Программные аспекты проектирования SCADA-систем / В.В. Кангин, М.В. Кангин, Д.Н. Ямолдинов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород 2007. – 259 с.
3. **Кангин, В.В.** Проектирование SCADA-систем / В.В. Кангин, М.В. Кангин, Д.Н. Ямолдинов; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород:, 2010. – 568 с.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

V.V Kangin, D.N. Yamoldinov

SCADA FOR DISTRIBUTED CONTROL SYSTEM ON BASE OF THE INDUSTRIAL NETWORK PLCNET

The Article is dedicated to questions of the designing SCADA - a systems for distributed control system (DCS), built on base of the industrial network PlcNet. It Is Shown that when designing SCADA - a systems problem exchange by information between controller level and traffic manager level DCS is central. The Decision of this problem lies in planes of the organizations client - a server relations between SCADA - a system and OPC - a server, delivered by developer of the network equipment. In this case problems of the exchange are reduced to information exchange between SCADA - a system, playing role OPC - a client, and OPC - a server. The Designed algorithms observer tags allowing observe importances 32 tags, taken on network from controller lower level, as well as procedures and function, providing following possibilities observer tags: start OPC - a server, accompaniment in it name of the segment and names tags, determination of the type tags and conclusion of importances tags in window on the form observer tags, stop OPC- server.

Key words: distributed control system, industrial network, SCADA - a system, client - a server relations, OPC - a client, OPC - a server.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 519.7 530.1

В.И. Дементьев, Ю.Г. Кабалдин

ЭРГОНОМИКА И ИНФОРМАЦИЯ. КВАНТОВЫЙ ПОДХОД

Нижегородский государственный технический университет им. Р.А. Алексеева

Изложена проблема взаимоотношения речи и мышления. Показаны квантовые истоки этих процессов. Рассмотрена роль квантовых суперпозиций на управление синаптическими связями нейронов как на их активность, так и на мозговые расстройства. Предложена модель реализации квантовой когерентности в нейронах мозга на основе ЭПР эффекта, обеспечивающая участие в обработке информации в различных участках мозга и повышение его пластичности. Дано квантовое определение речи и сознанию.

Ключевые слова: мышление, речь, мозг, квантовые суперпозиции, нейронная активность.

Одной из важных проблем в когнитивной психологии является взаимосвязь речи (слова) с процессом мышления. Среди психологов нет единого мнения. Ряд исследователей считает, что речь формирует мышление [1]. В связи с этим, популярной оказывается идея, что психическая деятельность человека является частью эволюции, важным этапом его адаптации к внешним условиям. Действительно, история возникновения человека как биологического вида ещё малоизученна. Важным вопросом здесь является, что обусловило развитие мозговой активности человека и появление у него сознания. *Поэтому теорию вербальности мышления мы связываем с отсутствием учёта понятия сознания человека при решении этой проблемы.*

В одной из английских энциклопедий отмечено сознание – вещь наиболее очевидная и наименее понятная в деятельности человеческого мозга. Мы это признаём, но всё-таки не пытаемся дать ему определение.

Следует отметить, что в настоящее время отсутствуют научные исследования, которые бы объяснили природу возникновения сознания у человека и выявили механизм его проявления в различных аспектах. Считается, что мышление, различные виды творчества – это осознанная мозговая деятельность человека [2]. То же самое можно отметить относительно происхождения речи и языка [3], их физической сущности. Сознание и язык – это то, что отличает нас от обезьян, наших ближайших биологических родственников.

У человека имеется желание слышать речь, которую можно понять, и оно столь велико, что подчас заставляет обнаруживать слова в явлениях. С тех пор, как человек научился оперировать символами, «мы не можем видеть мир иначе, чем в четких терминах символов». Нам нравится манипулировать миром, укладывая его в пространстве и времени. *Люди в гораздо большей степени, чем обезьяны, склонны к кооперации, они могут иметь совместные цели и совместные намерения. Обращаясь к другому человеку, человек молчаливо предполагает, что собеседник поведет себя кооперативно: поможет, если его попросить, примет информацию, если ему ее предложат.*

Кроме того, у человека отчетливо выражено представление о том, что все предметы имеют названия, а также желание (которое проявляется, начиная с очень раннего возраста,

нередко до овладения речью) эти названия узнавать, чтобы впоследствии использовать вместо предметов при мышлении. Передать смысл слов от человека к человеку возможно лишь благодаря тому, что собеседник уже, как правило, имеет в сознании некий общий образ возможного смысла этих слов (т.е. осознает их), так что даже очень неадекватных объяснений обычно бывает вполне достаточно для того, чтобы человек смог уловить верный смысл речи. Именно наличие такого общего осознания делает возможным общение между людьми.

Если на заре своей эволюции проточеловек, спустившийся с дерева, питался животными, убитыми хищниками, то затем он стал изобретать оружие для охоты на животных, разрабатывать план охоты, в результате возникала необходимость распределения роли каждого охотника, т.е. он стал мыслить. В процессе дальнейшей эволюции человека, связанной с земледелием, роль процесса мышления возрастала. Процесс мышления обусловил необходимость появления речи, что стимулировало трудовую деятельность за счёт передачи и обмена информацией уже в словесном виде. *Мышление явилось стимулом выживания человека как биологического вида, его основным преимуществом в процессе естественного отбора.*

Когда вы хотите подумать о чём-то конкретном, вы вызываете в памяти некие образы нужного предмета. Вы, по сути дела, начинаете оперировать некими воспоминаниями об этом предмете. Далее вы начинаете оперировать и другими данными, которые нужны для решения проблемы. И чем больше в вашей голове связей между различными областями мозга, тем больше у вас возможностей для решения вашей задачи. Человек долго думает на определенную тему, упорно, методично: чем более разнообразно он привлекает внешние сигналы к решению этой проблемы, тем лучше. Известно, что разные люди мыслят по-разному. Также приходится признать, что вряд ли возникновение мысли происходит случайным образом. По-видимому, должен существовать механизм отбора идей, который вызвали бы активность сознания в процессе мышления. Способность человека к мышлению возникла не в результате биологической эволюции, а в результате трудовых отношений. Необходимость обсуждения мыслей является критерием сознательного мышления, даже при внезапной «вспышке» мысли. Сознание выступает арбитром, и мысль (идея) может быть быстро забыта, если она, по «мнению» сознания не реальна [2].

Изложенное остро ставит вопрос о природе возникновения сознания у человека. Это, в свою очередь, приводит к другой проблеме: что лежит в основе мозговой деятельности человека? Как нейроны формируют память, речь и сознание в мозге?

Согласно общепринятой точке зрения, работу мозга следует рассматривать лишь в рамках классической физики. Считается, что передаваемые по нервам сигналы – суть феномены типа «есть или нет», точно так же, как токи в телефонных проводах: они *либо* есть, *либо* их нет, здесь не бывает тех таинственных *суперпозиций*, что характерно для квантовой физики [2]. Хотя на фундаментальном уровне квантовые эффекты играют определенную роль, биологи в большинстве своем придерживаются мнения, что при рассмотрении макроскопических следствий квантовых закономерностей необходимости выходить за классические рамки нет.

Однако ещё Э. Шрёдингер в своей знаменитой книге «Что такое жизнь? С точки зрения физика» указал, что химические силы, управляющие межатомными и межмолекулярными взаимодействиями, имеют квантово-механическое происхождение. В связи с этим, следует отметить, что существующая теория старения – теория свободных радикалов – в сущности, это квантовая теория. Поэтому именно химические взаимодействия определяют по большей части поведение – квантовое высвобождение *нейромедиаторов*, передающих сигналы от одного нейрона к другому через узкие промежутки между ними, называемые *синаптическими щелями*.

Аналогичным образом, потенциалы действия, физически контролирующие передачу нервных импульсов и сами импульсы, имеют предположительно квантово-механическую природу. Нервный импульс – это область с обратным распределением заряда, перемещающаяся вдоль нервного волокна. При её приближении открываются натриевые каналы, пропус-

кающие поток ионов натрия внутрь; сразу после их прохождения открываются калиевые каналы, обеспечивающие отток ионов калия наружу. Работа ионных насосов восстанавливает исходное состояние. Нейрон возбуждается только в том случае, если результирующая разность потенциалов (потенциал действия – ПД) на мембране в начале его аксона достигает критической величины, при которой ионы калия не успевают выходить наружу достаточно быстро, чтобы восстановить равновесие. Квантово-механическое происхождение этих явлений очевидно.

Отсюда непосредственно следует, что с точки зрения наблюдателя любой существенный процесс в мозге либо «происходит», либо «не происходит». Как указывалось ранее, суперпозиции квантовой теории тоже допускают ситуации, когда процесс одновременно «происходит» и «не происходит». На субмикроскопическом уровне подобные квантовые суперпозиции действительно имеют место, однако на уровне макроскопическом, по нашему глубокому убеждению, характерные для таких квантовых феноменов, как эффекты, интерференции сколько-нибудь существенной роли играть просто не могут.

Следовательно, такие суперпозиции следует рассматривать как статистические (вероятностные) эффекты. Поскольку квантовые эффекты действительно могут инициировать в мозге процессы гораздо более крупного, нежели сами (по масштабу), отдельные исследователи выразили надежду, что способность *разума* воздействовать на мозг может быть обусловлена *квантовой неопределенностью*, требующей невычислительных действий, т.е. объективной редукции (ОР) [2].

В частности, ряд известных нейробиологов [2] указывают на важную роль квантовых эффектов в синаптической передаче, где квантовая активность сосредоточена в так называемой пресинаптической везикулярной сетке – паракристаллической гексагональной структуре в пирамидальных клетках мозга. Другие ученые, экстраполируя тот факт, что светочувствительные клетки сетчатки способны реагировать на чрезвычайно слабый свет (буквально несколько фотонов), при определенных обстоятельствах такая клетка может регистрировать даже *один - единственный* фотон, предположили, что и в самом мозге могут содержаться нейроны, также являющиеся, по сути своей, квантовыми «детекторами», в частности, палочки и колбочки клеток сетчатки.

Согласно квантовой теории, квантовые состояния частиц обладают суперпозицией. Однако квантовые суперпозиции требуют и квантовых вычислений. Согласно Р. Пенроузу [2], обработка сигналов в нейронах осуществляется с использованием объективной редукции (ОР), имеющей невычислительное действие, которую можно рассматривать как нервный код.

Дело в том, что «стандартное» квантовое вычисление использует обычные правила квантовой теории, согласно которым в течение практически всей операции система эволюционирует под действием U (волновая функция), а R – редукция квантового состояния вводится в процесс на строго определенных этапах. В такой процедуре нет ничего «невычислимого» в смысле обычной «вычислимости», так как U – вычисляемая операция, а R – чисто вероятностная процедура. Все это может происходить и в нейронах, поэтому Р. Пенроуз [2] считает, что стандартные квантовые вычисления ускоряют этот процесс, не более.

Эта идея основывалась на предположении, что хотя в мозге возможны достаточно длительные вычисления суперпозиции, прерываемые время от времени неким невычислимым действием, которые можно объяснить лишь в терминах нового физического процесса (ОР), тем не менее, нелокальность (сцепленность) частиц сохраняется. Однако, когда квантовые суперпозиции квантовых вычислений могут отсутствовать по причине слишком сильного возмущения окружения (декогеренции) проходящими по нейрону импульсами, становится непонятно, каким образом можно воспользоваться самой идеей стандартного квантового вычисления, не говоря уже о какой-либо модификации этой процедуры посредством замены R на некий гипотетический невычислительный процесс, кроме как объективной редукции (ОР). Реализация ОР обеспечивает генерацию информации (т.е. это, по сути, нервный код), в результате которой нервные сигналы преобразуются в информацию по правилам

двоичного кода. Хотя ОР – процедура, в рамках которой квантовая суперпозиция одновременного возбуждения и торможения ансамблей нейронов является действительно необходимой, однако, по мнению Пенроуза, есть ещё одна многообещающая возможность, которая заключается в установлении квантовой когерентности в микротрубочках цитоскелета нейронов, в результате чего активизируются нейроны в различных отделах мозга. Он считает, что большая совокупность табулинов в нейронах может некоторое время развиваться в полном соответствии с законами квантовой теории, а затем претерпевать объективную редукцию и квантовую когерентность в микротрубочках нейронов по типу высокотемпературной сверхпроводимости.

Согласно критерию ОР [2], следует ожидать, что, с большой вероятностью, при возбуждении нейрона объективная редукция состояния происходит очень быстро – не потому, что имеет место значительное перемещение масс (его там даже по минимально требуемым стандартам недостаточно), а потому что распространяющееся вдоль нерва электрическое поле (порождаемое нервным сигналом), скорее всего, не остается «незамеченным» окружающими нервными тканями мозга вследствие декогеренции, несмотря на то, что аксон окружен миелином. Это поле возмущает случайным образом весьма значительный объем вещества окружения вполне достаточным, как представляется авторам, для того чтобы удовлетворить критерию срабатывания процедуры ОР почти сразу же после возникновения сигнала. Поэтому сохранение в течение длительного времени квантовых суперпозиций возбуждения и торможения нейрона вряд ли возможно. ОР вносит определенность в их состояния, т.е. генерирует информацию.

Среди явлений, характерных для квантовой теории и определяющих суперпозицию на макроскопическом уровне, следует указать следующие.

Мозг человека ассиметричен по своим функциональным возможностям. Однако при этом оба полушария мозга взаимосвязаны между собой и, взаимодействуя, возбуждают либо тормозят активность друг друга.

Существует суперпозиция питания мозга. Раньше считалось, что его питание осуществляется только за счёт глюкозы. Однако учёные из Германии и Нидерландов установили, что мозг получает из крови не только глюкозу, но и лактат – продукт мышечной деятельности человека. Это наблюдается и при недостатке кислорода.

Наряду с нервными клетками, существуют глиальные клетки (до 90% клеток мозга). Несмотря на то, что глии не имеют ПД при прохождении сигнала, они участвуют в образовании миелина, обеспечивают питание нейронов, осуществляют захват части медиаторов, а следовательно, участвуют в управлении синапсами, взаимодействуя с нейронами, участвуя в такой суперпозиции как возбуждение и торможение нейронов.

Как уже отмечалось, возникновение нервного сигнала связана с работой ионных (калиевых и натриевых) насосов. Такая суперпозиция обеспечивает формирование ПД.

Ганглионарные клетки в сетчатке глаза не только обеспечивают передачу сигналов при поглощении квантов света, но и часть из них способна воспринимать свет, т.е. они являются светочувствительными детекторами, вызывая циркадные биоритмы в результате запуска сложных реакций, синтезирующих белок меланопсин, т.е. клетки сетчатки имеют квантовую суперпозицию.

Существует также суперпозиция синапсов: различают электрические и химические. Они также ассиметричны функционально, но их активность дополняет друг друга, хотя существует вероятность (случайность) включения того или иного вида нейронной активности, как результат ОР их квантовых состояний.

Электрические синапсы обладают большей надежностью, чем химические: они не подвержены синаптической депрессии и не блокируются нейротоксинами. Второе преимущество – в большей скорости электрической передачи. Электрические сигналы способны также передаваться с одного нейрона на другой в местах тесного контакта между ними, называемых щелевыми контактами. Ток в таких соединениях протекает по особым каналам, коннексонам. Скорость является существенным фактором в быстрых рефлексивных избеганиях, в

которых экономия миллисекунды может стать принципиальной для выживания при сложных ситуациях. Другими функциями электрических синапсов являются синхронизация электрической активности в группах нейронов и межклеточная передача таких молекул, как АТФ, цАМФ и ионов кальция. Дофамин может модулировать активность щелевых контактов между клетками в сетчатке.

Таким образом, щелевые контакты являются не просто пассивными контактами, но могут также быть динамическим компонентом нейрональных сетей. Согласно квантовой теории, коллапс волновой функции электронов, которые являются носителями информации, благодаря принципу Паули, не приводит к прерыванию (потере) информации, напротив, вследствие нелокальной связи между электронами, она суммируется при синхронизации с различными отделами мозга.

В связи с этим, нами предложена модель реализации квантовой когерентности, основанная на ЭПР-эффекте, в основе которого лежит нелокальная связь между частицами (электронами, фотонами), что активизирует нейроны и устанавливает новые синаптические связи (дальнедействующие корреляции) с различными участками мозга, координируя и синхронизируя их, в результате пластичность мозга, а также способность к мышлению возрастают.

Указывая на наличие квантовых суперпозиций в «материальных» структурах мозга, необходимо задать вопрос, как влияют они на нейронную активность и пластичность мозга? Анализ показывает, что, согласно квантовой теории, квантовые суперпозиции не могут долго существовать. В результате ОР существует вероятность включиться каждому квантовому состоянию в суперпозиции, вызывая разбалансировку энергетических процессов в мозге. Поэтому управляя синаптическими связями, квантовые суперпозиции могут вызывать мозговые расстройства, в частности, такие тяжёлые заболевания, как шизофрения, бессонница, обуславливая торможение (долговременную депрессию) либо длительное возбуждение (долговременную потенцию) синапсов соответственно.

В частности, суперпозиция медиаторов глутамата и глицина в синапсах ответственна за такие заболевания, как мигрень и шизофрения. Причиной этих болезней является увеличение в синапсах, а также во внеклеточной жидкости, количества глутамата, вследствие нарушения работы суперпозиции нейромедиаторов: глутамат-глицин. Высказана квантовая гипотеза, что болезнь Альцгеймера связана с потерей белками информации по механизму свободных радикалов, т.е. за счёт отбора у них электронов. В результате белки становятся неструктурированными, теряют свою форму и информацию, слипаются, образуя бляшки. Подобно тому, как кровь, перемещаясь по сосудам вследствие турбулентностей и фермионных квантовых вихрей, обеспечивающих ей сверхтекучесть, при повреждении сосудов кожи, кровяные клетки (тромбоциты) прикрепляются к месту повреждения и начинают сцепляться друг с другом, образуя комок, который затем твердеет.

Скелет здоровых нервных клеток состоит из микротрубочек. При болезни Альцгеймера цитоскелет нервной клетки разрушается. Это связано как с образованием бляшек, так и разбалансировкой суперпозиции ионных каналов, в результате растёт количество кальция, что усиливает разрушение нервной клетки.

Известно, что в живых организмах уже несколько миллиардов лет синтезируются левозакрученные белки и правозакрученные РНК и ДНК. Подобная асимметрия, согласно Пастеру, есть фундаментальное свойство живой материи. Но это и есть информация, т.е. память о прошлом и имеет квантовое происхождение. Если рассмотреть начало жизни с возможности существования малых молекул (рибопереключателей) типа РНК, то предполагается, что в мире РНК она обладала двумя функциями, чтобы самовоспроизводиться, т.е. информационными и ферментативными. Однако такая квантовая суперпозиция, в соответствии принципами квантовой теории, не могла существовать долго, и они были усилены и переданы ДНК и белкам соответственно в процессе эволюции. Следует заметить, что информационно насыщенные молекулы (ДНК и РНК, белки) скручены. Скручен и мозг.

Таким образом, мы считаем, что нейронную активность, пластичность мозга опреде-

ляют квантовые суперпозиции как на микро-, так и на макроуровне. Разбалансировка квантовых суперпозиций обуславливает снижение нейронной активности в различных участках мозга, а следовательно, уровня сознания и способности к мышлению.

Рассмотрим механизм формирования сознания в мозге человека и дадим определение понятию «сознание». По утверждению Пенроуза, способность к мышлению, а следовательно, к творчеству мы реализуем только благодаря сознанию. Им предложен квантовый механизм формирования сознания в мозге человека. Он опирается на тот факт, что за различные аспекты восприятия (например, визуального восприятия движения, цвета или формы) ответственны совершенно различные участки мозга, тогда как при участии сознания все эти аспекты собираются вместе, формируя единый образ. Это иногда называется проблемой связи.

На основании изложенного, сознание – это совокупность квантовых процессов в синапсах и нейронах (суперпозиции квантовых состояний, ЭПР эффекты и т.д.), обеспечивающих в результате последовательных ОР обработку, синтез и передачу информации в различные участки мозга, которая преобразуется в образы, речь, движение и т.д., усиленная и скоординированная в нём как в классической системе в единое целое.

Дело в том, что, согласно квантовой теории, переход от квантового уровня системы к классической вызывает усиление и неопределенность, т.е. необходим R -процесс, который вносит определенность. ОР процесс генерирует информацию в различной форме (мыслей, идей, речи и т.д.). Указанные виды информации определяются свойствами прежде всего классической системы, поскольку она будет зависеть от уровня сознания конкретного человека, в частности, условиями функционирования его мозга.

На наш взгляд, речь отражает пластичность мозга, т.е. проявление возможности передачи информации в словесном виде, которая реализуется как ответная реакция на внешний стимул, вызывающий нейронную активность в мозге (сознании) в виде образов, ассоциированных с их содержанием под тем или иным фонетическим обликом - словами, нелокально активизирующих здесь одновременно (синхронно) друг друга, периодически испытывающих ОР, т.е. невычислительные действия. Квантовые истоки речи очевидны.

Чтобы речь была логичной и грамматически связанной (иметь синтаксическую конструкцию), слова должны произноситься с заранее заданным планом (в соответствие с мыслями), иначе речь будет путанной и трудно воспринимаемой для окружающих. Только в результате отбора отдельных слов, речь становится содержательной и понятной.

Таким образом, необходимо, чтобы слова были связаны между собой и активировали бы друг друга в результате нелокального информационного взаимодействия (обмена информацией), подобно электронам атомов металла, занимающих своё место в узлах кристаллической решетки при охлаждении металла из жидкой фазы, где электроны находились в хаотическом состоянии (электронный газ). Предметы, ассоциированные в сознании в виде образов, слов также находятся в нём в хаотическом состоянии, но в процессе мышления, следовательно, в результате информационного обмена между ними из-за нелокальной связи, выстраиваются в виде речи (связанных слов), в соответствие с мыслью.

В связи с этим, приведём слова из письма гениального композитора Вольфганга Адамея Моцарта [2] другу: «...ночью во время бессонницы – мне в голову приходит сколько угодно самых разных идей. Откуда и как они приходят? Я не знаю и ничего не могу с этим поделать. Те, которые мне приятны, я удерживаю в голове и часто напеваю без слов; так, по крайней мере, мне говорили. Когда у меня возникает тема, сразу же приходит следующая мелодия, соединяясь с первой, согласно требованиям композиции в целом: контрапункт, партия каждого инструмента – и, наконец, все музыкальные фрагменты складываются в завершённое произведение. Тогда моя душа горит вдохновением».

Поскольку в основе сознания лежат квантовые эффекты, то человеческое сознание зависит от его квантовых состояний. Квантовая теория запрещает изготовление его копии без разрушения оригинала. В связи с этим, уровень сознания не может передаваться по наследству.

Таким образом, сознание – это классическая система. В результате мы имеем следу-

ющую последовательность связей: восприятие → квантовый механизм обработки информации → передача информации в различные участки мозга → сознание → распознавание образов → мышление.

Поскольку нейроны собираются, разъединяются и вновь соединяются в ансамбли в различных участках мозга, то уровень сознания постоянно меняется, и количество активных нейронов коррелирует с уровнем сознания в каждый момент времени. Такая нейронная сеть сознания – это кратковременный ансамбль, который удовлетворяет всему перечню перечисленных выше явлений, т.е. обеспечивает наибольшую пластичность мозгу. Так, мы мгновенно принимаем решение, меняя свой прежний план, если внезапно произошло более важное событие. У нас быстро меняется настроение, если меняется погода и т.д.

Как соотносятся мозговые явления и восприятия? Здесь необходимо выяснить, как одно влияет на другое. Нервные ансамбли не «создают» сознание, они служат указателями его уровня. Поскольку размер ансамбля и соответствующий ему уровень сознания зависит от большого количества факторов (количество связей, силы внешних стимулов и т.д.), то каждым из них можно управлять. Способность мозга генерировать различные модели и объяснять явления, связанные с восприятием, делает мозг особенно пластичным.

Как уже было отмечено, мозг работает исключительно на глюкозе. Но установлено, что мозг получает из крови не только глюкозу, но и лактат – т.е. продукт мышечной деятельности. Эти «отходы» деятельности мышц используются мозгом как дополнительная подпитка.

Таким образом, при критических условиях мозг переходит на альтернативный механизм обеспечения жизнедеятельности, поэтому повышение мозговой активности связано и с трудовой деятельностью. Мало того, это открытие позволяет по-новому подойти к словам классика, что труд создал человека. Действительно, можно полагать, такая суперпозиция обеспечивала улучшение питания кровеносных сосудов, вызывая мутации и увеличение количества нейронов. В результате мозг человека как в объёме, так и по весу увеличился. Именно это обстоятельство является отличительным признаком человека как разумного существа в природе.

Как показали последние исследования [6], мозговая деятельность приводит к образованию новых нервных клеток в гиппокампе, отделом мозга, ответственным за память и обучение. Новые клетки мозга более быстро устанавливают коммуникативные связи с другими клетками, что обеспечивает долговременную память. В результате процесс мышления активизируется.

Когда мы начинаем думать, кровь приходит в различные области мозга, мозг возбуждается: больше крови, больше питания. Нейрон начинает образовывать больше отростков в этом месте, возникают новые синаптические связи с другими нейронами. И если это происходит достаточно долго, возникает новая система связей, которая соединяет уже имевшиеся информационные связи, лежащие в разных областях мозга и разные аспекты информации, в единое целое [6].

Кровоснабжение мозга меняется в зависимости от того, чем мы занимаемся. Если человек, например, работает со зрительной системой, например фотограф, то у него интенсифицируется метаболизм в затылочной части. Сюда приливает огромное количество крови, соответственно развивается именно эта часть мозга. Поэтому такой человек до глубокой старости сохранит зрительные интересы. Но он при этом абсолютно не интересуется, например, слуховыми делами, то в результате будет меньше кровоснабжение слухового поля. Если человек занимается творческой деятельностью, то первой будет секвестрироваться лобная область и т.д.

Таким образом, возникает дифференциация в развитии отделов мозга и развития наших способностей. Следовательно, мышление, т.е. нейронная активность различных отделов мозга и способность к творчеству взаимосвязаны и взаимообусловлены посредством физиологических процессов.

Далее рассмотрим связь мышления и речи (слова), основываясь на высказываниях

выдающихся ученых, у которых способность к творчеству (математике, физике, музыке), проявилось особенно ярко.

Приведём один из примеров о творческом мышлении, убедительно опровергающий популярный ныне тезис, который гласит, что вербализация необходима для формирования мысли. Трудно привести подтверждение более убедительное, чем то, которое содержится в письме А.Эйнштейна к Ж.Адамару [2]: «... слова или язык, как в устной, так и в письменной форме, по-видимому, не играют никакой роли в механизме моего мышления. Психические сущности, которые, по-видимому, и являются составляющими элементами мысли – это определенные знаки и более или менее отчетливые образы, которые могут «произвольно» воспроизводиться и комбинироваться по собственному желанию... В моем случае, упомянутые элементы носят визуальный и моторный характер. Общепринятые слова или другие знаки мне приходится подбирать только на второй стадии, когда упомянутые ассоциативные связи приобретают отчетливые очертания и могут быть воспроизведены по моей воле». Нечто сходное пишет и сам Ж. Адамар: «Я утверждаю, что слова полностью отсутствуют в моей голове, когда я действительно предаюсь раздумьям, и я нахожу случай Гальтона полностью идентичными моему личному опыту, поскольку и у меня самого даже после прочтения или выслушивания вопроса все слова исчезают в тот самый момент, когда я начинаю их обдумывать; и я полностью согласен с Шопенгауэром, когда он пишет: “Мысли умирают в момент, когда воплощаются в слова”».

В работе [1] утверждается, что язык, речь влияют на мышление. Однако, основываясь на изложенном, следует согласиться, что трудности, возникающие с языком при обучении, связаны с отсутствием общепринятых терминов, а следовательно и образов, ассоциирующих те или иные события, предметы и т.д. Поэтому люди, разговаривающие на различных языках, имеют и различные уровни сознания и, следовательно, способности к обучению.

Таким образом, исследование проведено некорректно. В работе [1] также отмечается, что язык влияет не только на запоминание, но и на научение. Однако это требует отдельного рассмотрения. Дело в том, что во многих языках структура имён числительных более явно соответствует десятичной системе, чем в английском (в китайском, например, нет таких исключений, как *eleven* для одиннадцати и *twelve* для двенадцати, где нарушено общее правило прибавления к цифре, обозначающей единицы, основы – *teen*, аналогичной русскому - дцать), и их носители быстрее овладевают счетом. Число слогов в числительных влияет на запоминание телефонного номера или счет в уме. Так, одно недавнее исследование показало, что, если в языке нет слов для обозначения чисел, люди сравнивают количества логарифмически, по их примерному соотношению, а не линейно.

В настоящее время доказано, что существуют участки, отличающие геном человека от генома шимпанзе по самым высоким темпам эволюции. И самым быстрым в эволюционирующих структурах оказался участок, который связан с работой гена в коре головного мозга (а не просто в мозге), и с развитием этого мозга и тех участков, которые могут отличать действительно поздние стадии эволюции, разные у человека и шимпанзе. Функции данного гена возникли очень давно.

Возвращаясь к вопросу о человеческой уникальности, мы прежде всего должны ответить на вопрос: есть ли этот «провал» между нами и нашими биологическими родственниками, или его нет? Провал, который дает основание говорить, что произошла некая мутация, изменившая мозг настолько, что он стал способен к языку, другим сложным действиям, а на самом деле приведшая к гораздо более сложной организации и функционированию мозга.

Итак, мы должны рассмотреть сценарий того, каким образом мог возникнуть мозг, давший человеку тот разум, которым мы обладаем. И здесь существует два подхода. Первый – это произошло в результате серии генетических изменений, приведших к новым модификациям, которые могли оказаться «взрывными». Это серия мутаций - процесс. Мы все говорим о некоем толчке, когда могло произойти что-то одно, изменившее свойство мозга, нервной системы и оказавшееся эволюционно адаптивным. Однако впоследствии на эту «взрыв-

ную мутацию» могли наслаиваться многие изменения, и то, что мы видим сегодня, уже не та одна мутация, которую мы, может быть, могли бы найти, а тысячи, которые выстроились вдоль нее.

Это сценарий номер один, и он рассматривается весьма серьезно.

Но есть и другой, согласно которому всё началось с неких модификаций адаптивности, пластичности мозга, который, попадая в несколько иную эволюционную нишу, начинал реализовывать новые возможности. Если это происходило в изменённых условиях в ряду поколений, то могли начать накапливаться генетические вариации, делающие развитие в данном направлении все более и более значимым. Накапливаясь, подобные вариации и привели к формированию человеческого мозга в его нынешнем виде. Такой сценарий исключает наличие начального «ключевого гена», вызвавшего толчок.

Если первый сценарий мы можем назвать генетическим, поскольку в начале процесса лежат генетические изменения, то второй – эпигенетический. Кстати, именно его многие генетики и эволюционисты все больше и больше начинают рассматривать в качестве сценария эволюции мозга.

Естественный отбор даёт большую нагрузку (с точки зрения адаптации) на те функции, которые связаны с поведением: там давление серьезнее, происходит более активное накопление адаптивных мутаций. Нервная система «толкает» нас в такие условия (и позволяет адаптироваться к ним), которые влекут за собой появление новых морфологических признаков. Например, если изменение поведения приводит к смене видов пищи, то постепенно меняется строение тела и т.д., то есть мозг может ускорять и морфологическую эволюцию. Проточеловек, в отличие от обезьян, наряду с растительной пищей, употреблял уже и животную пищу, богатую белками. Это не только обеспечивало ему рост нейронной активности и самого мозга, но и выживание при изменении условий жизни. При похолодании наши предки смогли принять ряд правильных решений, переместившись в другие районы земли, укрываться в пещерах от дождя и холода, проявляя смекалку и прозорливость при добычании пищи.

Таким образом, одна из структур мозга вдруг начинает усложняться в результате неких генетических изменений, которые могут накапливаться из-за того, что организм, популяция попали в другие условия, куда их пластичный мозг дальше начинает вести и эволюцию генома. Это и есть второй, эпигенетический сценарий.

Излагая роль процесса мышления на возникновение речи, необходимо рассмотреть и их генетические регуляторы. В связи с этим, следует отметить, что недавно открыт ген FOXP2. Но он не является геном «языка». Он имеется и у других животных. Очевидно, что в процессе эволюции речь обеспечил комплекс генов. То же самое относится и к мозгу.

Мозг – это классическая система, она индивидуальна. Поэтому люди по-разному мыслят и воспринимают реальность событий [2]. Язык, речь – это словесная передача информации окружающим. Обучение следует рассматривать как способность восприятия информации, поэтому речь, язык и мышление имеют различное происхождение и назначение.

Мышление – это воспроизводство новой ценной информации. Порождая новые идеи, мышление требует введения новых слов и образов, которые ранее не использовались в обиходе, поэтому собеседники автора этих слов вначале не воспринимают и отвергают его идеи, пока не поймут их смысл.

Бытует утверждение, что как мыслю, так и говорю. Действительно, мы излагаем свою речь, чтобы она была понятной, не в виде отдельных и несвязанных слов, а в соответствии с планом, который выработал процесс мышления либо возникшая идея. Известно, что экспромт, основанный главным образом на эмоциях, как правило, не выстраивает логичную и содержательную речь. Люди, которые имеют мозговые расстройства, плохо излагают свои мысли, их речь несвязанная.

Таким образом, мышление и речь – это различные виды когнитивной способности мозга, его сознания, лишь в отдельных случаях, дополняющие друг друга. Подобным обра-

зом, различают язык и речь. Считается, что наши предки приобрели интеллектуальные способности, не свойственные обезьянам, около 1,5 млн лет назад, а язык сформировался не более 100 тысяч лет назад. Такой разрыв свидетельствует о том, что появлению языка предшествовала эволюция гортани, языка, их синхронизации и т.д. В настоящее время насчитывается несколько тысяч языков, в тоже время считается, что все мы произошли от одного предка – африканской Евы. Как известно, Маугли не мог разговаривать, так как воспитывался в стае волков, но мышлением он обладал. Язык, речь формирует социальная среда, и мы им овладеваем уже в раннем возрасте, мышление и уровень сознания формируется в течение всей жизни.

Язык един для той или иной нации, народности, племени и т.д. и всё население, как правило, общается с его помощью. Сознание индивидуально, как и способность к мышлению. Известно, что за речь отвечает определённый участок мозга (лобная доля), а процесс мышления сопровождается нейронной активизацией различных участков мозга, а сознание собирает информацию в единое целое. По-видимому, мозг людей, как и других животных, имеет ряд стандартных программ действия, выработанных в процессе длительной эволюции. Естественный отбор наибольшее давление оказывал на нервную систему, поэтому именно мозг проточеловека, способность к мышлению выделили его, как биологический вид из семейства приматов более десяти миллионов лет назад.

Библиографический список

1. **Бородицки, Л.** Как язык формирует мышление // В мире науки. 2011. № 5. С. 15–18.
2. **Пенроуз, Р.** Тени разума. В поисках науки – сознания: [пер. с англ.] / Р. Пенроуз. – Москва-Ижевск. 2005. – 688 с.
3. **Бурлен, С.** Происхождение языка. Факты, исследования, гипотезы / С. Бурлен. – М.: Астрель, СОРПУС, 2011. – 201 с.
4. **Николис, Дж.** От нейрона к мозгу: [пер. с англ.] / Дж. Николис [и др.]. – 2-е изд. – М.: Издательство ЛКИ, 2008. – 672 с.
5. **Шукина, Е.** И все-таки они восстанавливаются // Знание – сила. 2008. № 9. С. 16–19.
6. **Савельев, С.В.** Происхождение мозга / С.В. Савельев. – М.: ВЕДИ.2005.– 368 с.

*Дата поступления
в редакцию 14.10.2011*

V.I. Dementiev, J.G. Kabaldin

ERGONOMICS AND INFORMATION. QUANTUM APPROACH

The article described the problem of the relationship of speech and thought. Showing the quantum origins of these processes. Examined the role of quantum superposition to control synaptic connections of neurons as their activity and brain disorders.

Key words: thinking, speaking, quantum superposition, the neural activity.

УДК 621.7

П.Э. Букин, И.Н. Фролова

**СОЗДАНИЕ МОДИФИЦИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ КАК ШАГ
К АВТОМАТИЧЕСКОМУ ПОСТРОЕНИЮ СТАНОЧНОГО ПРИСПОСОБЛЕНИЯ**

ОАО ПКО «Теплообменник», г. Нижний Новгород

Решение проблемы ускорения выпуска новой продукции на промышленном предприятии напрямую связана с заменой ручного труда работников на автоматическую работу современных программ. Одним из наименее изученных элементов являются технологии автоматического создания элементов технологической оснастки.

Ключевые слова: поверхность, станочное приспособление, автоматизация, классификация поверхностей, анализ поверхностей.

Современные тенденции в мире все больше и больше требуют от промышленности повышения гибкости производства, снижения сроков выпуска новой продукции и улучшения эффективности планирования на всех стадиях жизненного цикла машиностроительного изделия.

На данный момент одной из главных технологий, позволяющих достичь серьезного прорыва в заданном направлении, является автоматизация. Автоматизация позволяет не только повысить эффективность труда инженерно-технического персонала предприятия, но и во многом заменить труд инженеров на автоматическую работу программного модуля. Примерами удачно внедренных технологий автоматизации могут служить программные модули САПР по автоматическому расчету зубчатых колес, прочностному анализу, анализу штампуемости и многие другие системы, заменившие кропотливый, монотонный и длительный труд инженера.

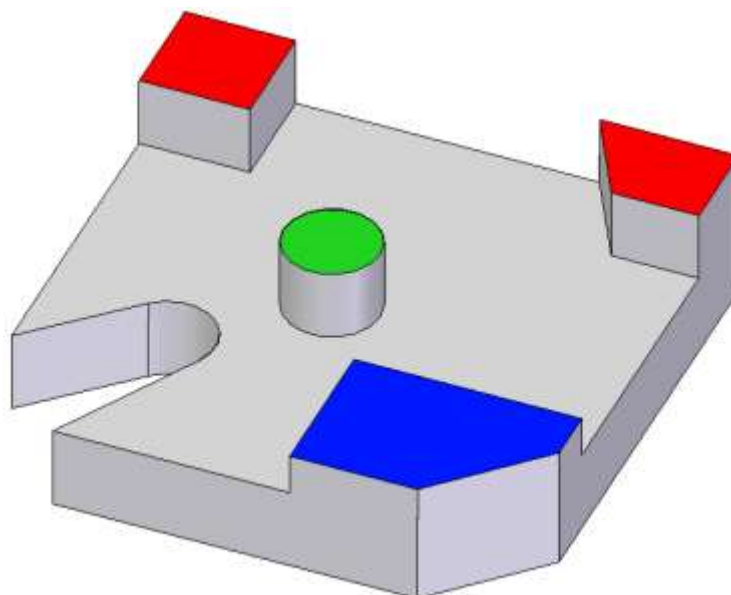


Рис. 1. Деталь для анализа

Но все перечисленные системы можно отнести к системам, которые действуют по уже разработанным, известным алгоритмам и просто заменяют ручной проход по этим алгорит-

мам на автоматическую обработку исходных данных. При этом на любом предприятии машиностроительной отрасли остается много задач, которые не имеют столь серьезной формализации. Одной из таких задач является задача автоматического построения элементов технологического оснащения производственного процесса.

Одним из первых шагов для решения проблемы автоматического создания станочного приспособления является анализ поверхностей детали, передаваемых из САД-системы в модуль построения оснастки. По возможности, должны производиться группировка и упрощение поверхностей с целью последующего повышения эффективности алгоритмизации создания станочного приспособления. Еще одной важной задачей, решаемой с помощью преобразования поверхностей из геометрического в матричный вид, является задача расширения базизирующих поверхностей для повышения площади опоры.

Проведем анализ расширения базизирующих поверхностей на примере детали, представленной на рис. 1.

1. В первую очередь необходимо определиться с классификацией поверхностей, например, в простейшем варианте можно предложить классификацию, приведенную в табл. 1.

Таблица 1

Пример классификации поверхностей

Присваиваемый код поверхности	Тип поверхности
01	Плоская
02	Цилиндрическая
03	Коническая
04	Сферическая
...	...

По данному признаку проводим первую сортировку поверхностей. По нашей детали можно сделать вывод, что она имеет поверхности только 01 и 02 типов.

2. Для продолжения работы понадобится извлечение из конкретных поверхностей определенных данных, Например, необходимо знать, к какому типу поверхностей по отношению к обработке на интересующей операции относится та или иная поверхность (базизирующая, обрабатываемая или прочая), точностные параметры поверхности и методы получения поверхностей. Так, если поверхности перед данной операцией имеют различную точность, то данные поверхности недопустимо рассматривать как единую связку.

Для анализа выберем поверхность торца цилиндрической бобышки (в центре рис. 1). Пусть условно все поверхности имеют одинаковые точностные показатели, значит, в нашем примере по данному признаку с целью упрощения задачи мы разделять поверхности не будем.

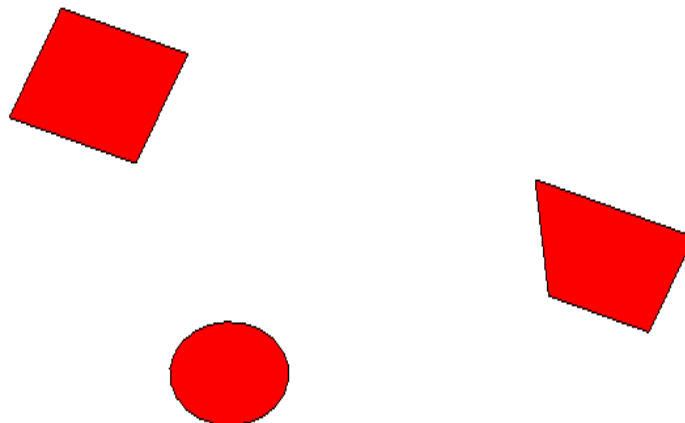


Рис. 2. Искомые копланарные плоскости

3. Далее в зависимости от типа поверхностей определяем, могут ли получившиеся группы быть объединены в одну единую поверхность. Собственно задача сводится в нашем случае к определению, какие из поверхностей с одинаковой точностью, попавшие в группу «плоские поверхности», могут быть копланарны выбранной нами для примера (рис. 2). В результате перебора получилось, что в данной детали имеются две поверхности, копланарные выбранной для анализа поверхности. В качестве математического аппарата можно использовать проверку на принадлежность трех произвольно выбранных точек проверяемой поверхности к интересующей нас поверхности.

4. Определив копланарные плоскости, переходим к шагу преобразования данных поверхностей к модифицированному типу. В качестве модифицированной понимается поверхность или группа поверхностей детали, преобразованная в единую поверхность. Наиболее рационально, если единой поверхностью будет поверхность, представленная в виде простейшей сетки кривых u - v . Эта схема широко используется во всех CAD-системах для упрощения математических расчетов. Данная сетка для нашей плоской поверхности примет вид поверхностного прямоугольника. Рассмотрим основные шаги построения модифицированной поверхности.

Для начала определяется расстояние между точками, принадлежащими исходным поверхностям путем перебора всех возможных вариантов. Из данного списка определяется наибольшее расстояние и объявляется одной из главных направляющих, например v_n (рис. 3).

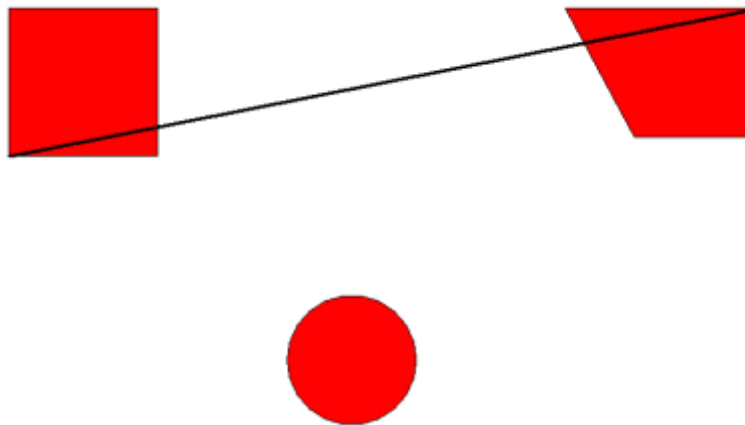


Рис. 3. Определение наибольшего расстояния между точками поверхностей

После этого определяется вторая направляющая u_n . Определить вторую направляющую таким же методом невозможно, так как возникает сразу несколько проблем при определении ее тем же методом, связанных в первую очередь со сложностью констатации факта, что данные направляющие при построении по ним поверхности охватят все интересующие поверхности, поэтому она определяется суммой из двух частей.

Определение первой части во многом схоже с определением первой направляющей, только в качестве основного параметра для выбора выступает катет треугольника, так же производится перебор всех возможных вариантов, в каждом подсчитывается значение катета, и, в конечном счете, выбирается максимальное значение. Эта точка и будет первой точкой второй направляющей (рис. 4, а). По сути, первая часть второй направляющей является рассчитанным нами катетом. На данном этапе будет целесообразно определить и вторую точку данного катета, так как ее координаты понадобятся нам при нахождении точек модифицированной поверхности. Учитывая, что нам известны координаты обеих точек первой направляющей и мы можем рассчитать расстояние от данных точек до точки пересечения катета с

первой направляющей, данная задача достаточно легко решается составлением математической пропорции.

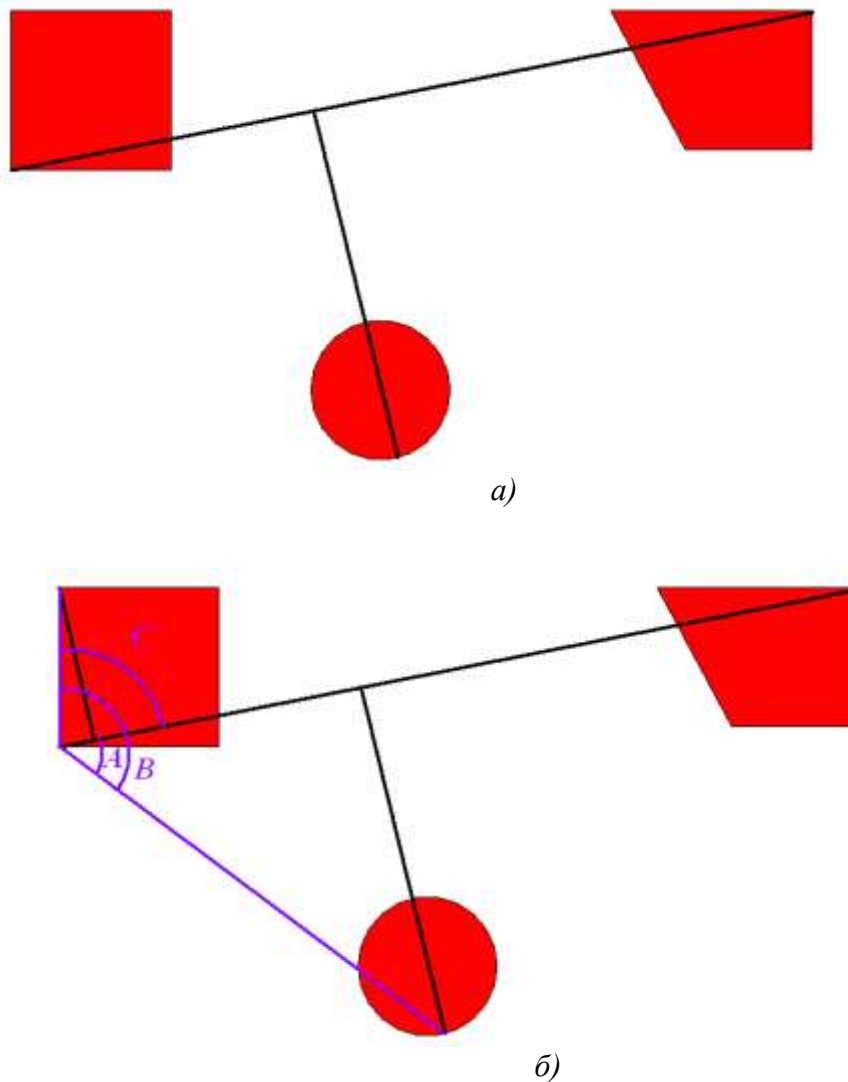


Рис. 4. Определение:

a – первой части второй направляющей; *б* – второй части второй направляющей

Вторая часть выбирается из того же списка, что и первая, путем перебора всех точек в последовательности убывания значения их катетов. При этом каждый раз производится проверка на местоположение данной точки, чтобы исключить возможность выбора двух точек со стороны одной направляющей. Проверка производится путем расчета угла, образованного одной из точек первой направляющей, первой точкой второй направляющей и перебираемой точкой (угол *B*, рис. 4, б) и сравнением его с углом, образованным первой направляющей и первой точкой второй направляющей (угол *A*, рис. 4, б).

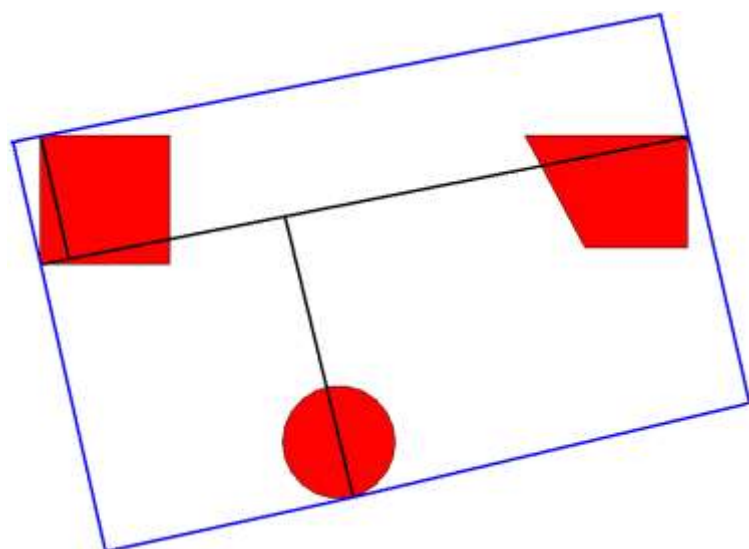
Если угол *A* получается больше угла *B*, то производится переход к следующей точке перебора. Так же параллельно проводится проверка на условие выполнения равенства суммы углов *A* и *C* углу *B* (рис. 4, б), что окончательно исключает возможность выбора двух точек с одной стороны первой направляющей.

$$\begin{cases} B > A \\ A + C = B \end{cases}$$

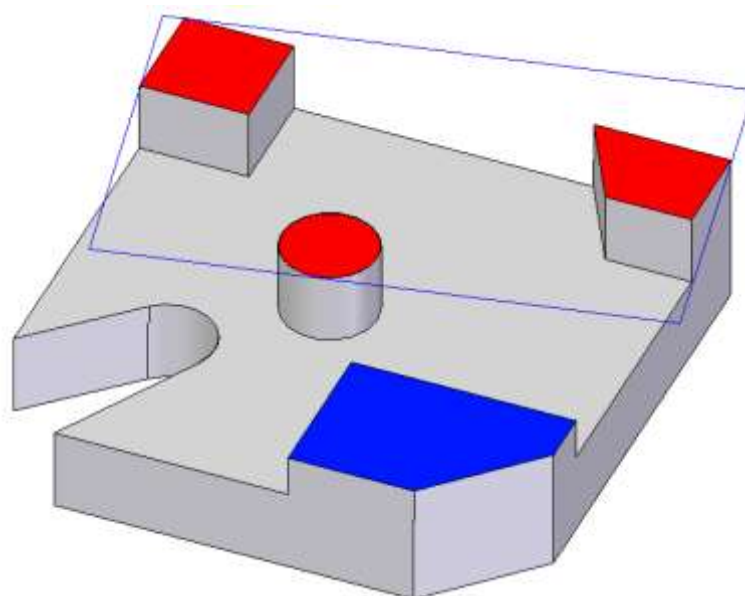
В результате перебора всех точек может оказаться, что второй составляющей направляющей не будет существовать: в этом случае она принимается равной нулю, и первая часть второй направляющей становится полноценной направляющей. Тогда первая направляющая фактически становится ребром модифицированной поверхности.

Если же вторая часть направляющей существует, то также рационально будет на данном этапе определить точку пересечения катета и первой направляющей.

Как только будут определены все три (две) составляющие каркаса создаваемой поверхности, можно перейти к последнему шагу создания модифицированной поверхности. Данные направляющие описываются прямоугольником, таким образом, что все четыре (три) определенные точки лежат на ребрах прямоугольника а два его ребра параллельны первой направляющей (рис. 5).



а)



б)

Рис. 5. Создание модифицированной поверхности (а), модифицированная поверхность в трехмерном виде (б)

Математически данная задача решается путем определения четырех точек – вершин прямоугольника, используя известные точки направляющих (две точки первой направляющей и от двух до четырех точек второй направляющей).

Аналогично данной методике можно создавать модифицированные поверхности других типов, упрощая дальнейшую работу по построению ответных элементов.

Данное преобразование поверхностей позволяет исключить проблемы, связанные с бесконечно возможной конфигурацией поверхностей, передаваемых в модули построения оснастки. Позитивным является фактор возможности исключения малых объектов из последующей работы еще на этапе передачи поверхностей из САД-системы в модуль построения оснастки. Но в то же время передача всех поверхностей детали обязательна, так как малые или просто исключенные поверхности могут оказаться принципиально важными для дальнейшего построения элементов технологического оснащения.

*Дата поступления
в редакцию 14.10.2011*

P.E. Bukin, I.N. Frolova

CREATION OF THE MODIFIED SURFACES AS A STEP TO AUTOMATIC CONSTRUCTION MACHINE TOOLS ADAPTATIONS

Solution of a problem of acceleration of release of new production at the industrial enterprise directly it is connected with replacement of manual skills of workers by automatic work of modern programs. One of the least studied elements are technologies of automatic creation of elements of industrial equipment.

Key words: a surface, machine tools the adaptation, automation, classification of surfaces, the analysis of surfaces.

УДК 53.088.23

С.Е. Пилипосян

УГОЛ ОТКЛОНЕНИЯ, ПЕРИОД КОЛЕБАНИЙ И ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЦЕНТРАЛЬНОГО МОМЕНТА ИНЕРЦИИ ФИЗИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Прецизионные измерения центрального момента инерции неоднородного твердого тела, проведенные по методу регистрации периода колебаний, требуют особого внимания к оценке погрешностей измерений. Приведена оценка влияния амплитуды на период колебаний и оценка вклада этой зависимости на погрешность измерения центрального момента инерции. Полученные результаты, позволили уточнить соответствующие формулы оценки систематических и статистических погрешностей, приводимые в литературе.

Ключевые слова: физический маятник, связь периода и амплитуды колебаний, полный нормальный эллиптический интеграл Лежандра первого рода, погрешность измерения момента инерции.

Введение

Измерение главных или центральных моментов инерции неоднородных твердых тел является актуальной технической задачей [1–3]. В этих измерениях часто используется метод гармонических колебаний испытываемого тела вокруг заданной оси, при этом измеряется период малых колебаний испытываемого тела как физического маятника. С целью уменьшения погрешности измерения периода колебаний, как правило, приходится измерять совокупное время как можно большего числа (около 100) колебаний маятника, выведенного из состояния устойчивого равновесия. Действия диссипативных сил приводят к затуханию колебаний, поэтому провести измерения при малых колебаниях физического маятника бывает невозможным. То есть когда число колебаний, после которых амплитуда колебаний уменьшается в ϵ раз, меньше ста ($N_\epsilon < 100$), значение угла начального отклонения $\varphi_{\max 1}$ должен быть достаточно большим ($\varphi_{\max 1} \geq 20^\circ$). При сухом трении в точках опоры подвеса амплитуда колебаний уменьшается по арифметической прогрессии. При некотором, ненулевом значении амплитуды, эти колебания прекращаются из-за явления застоя, присущего сухому трению. При жидком трении в точках опоры подвеса амплитуда колебаний уменьшается по геометрической прогрессии, и формально колебания длятся бесконечно [4].

Связь угла отклонения и периода колебаний

Уравнение движения физического маятника

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2} + \frac{mga}{J} \sin\varphi = 0 \quad \text{или} \quad \frac{d^2\varphi}{dt^2} + \left(\frac{2\pi}{T_0}\right)^2 \sin\varphi = 0 \quad (1)$$

имеет общее решение, которое описывает негармонические, но также периодические колебания, с амплитудным (уже немалым) значением угла $0 < \varphi_{\max 1} < \pi$. Период этих колебаний T зависит от угла $\varphi_{\max 1}$. Максимальный угол отклонения колеблющегося маятника от состояния равновесия не может быть больше π , в противном случае возникнет вращательное движение. Приведем связь T с T_0 [5]. Напомним, что T_0 – период колебаний с амплитудным значением угла отклонения $\varphi_{\max 1} \rightarrow 0$. Так как математический маятник является частным случаем физического маятника, то общее решение приведенного дифференциального уравнения полностью удовлетворяет уравнениям движения математического маятника.

Умножая обе части этого второго порядка линейного однородного дифференциального уравнения на $d\varphi$ и интегрируя, получим

$$\frac{d^2\varphi}{dt^2}d\varphi = -\omega_0^2 \sin\varphi d\varphi, \quad d\left(\frac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right) = \omega_0^2 d(\cos\varphi),$$

$$\int d\left(\frac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2\right) = \int \omega_0^2 d(\cos\varphi), \quad \frac{1}{2}\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 = \omega_0^2 \cos\varphi + C_1.$$

Постоянную интегрирования C_1 найдем, записывая начальные условия для угла отклонения физического маятника. Пусть, когда $t=0$, $\varphi=\varphi_{\max 1}$, $d\varphi/dt=0$. Тогда $C_1 = -\omega_0^2 \cos\varphi_{\max 1}$.

Следовательно, $\left(\frac{d\varphi}{dt}\right)^2 = 2\omega_0^2 (\cos\varphi - \cos\varphi_{\max 1})$ или $\frac{d\varphi}{dt} = \omega_0 \sqrt{2(\cos\varphi - \cos\varphi_{\max 1})}$,

откуда следует, что $dt = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{\sqrt{2(\cos\varphi - \cos\varphi_{\max 1})}}$.

Для интегрирования произведем замену переменных, согласно равенствам

$$\sin(\xi) = \frac{\sin(\varphi/2)}{\sin(\varphi_{\max 1}/2)}, \quad d(\sin(\xi)) = \frac{1}{\sin(\varphi_{\max 1}/2)} d(\sin(\varphi/2)),$$

$$\cos(\xi) d\xi = \frac{1}{2} \frac{\cos(\varphi/2)}{\sin(\varphi_{\max 1}/2)} d\varphi, \quad d\varphi = 2\sin(\varphi_{\max 1}/2) \frac{\cos(\xi)}{\cos(\varphi/2)} d\xi.$$

Интервалу значений $0 \leq \varphi \leq \varphi_{\max 1}$ соответствует интервал значений $0 \leq \xi \leq \pi/2$ переменной ξ , то есть одна четвертая часть целого колебания. Следовательно,

$$dt = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{\sqrt{2(\cos\varphi - \cos\varphi_{\max 1})}} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\varphi}{\sqrt{2(1 - 2\sin^2(\varphi/2) - 1 + 2\sin^2(\varphi_{\max 1}/2))}} =$$

$$= \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{2\sqrt{(-\sin^2(\varphi/2) + \sin^2(\varphi_{\max 1}/2))}} 2\sin(\varphi_{\max 1}/2) \frac{\cos(\xi)}{\cos(\varphi/2)} d\xi =$$

$$= \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{1 - (\sin^2(\varphi/2)/\sin^2(\varphi_{\max 1}/2))}} \frac{\cos(\xi)}{\cos(\varphi/2)} d\xi = \frac{1}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{1 - \sin^2(\xi)}} \frac{\cos(\xi)}{\cos(\varphi/2)} d\xi =$$

$$= \frac{1}{\omega_0} \frac{d\xi}{\cos(\varphi/2)} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - (\sin(\varphi_{\max 1}/2)\sin(\xi))^2}} = \frac{1}{\omega_0} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - \sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2(\xi)}}.$$

Таким образом, $\int_0^{T/4} dt = \frac{1}{\omega_0} \int_0^{\pi/2} \frac{d\xi}{\sqrt{2(1 - \sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2\xi)}}$,

или, разложив в ряд подынтегральную функцию, получим

$$T = \frac{4}{\omega_0} \int_0^{\pi/2} \frac{d\xi}{\sqrt{1 - \sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2\xi}} = T_0 \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} (1 - \sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2\xi)^{-1/2} d\xi =$$

$$= T_0 \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi/2} \left(1 + \frac{1}{2}\sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2\xi + \frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}(\sin^2(\varphi_{\max 1}/2)\sin^2\xi)^2 + \dots\right) d\xi = \tag{2}$$

$$= T_0 \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} \left(1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2(\varphi_{\max 1}/2) + \left(\frac{3}{8}\right)^2 (\sin^2(\varphi_{\max 1}/2))^2 + \dots\right) > T_0.$$

Это решение можно представить в общем виде [6]:

$$\begin{aligned} \frac{T}{T_0} &= \frac{2}{\pi} K\left(\sin\left(\frac{\varphi_{\max}}{2}\right)\right) = \frac{2}{\pi} K(k) = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 1; k^2\right) = \\ &= F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 1; k^2\right) = 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 k^4 + \dots = \\ &= 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\varphi_{\max}}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 \sin^4\left(\frac{\varphi_{\max}}{2}\right) + \dots, \end{aligned} \quad (3)$$

где
$$K(k) \equiv K(\sin(\varphi_{\max}/2)) \equiv K(\sin(\alpha)) = \int_0^{\pi/2} \frac{dx}{\sqrt{1 - (\sin\alpha)^2 (\sin x)^2}} = \int_0^{\pi/2} \frac{dx}{\sqrt{1 - k^2 (\sin x)^2}}$$

является полным нормальным эллиптическим интегралом Лежандра первого рода. Он, как убедились, не выражается через конечное число элементарных функций, рассчитывается методом приближений и приводится в виде таблиц [6]. Значения $K(\sin(\alpha))$ в таблицах [6] приводятся в зависимости от значения угла α , который в данном случае представляется равенством $\alpha \equiv \varphi_{\max}/2$. Величина $F(a, b; c; z)$ в выражении для T - гипергеометрическая функция [6], являющаяся решением гипергеометрического дифференциального уравнения Гаусса:

$$z(1-z) \frac{d^2 w}{dz^2} + [c - (a+b+1)z] \frac{dw}{dz} - abw = 0.$$

Она выражается формулой

$$w = F(a, b; c; z) \equiv 1 + \frac{ab}{c} z + \frac{1}{2!} \cdot \frac{a(a+1)b(b+1)}{c(c+1)} z^2 + \dots,$$

из которой следует, что
$$F\left(\frac{1}{2}, \frac{1}{2}; 1; k^2\right) = 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 k^2 + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 k^4 + \dots$$

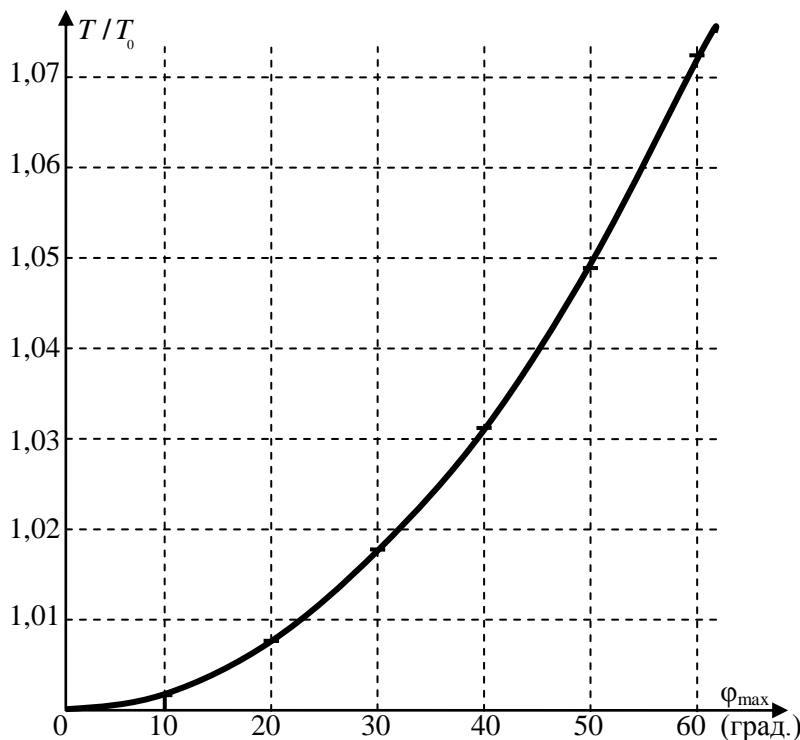


Рис. 1. Зависимость периода от амплитуды угла колебаний

На рис. 1 и в табл. 1 приведены значения отношения T/T_0 для широкого интервала значений амплитуды угла отклонения $0 < \varphi_{\max} < \pi$.

Очевидно, что при $\varphi_{\max} < 10^\circ$

$$\left(\frac{T - T_0}{T_0}\right) < 0,2\%.$$

Если же $\varphi_{\max} > 23^\circ$, то

$$\left(\frac{T - T_0}{T_0}\right) > 1,0\%.$$

Поскольку неравенство $T > T_0$ выполняется для всех значений $0 < \varphi_{\max} < \pi$, то возникает систематическая погрешность измерения периода колебаний, которая, в свою очередь, приводит к систематической погрешности измерения центрального момента инерции J_c испытываемого тела.

Таблица 1

Зависимость периода колебаний от амплитуды угла отклонения маятника

φ_{\max} (град)	0	10	20	30	40	60	90	120	150
T/T_0	1	1,0019	1,0076	1,0179	1,0313	1,0732	1,1803	1,3729	1,7622

Во время эксперимента маятник выводится из положения устойчивого равновесия на определенный угол $\varphi_{\max 1}$ и измеряется совокупное время τ для $N \gg 1$ колебаний. Регистрируется амплитудное значение угла отклонения после N колебаний - $\varphi_{\max N}$. Для этих N колебаний определяются среднее время одного колебания $\bar{T} = \tau / N$ и среднее значение амплитуды угла отклонения $\bar{\varphi}_{\max} = (\varphi_{\max 1} + \varphi_{\max N}) / 2$.

$$\bar{T} = T_0 \frac{2}{\pi} K\left(\sin\left(\frac{\bar{\varphi}_{\max}}{2}\right)\right) = T_0 \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2}\right)^2 \sin^2\left(\frac{\bar{\varphi}_{\max}}{2}\right) + \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{3}{4}\right)^2 \sin^4\left(\frac{\bar{\varphi}_{\max}}{2}\right) + \dots \right\}. \quad (4)$$

Поскольку неравенство $\bar{T} > T_0$ выполняется для всех значений $0 < \varphi_{\max 1} < \pi$, то возникает систематическая погрешность измерения J_c .

Период колебаний и погрешность измерения центрального момента инерции

Центральный момент инерции тела J_c определяется, согласно равенствам

$$J_c(m, a, T_0) = ma \left(\frac{gT_0^2}{4\pi^2} - a \right) = mR_c^2, \quad J_c(m, a, \bar{T}) = ma \left(\frac{g\bar{T}^2}{4\pi^2} - a \right), \quad (5)$$

где m – масса тела; R_c - его радиус инерции; a - расстояние точки центра масс тела от оси вращения.

Следовательно, систематическую абсолютную погрешность измерения центрального момента инерции $\Delta J_{c,\varphi}$ можно представить выражением

$$\begin{aligned} \Delta J_{c,\varphi} &= J_c(m, a, \bar{T}) - J_c(m, a, T_0) = \frac{mag}{4\pi^2} (\bar{T}^2 - T_0^2) = \\ &= \frac{mag}{4\pi^2} \bar{T}^2 (1 - T_0^2 / \bar{T}^2) = (J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right), \end{aligned} \quad (6)$$

где $\alpha \equiv \frac{\bar{\varphi}_{\max}}{2} = \frac{\varphi_{\max 1} + \varphi_{\max N}}{4}$.

Относительная систематическая погрешность определения центрального момента инерции, обусловленная немалым значением амплитуды угла отклонения, будет

$$\begin{aligned} (\delta J)_{c,\varphi} &= \frac{\Delta J_{c,\varphi}}{J_{c,\varphi}} = \frac{J_c(m, a, \bar{T}) - J_c(m, a, T_0)}{J_c(m, a, T_0)} = \\ &= \frac{(J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right)}{mR_c^2} = \left(\frac{J_c(m, a, \bar{T})}{mR_c^2} + \frac{a^2}{R_c^2} \right) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right) = \quad (7) \\ &= \left(\frac{mR_c^2 + \Delta J_{c,\varphi}}{mR_c^2} + \lambda^2 \right) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right) = (1 + (\delta J)_{c,\varphi} + \lambda^2) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right). \end{aligned}$$

Решив это линейное уравнение относительно $(\delta J)_{c,\varphi}$, получим

$$(\delta J)_{c,\varphi} = (1 + \lambda^2) \left(\frac{4}{\pi^2} (K(\sin(\alpha)))^2 - 1 \right). \quad (8)$$

С поправкой на систематическую погрешность (6), для J_c получим

$$\begin{aligned} J_c(m, a, T_0) &= J_c(m, a, \bar{T}) - \Delta J_{c,\varphi} = \\ &= J_c(m, a, \bar{T}) - \left(J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2 \right) \left(1 - \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} \right) = \\ &= \left(J_c(m, a, \bar{T}) + ma^2 \right) \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2 = J(m, a, \bar{T}) \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2. \end{aligned} \quad (9)$$

Таким образом, измеренное значение момента инерции неоднородного твердого тела относительно центральной оси, параллельной выбранному направлению AA_1 можно, представить в виде

$$J_c = J_c(m, a, T_0) \left(1 \pm (\delta J_c)_{m,a,T} \right) = J_c(m, a, T_0) \left(1 \pm \sqrt{(\delta J_c)_m^2 + (\delta J_c)_T^2 + (\delta J_c)_a^2} \right), \quad (10)$$

где

$$J_c(m, a, T_0) = J(m, a, \bar{T}) \left(\frac{2}{\pi} K(\sin(\alpha)) \right)^{-2} - ma^2. \quad (11)$$

В монографии М.М. Гернета и В.Ф. Ротобыльского [1] для расчета погрешности измерений обсуждаемым здесь методом приведены две некорректные формулы (сравни с формулой(10))

$$\delta J_c = \sqrt{(\delta J_{c\varphi})^2 + (\delta J_{cm})^2 + (\delta J_{ca})^2 + (\delta J_{cT})^2},$$

где (сравни с формулой (8)).

$$\delta J_{c\varphi} = \left(1 - \frac{4K^2}{\pi^2} \right) \left(1 - \frac{a^2}{R_c^2} \right)$$

Систематическая погрешность неправильно оценена. Действительно, при $\lambda = a/R_c = 1$ она равна нулю при любом значении амплитуды угла отклонения маятника. Кроме того, систематическая погрешность использована в качестве статистической, когда ее следует использовать как поправку.

Разумеется, чем больше влияние диссипативных сил, тем большим должен быть угол начального отклонения для получения одинакового числа колебаний. Следовательно, тем большим окажется связанная с ним поправка периода колебаний в выражении для δJ_c .

Следует отметить, что, как доказал Н.Е. Жуковский, трение в опорах влияет на амплитуду, но не влияет на изменение периода для данного значения амплитуды колебаний. На амплитуду влияют также сопротивление воздуха, упругие силы и моменты сил трения качения в опорах, однако влиянием этих факторов на период колебаний можно пренебречь.

Если испытываемое тело вместе с подвесом обладает небольшой массой, то его целесообразно качать на призмах, в противном случае необходимо использовать цилиндрические шипы и смазку.

Таким образом, для прецизионного измерения центрального момента инерции произвольного твердого тела методом физического маятника [7] проведены точная оценка и правильный учет систематических и статистических погрешностей измерений, заслуживающие доверия.

Библиографический список

1. **Гернет, М.М.** Определение моментов инерции / М.М. Гернет, В.Ф. Ратобильский. – М.: Машиностроение, 1969. - 315 с.
2. **Стороженко, В.А.** Синхронизация вращения в задаче определения главной центральной оси инерции неоднородного твёрдого тела. Проблемы механики / В.А. Стороженко. – М.: Физматлит, 2003.
3. **Стороженко, В.А.** Определение направлений главных осей инерции в теле произвольной формы / В.А. Стороженко. - Киев, 1986. - 40 с.
4. **Голубева, О.В.** Теоретическая механика / О.В. Голубева. – М.: Физматлит, 1961. – 701 с.
5. **Савельев, И.В.** Курс общей физики: учеб. пособие. В 3-х т. Т. 1. Механика. Молекулярная физика / И.В. Савельев. – СПб.: Лань, 2006. - 432 с.
6. **Корн, Г.А.** Справочник по математике / Г.А. Корн, Т.М. Корн. – М.: Наука, 1974.– 832 с.
7. **Пилипосян, С.Е.** Измерение момента инерции произвольного твердого тела // Машиностроение и автоматизация: труды НГТУ. – Н. Новгород, 2010. №4 (83). С. 100–110.

*Дата поступления
в редакцию 02.04.2010*

S.E. Piliposian

**DEVIATION ANGLE, VIBRATION PERIOD AND MEASUREMENT ERROR
OF PHYSICAL PENDULUM CENTRAL MOMENT OF INERTIA**

Special attention should be paid to estimation of measurement errors during precision measurements of central moment of inertia of heterogeneous solid body performed via the method of vibration period recording.

The article estimates amplitude effects on vibration period and contribution of this dependence to measurement error of central moment of inertia.

The obtained results point out the incorrectness of corresponding formulas for estimation of the systematic and statistical errors given in the monograph of M.M. Gernet and V.F. Ratobylskiy [1].

Key words: physical pendulum, connection between vibration period and amplitude, complete elliptic integral of the first kind in Legendre normal form, moment of inertia measurement error.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК 621.039.577-182.3

Ф.М. Митенков

К ВОПРОСУ ОБ АКТУАЛЬНОСТИ РАЗВИТИЯ МАЛОЙ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ ДЛЯ ПЕРСПЕКТИВНОГО РАЗВИТИЯ РОССИИ

Рассматриваются вопросы актуальности развития серийного производства объектов малой атомной энергетике в качестве одного из определяющих мероприятий по решению производственных и социальных вопросов освоения неиспользуемых территорий Зауралья, Сибири и Дальнего Востока, при этом подчеркивается необходимость организации соответствующих работ на основе целевых национальных программ.

Ключевые слова: атомная энергетика, объекты малой атомной энергетике, плавучая и стационарная АЭС, биологическая защита, технико-экономический анализ, демографическая проблема.

История человеческого общества свидетельствует, что одним из определяющих факторов его развития является эффективность и масштабы энергопроизводства, при этом значимость этого фактора непрерывно возрастает с течением времени.

XX век вошел в историю как век освоения человеком внутриатомной энергии, принципиально нового, практически неиссякаемого источника энергии для успешного решения обществом непрерывно растущих нужд в энергопотреблении.

Первое фактическое использование атомной энергии было осуществлено в военных целях (бомбардировка силами США городов в Японии в 1945 г.), затем атомные энергетические установки стали достаточно широко использоваться для военных кораблей США, СССР, Англии и Франции. Для мирного использования атомная энергетика нашла место в гражданском судостроении: атомные ледоколы СССР: «Ленин», «Вайгач», «Таймыр», лихтеровоз «Севморпуть» и др., торговое судно «Саванна» (США), а затем и в других развитых странах. Одновременно развернулись проектно-конструкторские работы по созданию атомных электростанций с использованием тепловых и «быстрых» энергетических реакторов.

В 1976 г. Правительством СССР было принято решение о создании в Нижнем Новгороде атомной котельной, которая должна была производить горячую воду для отопления нагорной части города в целом, т.е. объектов сугубо социального назначения. При этом 364 городских котельных, работающих на угле и нефтепродуктах, планировалось вывести из эксплуатации, что существенно сказалось бы на экологической обстановке в нагорном регионе города и экономической эффективности за счет сокращения численности обслуживающего персонала. При подготовке решения Правительства о строительстве атомной котельной в Н.Новгороде было также предусмотрено строительство подобной станции в Воронеже. Были обозначены некоторые другие города, в которых при положительных результатах эксплуатации в г. Н. Новгороде и Воронеже должны были также строиться атомные котельные типа АСТ-500.

Таким образом, немного более чем за 40 лет атомная энергетика прошла путь ста-

новления и готовится к новым эффективным решениям, которые должны способствовать широкому и интенсивному развитию большой атомной энергетики на базе усовершенствованных тепловых реакторов деления.

Проблема ресурса топливообеспечения реакторов планируется к решению на базе вводимых в эксплуатацию реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем типа БН, которые обеспечивают расширенное воспроизводство делящихся изотопов (плутоний и другие) с последующим производством ядерных тепловыделяющих сборок (ТВС) на специализированных предприятиях.

Следует иметь в виду, что отказ в проекте АСТ-500 от производства электроэнергии имел временный характер. В ОКБМ после завершения проекта АСТ-500 было выполнено несколько проектных разработок, удовлетворяющих общепринятым требованиям к ТЭЦ на органическом топливе с использованием основных проектно-конструкторских решений проекта АСТ-500.

Важнейшей проблемой атомной котельной было обеспечение приемлемой стоимости создания котельной и производимой продукции (товарная цена вырабатываемого пара и услуг котельной для потребителей).

Ко времени разработки проекта уже имелась информация о капитальных затратах при проектировании, создании и эксплуатации атомных электростанций. Было установлено, что удельные затраты определяются номинальной мощностью станции. Очевидно, что при использовании проектных и конструктивных решений, зарекомендовавших себя в большой атомной энергетике (с тепловой мощностью $N_{\text{ном}}$ более 500 МВт), удельные затраты при создании атомных котельных будут превышать удельные затраты при создании больших АЭС во много раз.

Поэтому при разработке проектов малой атомной энергетики необходим поиск характерных решений, отражающих фактические особенности объекта малой атомной энергетики. Основные положения таких характерных решений, в частности, предусматривают:

- проектирование, конструирование, отработка технологий должны выполняться из условия серийного производства на всех привлеченных специализированных предприятиях;
- монтаж оборудования и обеспечивающих систем реакторной установки должен производиться на привлеченных предприятиях, отвечающих требованиям экономической оптимальности и качества;
- организация серийного производства строительных и монтажных работ в сфере инфраструктуры станции;
- минимизация строительного и эксплуатационного персонала за счет оптимизации инфраструктуры, механизации и автоматизации работ в процессе строительства;
- увеличение энергозапаса реактора за счет сведения к минимуму количества перегрузок за время эксплуатации (не более 1-2) либо обеспечение первой загрузки на весь планируемый срок эксплуатации станции, что предполагает представительную отработку топлива и конструкции активной зоны в целом. В проекте АСТ-500 предусмотрена возможность поиска разгерметизированных ТВС, их оперативной выгрузки и замены на новые ТВС. Такое решение позволяет значительно увеличить ресурс работы реакторной установки, не прибегая к полной перезарядке реактора;
- совершенствование используемых проектных решений с учетом фактической эксплуатации.

Соответствующий тщательный анализ, выполненный в процессе разработки и создания атомной котельной АСТ-500, позволил выделить ряд организационных, технологических, проектно-конструкторских решений, которые при создании объекта малой атомной энергетики могут существенно повлиять на капитальные затраты.

Имеются основания считать, что объект малой атомной энергетики должен создаваться и организационно рассматриваться как составная часть национального проекта по освое-

нию или модернизации какого-либо региона страны, имеющего целью внесение в экономику региона и страны в целом существенного вклада, включая значительное улучшение социальных условий, не уступающих центральным регионам страны.

Весьма важно выполнить технико-экономический анализ малой атомной станции не как самостоятельного законченного объекта строительства, а как составной части региона, подлежащего освоению или модернизации на современных принципах и решениях, обеспечивающих повышение экономической эффективности с учетом выполнения современных социальных требований, стабильности численности населения региона, значительное повышение жизненного уровня населения. В этом случае создание малой атомной станции будет только одним из важных пунктов выполнения утвержденной экономической программы. Такой подход позволит синхронизировать создание, модернизацию составных частей программы, включая расходование средств, материалов, рабочей силы, и исключить простой в процессе строительства. Реализация такого подхода, несомненно, позволит существенно выиграть и в сроках, и в затратах финансовых средств, в оптимальности планирования работ в регионе.

Изложенные соображения убедительно свидетельствуют, что малая атомная энергетика неизбежно должна быть самостоятельным направлением развития, поскольку выявление и решение проектно-конструкторских и отработка технологических задач будут диктоваться спецификой объектов, существенно отличающихся для малой и большой энергетике.

Создание для малой атомной энергетике специализированных предприятий представляется нецелесообразным в условиях одного промышленного комплекса (и для большой, и для малой атомной энергетике). По-видимому, потребуются создание специализированных предприятий вне единого промышленного комплекса.

В имеющихся проектных разработках объектов малой атомной энергетике рассматриваются два типа энергоустановок: стационарные и плавучие. Плавучие станции включают плавучие энергоблоки (ПЭБ) и инфраструктуру (береговые сооружения). Атомные энергетические установки монтируются на барже, которая должна удовлетворять морским правилам и требованиям для самоходных или буксируемых объектов [1]. Перемещение ПЭБ по воде обеспечивает существенное упрощение транспортировки, если требуется периодическая смена стоянки в изменившихся условиях. Однако при этом могут существенно изменяться внешние воздействия на станцию или условия ее работы.

Отсюда следует, что в техническом задании на проектирование плавучей АЭС должны четко определяться регионы перемещения станции, изменение внешних воздействий на станцию при ее эксплуатации и перемещении.

Соответствующий анализ приводит к заключению, что при проектировании и изготовлении плавучей станции следует выделить несколько этапов:

- создание реакторной установки с использованием варианта серийной стационарной установки;
- корректировка проекта биологической защиты для РУ плавучей АЭС;
- монтаж биологической защиты на барже.

При таком подходе появляется практическая возможность использовать для плавучей станции серийную реакторную установку, а биологическую защиту корректировать с учетом планируемых зон перемещения станции и изменяющихся внешних воз/действий.

Основные проблемы малой атомной энергетике, решение которых определяет надежность и эффективность проекта:

- обеспечение гарантированной безопасности;
- ресурсная надежность;
- экономическая оптимальность.

При проектировании оборудования необходимо базироваться не на вероятностных оценках возможных аварийных ситуаций, а только на достоверных результатах, получаемых при строгом анализе аварийных ситуаций и консервативной оценке их последствий.

Все системы и оборудование исследуются с целью физически возможных нарушений, последствия которых и определяются с точки зрения их масштаба и характера. Для известных типов реакторных систем последствия связаны с нарушением состояния активных зон реакторов, их целостности, физически возможного расплавления в соответствующих аварийных условиях. При этом детальное описание механизмов разрушения и их развития не требуется, поскольку сам факт разрушения позволяет судить о характере и масштабах последствий и необходимости изменить проектные решения. Такой подход исключает необходимость определения вероятности разрушения, достаточно убедиться, физически разрушение возможно или невозможно, поэтому и появляется возможность обеспечения гарантированной безопасности. Поскольку все составные части проекта, в которых разрушение с недопустимыми последствиями физически возможны, должны устраняться при проектировании. Ресурсная надежность фактически учитывается при анализе выхода из строя оборудования и систем.

По мнению автора, актуальность развития малой атомной энергетики обусловлена в первую очередь острой необходимостью освоения и заселения пустующих земель в Зауралье, Восточной Сибири и Дальнем Востоке. Стремительный рост численности населения нашей планеты однозначно свидетельствует о необходимости учитывать утверждение Мальтуса, что неограниченный рост потребностей человеческого общества может войти в недопустимое противоречие с ограниченным потенциалом их удовлетворения. Действительно, уже сейчас общество испытывает недостаток пресной воды, топливных материалов, удобрений, производство которых требует достаточно большого количества дополнительной энергии, чистого воздуха, загрязненность которого с течением времени только возрастает из-за растущих отходов деятельности человека и др.

К настоящему времени Россию как государственное образование, располагающее территорией в 17 млн кв. км, отличает чрезвычайно высокий процент неосвоенных земель. Однако каких-либо национальных масштабных программ по технико-экономическому освоению и заселению пустующих земель пока не существует, и каких-либо их разработок не планируется, а разработка таких научно обоснованных программ национальной значимости является весьма сложной задачей.

За последние годы Россия все в большей степени погружается в демографическую трясиину, преодоление которой руководители видят только в повышении зарплаты, установлении льготных ссуд для приобретения более комфортного жилья, решении проблем ЖКХ. Однако даже простейший системный анализ демографической проблемы в нашей стране показывает, что ее успешное решение, если и существует, то оно гораздо сложнее и требует учета многих факторов, а не только повышения зарплаты, установления льготных ссуд и налаживания состояния ЖКХ.

Какая связь малой атомной энергетики и решения демографических проблем России?

История нашей страны показывает, что проблема заселения пустующих земель в России возникала неоднократно. Достаточно вспомнить, как под давлением скифов (степняков) россияне вынуждены были отступать на север, осваивая лесные просторы, в которых скифы в значительной степени утрачивали свои преимущества в коннице. Последнее переселение крестьян в царской России из центральных западных земель (Поволжье, Воронежская, Курская, Смоленская губернии и др.) на свободные земли Зауралья, Восточной Сибири, Дальнего Востока диктовалась нехваткой земель у крестьян в связи с ростом численности населения и неизбежным дроблением крестьянских наделов.

Следует заметить, что переселения в России, дошедшие до нас из истории, не диктовались какой-либо одной причиной, одинаковыми внешними или внутренними условиями, а имели причины, характерные для текущего времени.

В наше время необходимость заселения пустующих земель обусловлена технико-экономическим развитием соответствующих регионов. стремлением повысить обороноспо-

способность страны в целом, обеспечить ее целостность и избежать очередного передела и разделения страны, поскольку желающих такого разделения более чем достаточно. Об этом не стесняются говорить и официальные деятели из окружения нашей страны.

Следует иметь в виду, что в этих условиях едва ли можно только рассчитывать на неприкосновенность границ наших пустующих территорий только потому, что наши предки позаботились о стратегических условиях сохранения самостоятельности страны. Нужны люди, народ и целеустремленная плодотворная деятельность руководителей страны.

Выводы

1. Становление малой атомной энергетики для экономического и социального развития пустующих регионов России имеет определяющий характер для обеспечения целостности страны и повышения ее обороноспособности [2].

2. Имеются основания считать, что наиболее эффективной формой развития малой энергетики является разработка национальных программ по освоению наиболее перспективных пустующих регионов страны, составной частью которых должны быть энергообеспечение, социальные, демографические, культурные и образовательные проблемы, целевые промышленные предприятия.

3. Синхронизация предусмотренных программой работ позволит существенно сэкономить финансовые и материальные средства, рабочую силу и плановые сроки по завершении работ.

*Дата поступления
в редакцию 12.07.2011*

Библиографический список

1. Правила классификации и постройки атомных судов и плавучих сооружений // Российский морской регистр судоходства. – Санкт-Петербург, 2008.
2. **Алексеев, П.П.** Система АЭС малой мощности как фактор национальной безопасности России / П.П. Алексеев [и др.] // Информационный материал для научно-технического семинара по проблемам АЭС малой мощности. – М., 2006.
3. **Щепетина, Т.Д.** Ядерная энергия для села // Независимая газета. 13.10.2009.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

F.M. Mitenkov, Academician

THE QUESTION OF THE RELEVANCE OF A SMALL NUCLEAR POWER FOR FUTURE DEVELOPMENT OF RUSSIA

Discusses the relevance of production facilities of small nuclearpower as a determinant of industrial activities to address social issues and areas of unused Trans-Urals, Siberia and the Far East.It stresses the need for appropriate works pas through targetednational programs.

Key words: objects of small nuclear power, floating and fixed plant, biological protection, technical and economic analysis, the demographic problem.

УДК 621.791.3

А.Г. Александрин, Д.В. Лошак, Е.А. Герасимов, В.П. Кошман

**ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ В ОАО «ОКБМ Африкантов»
ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ЯЭУ**

ОАО «ОКБМ Африкантов», г. Нижний Новгород

Изложен опыт применения электронно-лучевой сварки (ЭЛС) в ОАО «ОКБМ Африкантов» для изготовления оборудования ядерных энергетических установок. Приведены основные технические характеристики установки для ЭЛС, описан процесс выполнения продольных швов обечаек, а также применяемые методы контроля сварных швов. Дан сравнительный анализ данного способа изготовления деталей с технологиями применяемыми ранее.

Ключевые слова: электронно-лучевая сварка, оборудования ядерных энергетических установок, продольные швы обечаек, механическая обработка, аргонодуговая сварка.

Опыт промышленного применения в нашей стране и за рубежом электронно-лучевой сварки (ЭЛС) свидетельствует о том, что в ряде случаев она имеет неоспоримое преимущество перед традиционными технологиями получения неразъемных соединений [1]. Успешно применяется ЭЛС в машиностроении для сварки изделий из высокопрочных сплавов и сталей, сплавов на основе титана и алюминия; ЭЛС производится в вакууме, поэтому позволяет сохранить исходную чистоту свариваемого металла и получать сварные швы очень высокого качества [2].

В ОАО «ОКБМ Африкантов» для сварки продольных швов обечаек из железоникелевого сплава применяется технология ЭЛС. Обечайки толщиной $S=1-2$ мм и диаметрами от 80 до 220 мм используются в качестве заготовок для изготовления деталей оборудования ядерных энергетических установок (ЯЭУ).

Одним из применяемых способов изготовления обечаек, без применения сварки, была механическая обработка. Обечайку изготавливали с помощью токарной обработки из сплошной поковки или проката. Использование такой технологии изготовления, когда большое количество материала «уходит» в стружку, дорого и трудоемко.

Также для изготовления обечаек применяется автоматическая аргонодуговая сварка. Качество аргонодуговой сварки не всегда удовлетворяет требованиям конструкторской документации, так как в сварных швах требуется обеспечить полное отсутствие дефектов.

ЭЛС обеспечивает высокое качество сварных швов и значительно превосходит по этому параметру ручную и автоматическую аргонодуговую сварку.

Сварка продольных швов обечаек выполняется на установке ЭЛС УЛ-178М (рис. 1), которая была изготовлена Институтом электросварки им. Е.О. Патона (г. Киев).

ЭЛС изделия производится после его перемещения относительно неподвижной электронно-лучевой пушки на позицию сварки по программе с последующим отклонением и разверткой сварочного электронного пучка по стыку.

В установке применяется двухуровневая многопроцессорная автоматизированная система управления (АСУ), которая управляет вакуумной системой, перемещением изделия по двум координатам в плоскости с одновременным их отображением на экране дисплея, а также мощностью, фокусировкой и отклонением электронного пучка. Вакуумная система управляется автоматически от одной кнопки. АСУ управляет всем ходом технологического сварочного процесса с одновременным отображением его параметров на экране дисплея.

Наблюдение за зоной сварки, автоматический поиск центра, диагностика геометрических и энергетических параметров электронного пучка осуществляются с помощью системы визуализации процесса сварки и системы диагностики электронного пучка. Отображение зоны шва на

экране дисплея может производиться до и после сварки. Система визуализации обеспечивает увеличение объекта наблюдения до 5-10 крат, а также возможность диагностирования пучка электронов перед сваркой изделия с целью воспроизводимости параметров сварного шва.



Рис. 1. Общий вид установки ЭЛС УЛ-178М

АСУ и программное обеспечение установки УЛ178М управляет всем ходом технологического процесса, отображает его на экране дисплея, а также выдает отчетный документ о результатах сварки конкретного изделия. При этом обеспечивается работа установки в трех режимах: ручном, полуавтоматическом и автоматическом. Система для визуализации поверхности и диагностики пучка позволяет контролировать на экране дисплея выезд в реперную точку, на датчик диагностики электронного пучка и на устройство контроля глубины проплавления, совмещение электронного пучка со свариваемым стыком в ручном и полуавтоматическом режимах.

Вакуумная система установки ЭЛС УЛ-178М предназначена для создания и поддержания в вакуумной камере и электронно-лучевой пушке рабочего вакуума. Механизм перемещения изделия служит для перемещения свариваемого изделия по двум координатам X и Y внутри вакуумной камеры во время сварки, а также для выкатывания изделия из камеры на позицию выгрузки-загрузки. На верхней стенке камеры стационарно установлена электронно-лучевая пушка ЭЛА-1,2/60 (далее пушка) с турбомолекулярным насосом F-100/110 (ТМР) производительностью 110 л/с. Далее приведены основные технические характеристики установки ЭЛС УЛ-178М:

Внутренние размеры вакуумной камеры, мм:

- длина.....	1410
- ширина.....	910
- высота.....	2632

Объем вакуумной камеры, м³.....3,4

Максимальные габариты свариваемого изделия:

в приспособлении для сборки, мм

- длина.....	530
- ширина.....	190
- высота.....	2365

Масса свариваемого изделия с приспособлением для сборки, кг, не более.....	262
Рабочий вакуум в вакуумной камере, мм рт.ст., не хуже.....	1×10^{-4}
Рабочий вакуум в электронно-лучевой пушке, мм рт.ст., не хуже.....	5×10^{-5}
Время достижения рабочего давления в вакуумной камере, мин., не более.....	45
Пределы перемещения свариваемого изделия по координатам, мм	
- X-X.....	400
- Y-Y.....	165
Линейная скорость сварки, мм/с.....	10
Энергетический блок с источником высоковольтного питания 1,2 кВт/60 кВ Spellman:	
- ускоряющее напряжение, кВ.....	60
- диапазон регулирования сварочного тока, мА.....	1-20
- диапазон фокусного расстояния, мм.....	100-300
- диапазон регулирования тока фокусирующей линзы, мА.....	400-1000
Общие технические характеристики:	
- силовое электропитание.....	380В, 50/60Гц
- потребляемая электрическая мощность, кВА, не более.....	18
- масса установки, кг.....	8500
- габаритные размеры установки, мм:	
- длина.....	4680
- ширина.....	3540
- высота.....	3275

Перед сборкой внешняя и внутренняя поверхности обечайки, выводные пластины, а также сварочное приспособление промываются ацетоном, уайт-спиритом и этиловым спиртом. Выводные пластины прихватываются к обечайке в сборочном приспособлении по торцам, с обеих сторон стыка ручным аргоно-дуговым способом без присадочной проволоки (рис. 2). После прихватки выводных пластин обечайка снимается со сборочного приспособления.



Рис. 2. Сборка и прихватка выводных пластин

Первоначально собранную и подготовленную под сварку обечайку устанавливают и фиксируют на двухкоординатном манипуляторе установки (рис. 3). Производят откачку объемов вакуумной камеры и электронной пушки до разрежения не более $1,3 \cdot 10^{-2}$ Па ($1 \cdot 10^{-4}$ мм рт.ст.) и $6,6 \cdot 10^{-3}$ Па ($5 \cdot 10^{-5}$ мм рт.ст.) соответственно. Выполняют контроль основных энергетических, временных и пространственных параметров электронного пучка на позиции диагностики.

Перемещают двухкоординатный манипулятор в ручном режиме управления электроприводом на начало продольного стыка обечайки и совмещают с помощью автоматизированной системы управления (АСУ) и экрана дисплея электронный пучок с серединой зазора между свариваемыми кромками обечайки.

Далее перемещают двухкоординатный манипулятор в ручном режиме так, чтобы электронный пучок находился на выводной планке на расстоянии 10-20 мм от начала стыка и сохраняют в программе данную точку как начальную. Конечную точку сварки выбирают на второй выводной планке.



Рис. 3. Установка обечайки в приспособлении для сварки на рабочий стол УЛ-178М

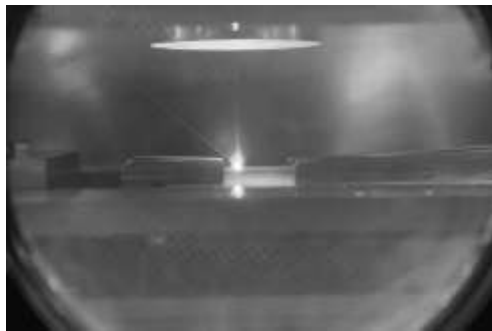


Рис. 4. Сварка продольного шва обечайки

Прихватывают в нескольких местах равномерно по стыку свариваемые кромки обечайки путем кратковременного включения сварочного тока.

В момент времени, когда электронный пучок находится на выводной планке, оператор отключает систему визуализации, далее оператор в ручном режиме плавно увеличивает ток пучка до значения сварочного тока первого прохода. После чего включает автоматическое перемещение двухкоординатного манипулятора в конечную точку сварки. После выполнения первого прохода двухкоординатный манипулятор с обечайкой перемещается в положение, соответствующее исходному состоянию, и аналогично первому выполняются последующие проходы (рис. 4).



а)



б)

Рис. 5. Выполненный продольный сварной шов обечайки:

а – вид сверху, *б* – вид снизу

Контроль качества электронно-лучевой сварки продольного шва обечайки (рис. 5) производят такими методами, как:

- визуальный и измерительный контроль;
- радиографический контроль;
- капиллярный контроль;

- контроль герметичности;
- механические испытания;
- металлографические исследования (рис. 6).

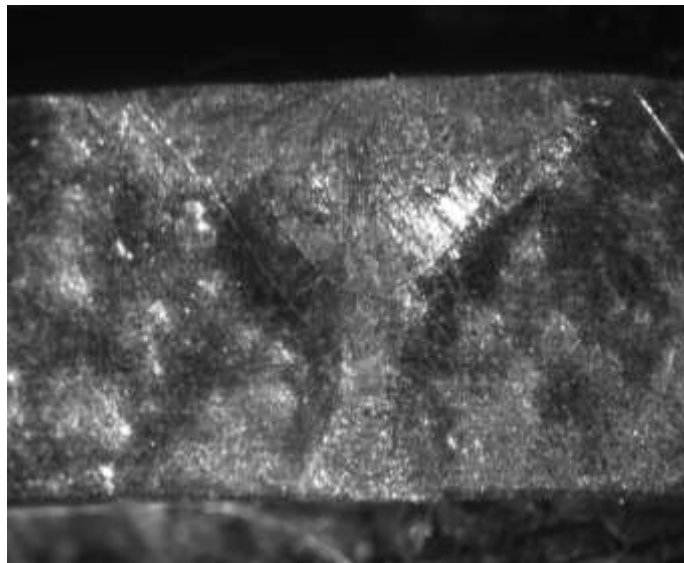


Рис. 6. Шлиф сварного соединения обечайки

Исправление недопустимых дефектов в сварном соединении в виде пор, трещин, непроваров исправляют повторной сваркой без их выборки по указанной технологии.

Выводы

1. Замена технологии изготовления обечаек путем токарной обработки из сплошной поковки на электронно-лучевую сварку дает значительную экономию материала и снижение трудоемкости.
2. Применение технологии электронно-лучевой сварки для изготовления деталей оборудования ЯЭУ, по сравнению с ручной и автоматической аргонодуговой сваркой, привело к улучшению качества сварных соединений и полному отсутствию брака.

Библиографический список

1. Состояние и перспективы применения электронно-лучевой и лазерной сварки: информ. обзор / О.К. Назаренко, Д.В.Лашкевич. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона, 1989.
2. Электронно-лучевая сварка / О.К. Назаренко [и др.]. – Киев.: Наукова думка, 1987. – 256 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2011*

A.G. Alexandrine, D.V. Hanny, E. Gerasimov, V.P. Koshman

USING AN ELECTRON BEAM WELDING FOR MAKING EQUIPMENT NPS IN OKBM OF AFRIKANTOV

The article describes the experience of using electron-beamwelding (EBW) at OKBM of Afrikantov for the manufacturing of the equipment of nuclear power plants. The basic technical characteristics of the facility for EBW, describes how to perform longitudinal seams of shells, as well as the methods applied welds. A comparative analysis of the method of manufacture of parts with the technologies used previously.

Key words electron-beam welding, the equipment of nuclear power plants, longitudinal seams of shells, machining, argon-arc welding.

УДК 621.9.02-229

Е.В. Тесленко¹, Д.С. Тесленко², В.В. Андреев¹,**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ СОЕДИНЕНИЙ ТИПА «ВАЛ-ВТУЛКА»
С ПОМОЩЬЮ ИСКУССТВЕННОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТИ**Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Ракетно-космическая корпорация «Энергия» им. С.П. Королева²

Рассмотрена задача прогнозирования состояния соединения с натягом деталей типа «вал-втулка» и выбора посадок с помощью нейросетевых алгоритмов, базируясь на существующих пакетах прикладных программ. Предложена модель, отражающая связь между факторами, влияющими на образование натяга в соединении (входы модели), и предельным натягом (выход модели). Представлены результаты исследования. Программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» входит в интеллектуальную информационную систему автоматизированной технологической поддержки САД-проектирования, которая реализует активную поддержку технологической подготовки производства.

Ключевые слова: соединения деталей, нейронные сети, прогнозирование состояния соединений, интеллектуальная информационная система.

Эффективность современного производства определяется ресурсоёмкостью и надёжностью изделий. Улучшение этих показателей качества позволит повысить конкурентоспособность отечественной промышленности. При этом качество узлов и агрегатов в значительной степени зависит от качества подвижных и неподвижных соединений деталей.

Соединения типа «вал-втулка» получили самое широкое применение в узлах и агрегатах. Необходимые свойства соединений обеспечивают различными сочетаниями размеров сопрягаемых поверхностей, которые называют *посадками* [1].

Известно три метода назначения посадок: эмпирический, подобия и расчетный [2]. Эмпирический метод предполагает применение посадки, уже подтвердившей работоспособность в аналогичном соединении. Метод подобия заключается в сопоставлении конструктивных признаков и условий эксплуатации проектируемого соединения с признаками и условиями, указанными в справочных материалах, после чего назначается рекомендуемая посадка. Расчетный метод сводится к определению предельных размеров сопрягаемых поверхностей, которые обеспечивают нормативный запас прочности в неподвижном (рис. 1) или запас на износ в подвижном соединении.

Запас прочности неподвижных соединений необходим в связи с трудностью выявления отклонений от геометрической формы сопрягаемых деталей, приводящих к ослаблению соединения. Особенно это относится к отклонениям формы втулки, не выявляемым при контроле отверстия непроходной пробкой.

Эффективность создания запасов на износ или прочность соединений оценивается повышением срока службы машин на 30-50%.

В системах автоматизированного проектирования (САПР) с помощью ЭВМ выбираются готовые конструкторские решения с указанием тех полей допусков и посадок элементов деталей, которые оправдали себя на практике.

Общие недостатки перечисленных методов:

- сложность выявления признаков подобия;
- вероятность использования ошибочных рекомендаций;
- отсутствие достоверных данных о влиянии отклонения формы и качества сопрягаемых поверхностей на работоспособность соединения.

В настоящее время основой для выбора посадок являются производственный опыт и экспериментальные данные.

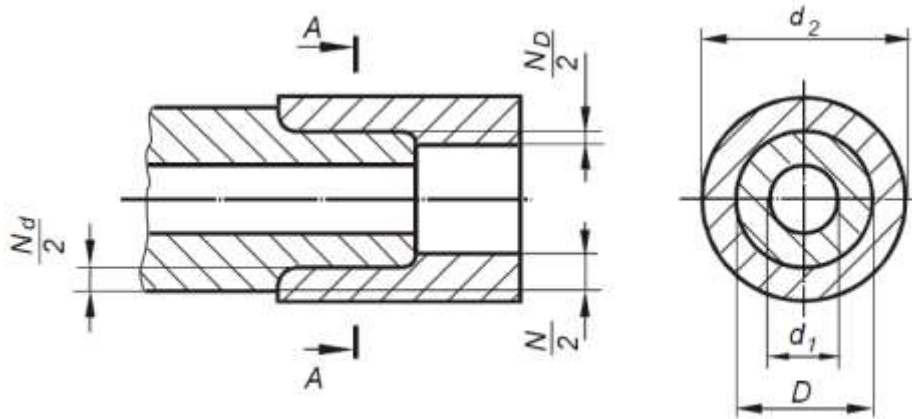


Рис. 1. Соединение с натягом втулки и вала

Известные методики расчета соединений «вал-втулка» являются приближенными, так как не учитывают все факторы, влияющие на соединение. Их применяют для предварительного определения зазоров и натягов, которые могут обеспечить работоспособность в заданных условиях эксплуатации.

На надежность соединения с натягом влияет свыше 20 факторов [3]: это физико-механические свойства материалов вала и втулки, их геометрические параметры, технология сборки, условия эксплуатации, усталость материала, фреттинг-коррозия, остаточные напряжения и т.д. Для учета влияния большинства факторов пока нет математических соотношений и экспериментальных данных.

В настоящее время существуют программы для расчета натягов в соединениях «вал-втулка»: *ANSYS*, *Solid Works Simulation (CosmosWorks)*, *ELCUT*, а также ряд прикладных программ [4, 5, 6]. В этих программах заложены методики расчета, которые не учитывают реальную геометрию детали, отклонения формы, микронеровности поверхностей и другие факторы. Это объясняется недостатком эмпирических данных и сложностью построения интегральных аналитических моделей, связывающих большое число факторов и условий.

В работе предложена методика и программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» посредством нейросетевых алгоритмов.

Входными данными для работы нейронной сети является множество, которое составляют факторы, влияющие на образование натяга (зазора) в соединениях. Размерные факторы при этом поступают с 3D-модели детали. Выходными данными (результатом работы системы) являются прогнозируемые предельные натяги (зазоры), получаемые в результате соединения поверхностей деталей. Задача нейронной сети – подбор весовых коэффициентов для прогнозирования натягов (зазоров).

Рассмотрим задачу прогнозирования состояния соединения с натягом деталей типа «вал-втулка» по эмпирическим данным как задачу обучения нейронной сети.

Для решения поставленной задачи была сформирована искусственная нейронная сеть (ИНС) прямого распространения [7].

Для создания и обучения ИНС использовался программный продукт *Neural Network Wizard*. Обучение производилось на базе обучающей выборки, содержащей 400 строк примеров рассмотренных вариантов соединений. Чтобы ускорить процесс обучения сети, необходимо перед обучением правильно подобрать обучающую выборку с учетом влияния каждого параметра на всем диапазоне его значения. Был выполнен анализ факторов, оказывающих существенное влияние на работу соединений с натягом.

Исследование проводилось на основе экспериментальных данных, экспертного оценивания и теории принятия решений. Полученные результаты представлены в табл. 1. Перечень используемых материалов деталей представлен в табл. 2. Рассмотрены следующие методы запрессовки:

- механическая без смазки;
- механическая со смазкой;
- нагрев втулки;
- охлаждение вала.

С целью формирования эффективной нейронной сети выполнялись работы по определению структуры НС и формы представления данных для обучения НС.

Таблица 1

Факторы, влияющие на величину натяга и прочность соединения вала и втулки

№ п/п	Факторы		
	Фактор	Обозначение	Расшифровка
1	s_1	D	Номинальный диаметр соединения
2	s_2	d_1	Диаметр внутреннего отверстия вала
3	s_3	d_2	Наружный диаметр втулки
4	s_4	L	Длина соединения вала и втулки
5	s_5, s_6		Материал вала, втулки
6	s_7, s_8	μ_d, μ_D	Коэффициенты Пуассона вала, втулки
7	s_9, s_{10}	E_d, E_D	Модуль упругости вала и втулки, Н/м ²
8	s_{11}	P	Продольная осевая сила, Н
9	s_{12}	M	Крутящий момент, Н м
10	s_{13}	F	Коэффициент трения
11	s_{14}, s_{15}	σ_T	Предел текучести материалов вала и втулки, Н/м ²
12	s_{16}		Метод запрессовки
13	s_{17}, s_{18}	Rz_d, Rz_D	Шероховатость вала, втулки, мкм
14	s_{19}, s_{20}	K_1, K_2	Величина смятия неровностей, %
15	s_{21}, s_{22}	t°_d, t°_D	Температура вала и втулки при эксплуатации (рабочая)
16	s_{23}	ρ	Плотность, кг/м ³
17	s_{24}, s_{25}	α	Коэффициент линейного расширения материала вала и втулки
18	s_{26}, s_{27}	TF_d, TF_D	Отклонение формы сопрягаемых поверхностей
19	s_{28}	v	Скорость вращения, м/с

Таблица 2

Исследуемые материалы соединяемых деталей

Материал деталей	
Вал	Втулка
Сталь 30-50	Сталь 30-50
Сталь 30-50	Чугун СЧ 28-48
Сталь 30-50	Магниево-алюминиевые сплавы
Сталь 30-50	Латунь
Сталь 30-50	Бронза
Бр.ОЦС6-6-3	Чугун 15-32
Бр.АЖ-9-4	Сталь 45
Бр.АЖН-11-6-6	Сталь 45

Показатели эффективности определялись с точки зрения величины ошибки в прогнозировании предельных натягов как результата действия совокупности факторов. Критерием обучения была среднеквадратическая ошибка (СКО) по контрольной выборке.

В процессе моделирования использовались трех- и четырехслойные ИНС прямого распространения сигнала (без обратных связей). В качестве функции активации использовалась сигмоидальная функция с параметром сигмоиды $\alpha=1$. Обучению подвергались ИНС с алгоритмами с разным числом нейронов в скрытом слое (N_c). Для обучения сети была сфор-

мирована обучающая выборка. Выборка разделена на две части: 80% выборки использовано для обучения, остальная часть - для тестирования работы сети. Скорость обучения $\nu=0,1$.

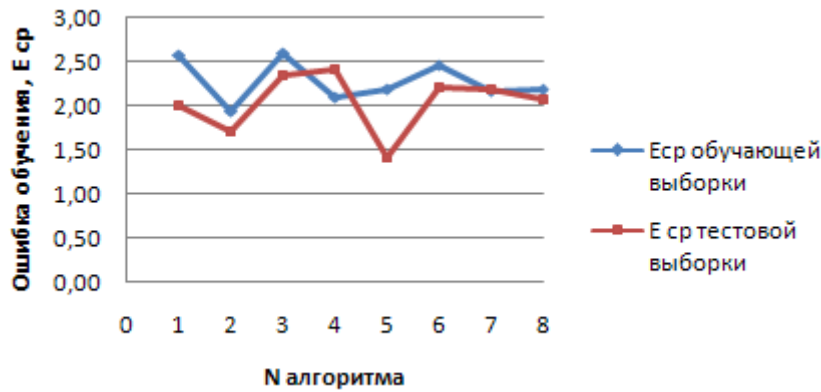


Рис. 2. Ошибка обучения НС на обучающей и тестовой выборках

После обучения большого количества искусственных нейронных сетей была выбрана наилучшая с минимальным СКО.

Анализ разных алгоритмов НС показал, что для поставленной задачи прогнозирования предельных натягов наименьшее время обучения и наименьшую ошибку прогноза имел трехслойный персептрон с алгоритмом 5 (рис. 2). Эти показатели были достигнуты за 3862 эпохи обучения.

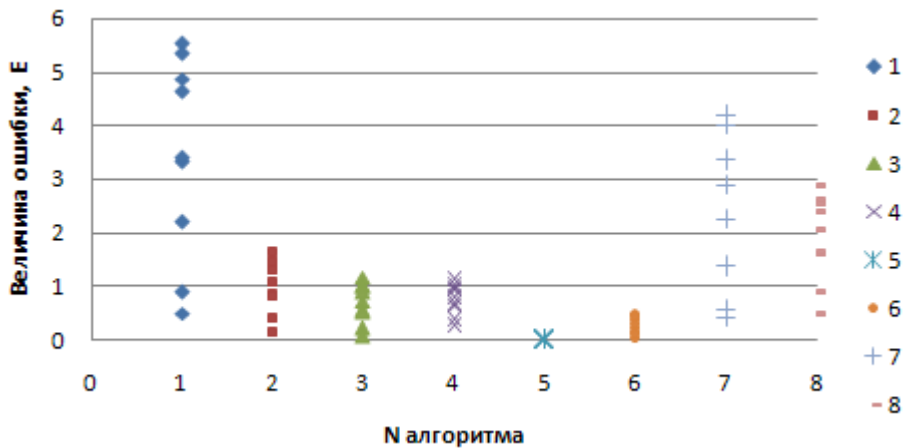


Рис. 3. Величина квадратической ошибки на контрольной выборке для алгоритмов

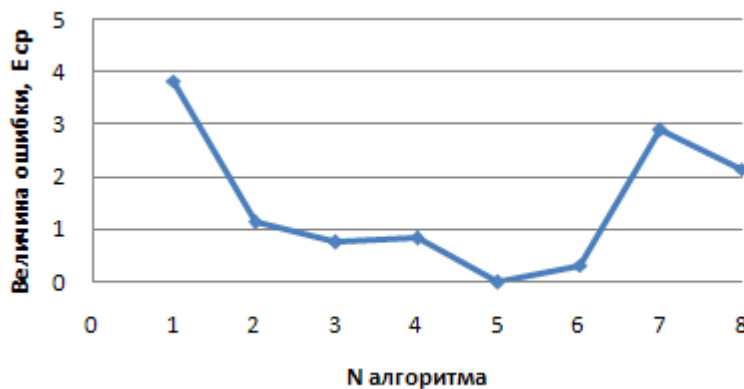


Рис. 4. Величина средней квадратической ошибки трехслойной НС на контрольной выборке для алгоритмов

Наименьшую ошибку прогнозирования предельного натяга на контрольной выборке имела сеть с алгоритмом 5, наибольшую ошибку - трехслойная НС с алгоритмом 1 ($N_c = 20$, структура: 20-20-1) (рис. 3). Среднеквадратическая ошибка для нейронной сети с алгоритмом 5 составила 0,0023 (рис. 4). В результате эксперимента была выбрана трехслойная сеть с алгоритмом 5, имеющая количество нейронов в скрытом слое $N_c = 24$, структура: 20-24-1.

Иллюстрацией качества работы нейронной сети является график зависимости фактических значений выходной переменной $Y_{\text{жел}}$ (Y -Observed) от предсказанных (прогнозируемых) значений Y (Y -Predicted) (рис. 5). Точки этого графика расположены достаточно близко к прямой, лежащей под углом 45° к осям координат, следовательно, модель достаточно хорошо построена.

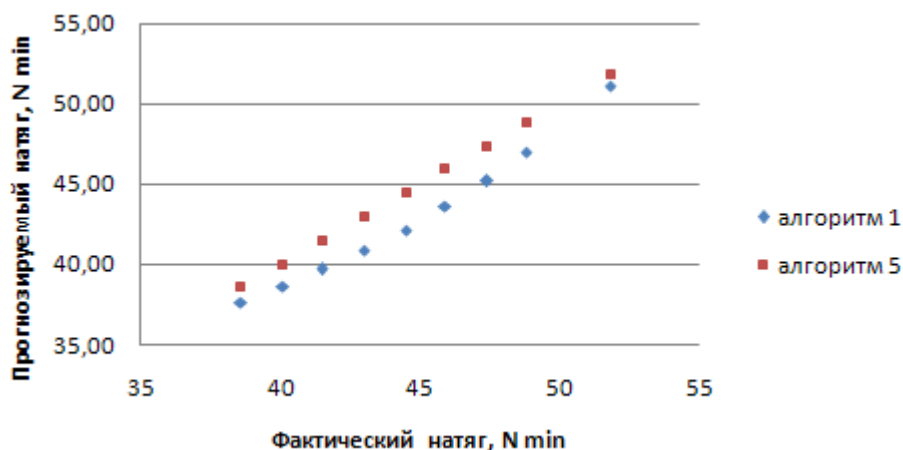


Рис. 5. График качества работы сети, алгоритмы 5 и 1 соответственно

Наиболее важный в практическом использовании этап работы с сетью – выполнение нейропрогноза. Для этого использовалась обученная и протестированная ИНС. Добавив в контрольное множество несколько дополнительных примеров наблюдения, в которых выходные значения – предельное значение минимального натяга N_{\min} пока неизвестны (поэтому они принимаются равными нулю) и, запустив нейропредсказатель, получим отклик сети (рис. 6).

Результаты нейромоделирования хорошо аппроксимируют фактические данные, и средняя квадратическая ошибка составляет менее 1%.

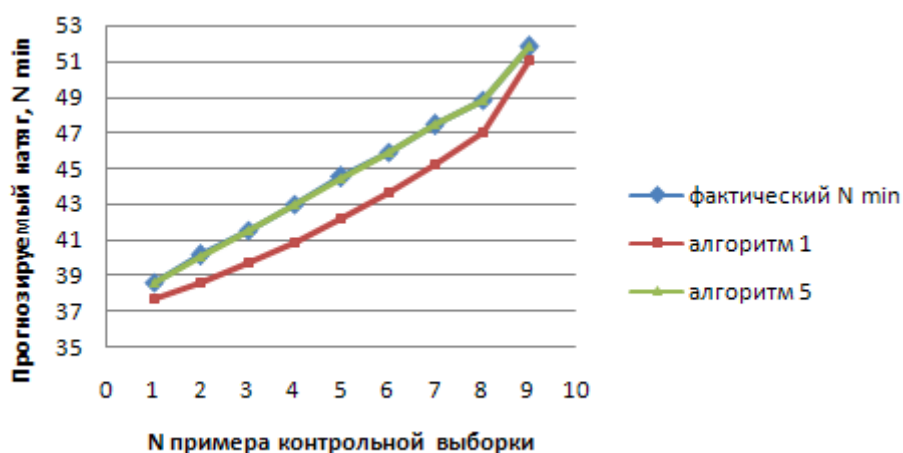


Рис. 6. Сравнение фактического минимального натяга с нейропрогнозом

Это позволяет сделать вывод, что смоделированная сеть будет чувствительна к вариации входных параметров и, следовательно, может быть использована для прогнозирования

состояния соединений «вал-втулка» деталей машиностроения. Сеть способна обобщить закономерность на новые данные.

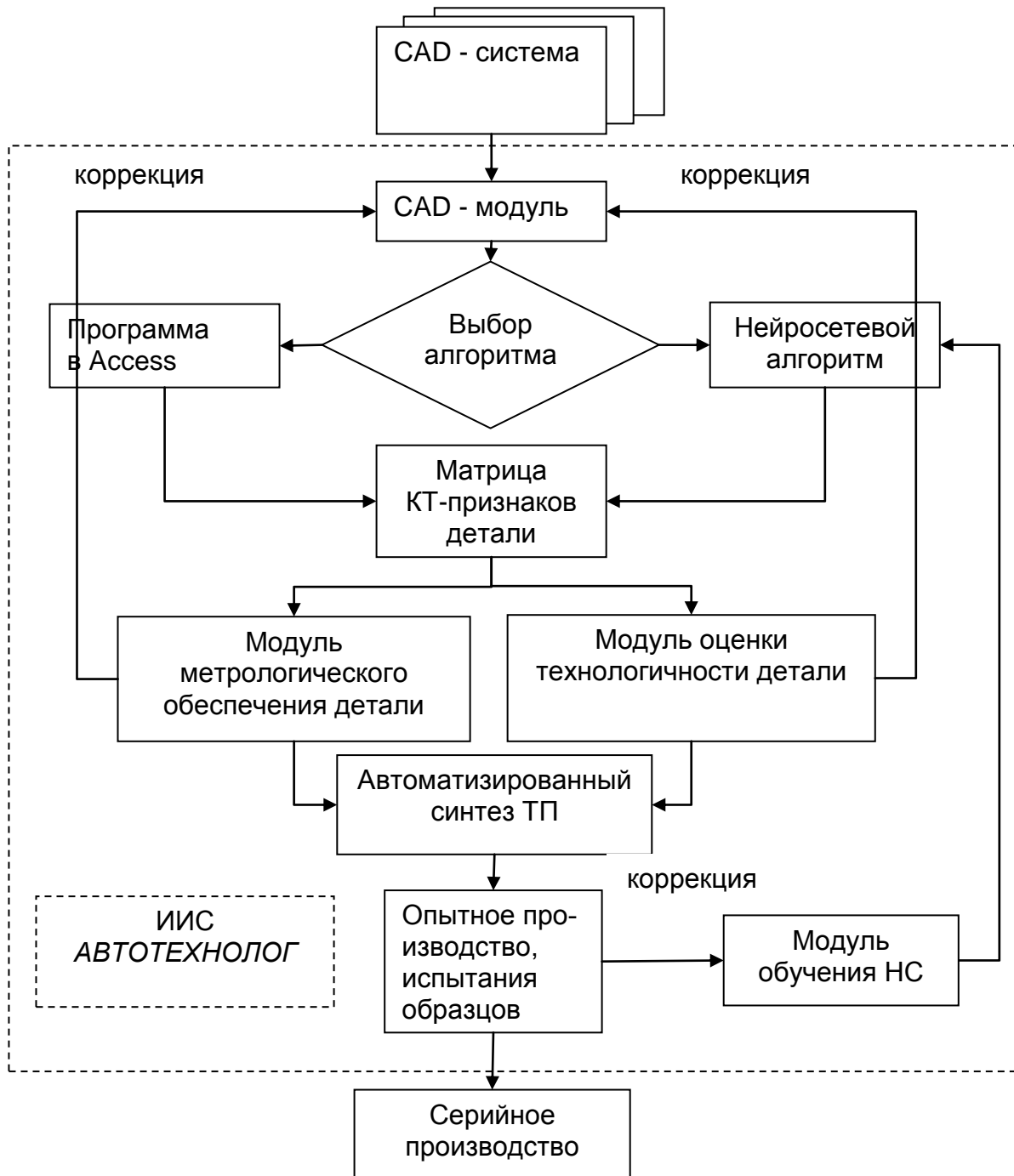


Рис. 7. Работа модуля обучения ИС на реальных данных, получаемых экспериментально при испытаниях деталей в процессе сборки

Объективно существующее ограничение объема обучающей выборки предлагается компенсировать, дообучая сеть с использованием накапливаемых данных.

В результате исследования разработан модуль обучения ИИС, используемой в системе, представленный на рис.7. В результате постоянного сбора экспериментальных данных о прочности соединений с натягом и поступления их на вход нейронной сети сеть самообучается на более широком диапазоне данных. Это позволяет точнее прогнозировать натяги.

Аналогично может быть построена НС для прогнозирования состояния подвижных соединений с зазором.

Программа прогнозирования состояния соединений «вал-втулка» входит в интеллектуальную информационную систему (ИИС) автоматизированной технологической поддержки CAD-проектирования. ИИС *АВТОТЕХНОЛОГ* реализует активную поддержку конструкторско-технологической подготовки производства. Система включает в себя автоматизированные модули назначения посадок, модуль формирования матрицы конструктивно-технологических признаков (КТ) детали [8]. В состав системы входит также модуль численной оценки технологичности и уровня метрологического обеспечения деталей.

Разработанная информационная система позволяет сделать выбор посадки обоснованным, более точным, выполняемым в автоматическом режиме. Это обеспечит надежность работы соединений и повысит качество изделий машиностроения.

Библиографический список

1. ГОСТ 25347-82 ОНВ. Единая система допусков и посадок. Поля допусков и рекомендуемые посадки.
2. Дунаев, П.Ф. Допуски и посадки. Обоснование выбора / П.В. Дунаев, О.П. Леликов, Л.П. Варламова. – М.: Высшая школа, 1984. – 112 с.
3. Гречищев, И. С. Соединения с натягом: Расчеты, проектирование, изготовление / И. С. Гречищев, А. А. Ильяшенко. – М.: Машиностроение, 1981. – 247с.
4. Басов, К. А. ANSYS: Справочник пользователя / К.А. Басов. – М.: ДМК-Пресс, 2005. – 640
5. Алямовский, А. А. SolidWorks/COSMOSWorks. Инженерный анализ методом конечных элементов / А.А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2004. – 432 с.
6. ELCUT. Моделирование двумерных полей методом конечных элементов. Версия 5.8. - ПК «ТОР», Санкт-Петербург, 2010. – 345 с.
7. Каллан, Р. Основные концепции нейронных сетей: [пер. с англ.] / Р. Каллан. – М.: ИД «Вильямс», 2001. – 208 с.
8. Андреев, В.В. Автоматическое формирование массива конструктивно-технологических признаков деталей интеллектуальной информационной системой / В.В. Андреев, Е.В. Тесленко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2010. №3. С. 170–172.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2011*

E.V. Teslenko, D.S. Teslenko, V.V. Andreev

CONDITION FORECASTING OF CONNECTION TYPE “SHAFT-BUSHING” WITH A NEURAL NETWORK

The problem of the condition forecasting of connecting type "shaft-bushing" under the empirical data is examined as a problem of neural network training. We have suggested a model which reflects the connection between factors, influencing tightness formation in connection (model inputs), and tightness limit (model exit) and presented the results of our research. The program forecasting the condition of connection type "shaft-bushing" is included into intelligent information system of the automated technological support of CAD-designing which implements active technological preparation support of manufacture.

Key words: connection of details, neural networks, the condition forecasting of connections, intelligent information system.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

I.A. Harmati¹, A. Rovid², P. Varlaki³

APPLICATION OF LPV TYPE DESCRIPTION FOR VEHICLE SAFETY RESEARCH MODELING

Szechenyi Istvan University, Dept. of Mathematics and Computational Sciences¹,
Obuda University, John von Neumann Faculty of Informatics²,
Budapest University of Technology and Economics, Dept. of Chassis and Lightweight Structures³,

In accident analysis, vehicle crash mechanics and vehicle safety research modeling of the deformational force and absorbed energy plays a crucial role. The usually applied FEM based methods give good approximations, but they have extremely large computational complexity and require a detailed knowledge about the parameters of the crash and the vehicle. There are simpler models, but they not give satisfactory approximation. In this paper using the LPV-HOSVD paradigm we introduce a model for vehicle deformation process, which well approximates the deformation force and the absorbed energy, moreover it has acceptable computational complexity.

Key words: vehicle crash, force model, LPV model, tensor product transformation, higher order singular value decomposition (HOSVD).

Introduction

For all of the car factories one of the most important task is to develop better and better passive and active vehicle safety systems. In most of the cases in the field of vehicle crash mechanics, accident analysis, accident reconstruction and crash analysis the estimation of the energy absorbed by the deformation of the car body is a key issue, it plays important role in precise reconstruction of the whole accident. This project requires a lot of vehicle crash tests and computer simulations, and applying the results of these efforts, different kind of models are developed for passenger safety, vehicle stiffness, etc. So for vehicle engineers one of the most important task is to find an 'as simple as possible' model for the deformational force and the absorbed kinetic energy, which gives acceptable approximation, but doesn't need perfect knowledge about the parameters of the vehicle ([1], [2], [3]).

There are many tools developed to support the accident reconstruction and analysis, but to reconstruct the accident properly, they require accurate input data. The usual way to develop a detailed model of the highly nonlinear deformation processes (not only in the field of vehicle crash) is based on a kind of finite element method (FEM) ([4], [5], [6], [7]). This approach gives a complete description about the whole deformation process, but requires a detailed, accurate knowledge about the geometry of the vehicle and the circumstances, and about the material properties of the vehicle (which are not known exactly in general), and as a consequence of the huge number of freedom, the computer simulation demands extremely large computational power.

But if we are contented with an approach, which not gives such detailed information about the process, but works well in aspect of some important features (for example deformation force and absorbed energy vs. time), a simpler model is more suitable ([1], [3], [8], [9], [10], [11]).

In the followings we introduce a model for vehicle deformation, which well approximates the force and the absorbed energy during the deformational process. This approach gives good approximation and has acceptable computational complexity.

LCB Crash Test Data

In the field of vehicle safety research there are several type of crash tests. For our purpose the most suitable is the so called load cell barrier (LCB) test. Within this approach the examined vehicle is driven into a special barrier which is equipped with force-sensors. During the collision a set of sensors in the back of the car measures acceleration, while force-sensors measure the deformation force at the wall.

We work with data which are available from the free database of NHTSA (National Highway Traffic Safety Administration, USA): <http://www.nhtsa.dot.gov>. We will use data series of three different LCB tests in which a similar type of car was examined with different impact speed. These data are available 'as measured' form, so we have to filter them before of further computing. There are rigorous prescriptions for filtering the crash test data [12]. According to SAE J211 the force and acceleration data were filtered with CFC60 filter (fig. 1). From the acceleration data the deformation is determined by double integration, so after filtering we have two data sets: force vs. time and deformation vs. time (fig. 2). From these one can easily produce the force-deflection curve.

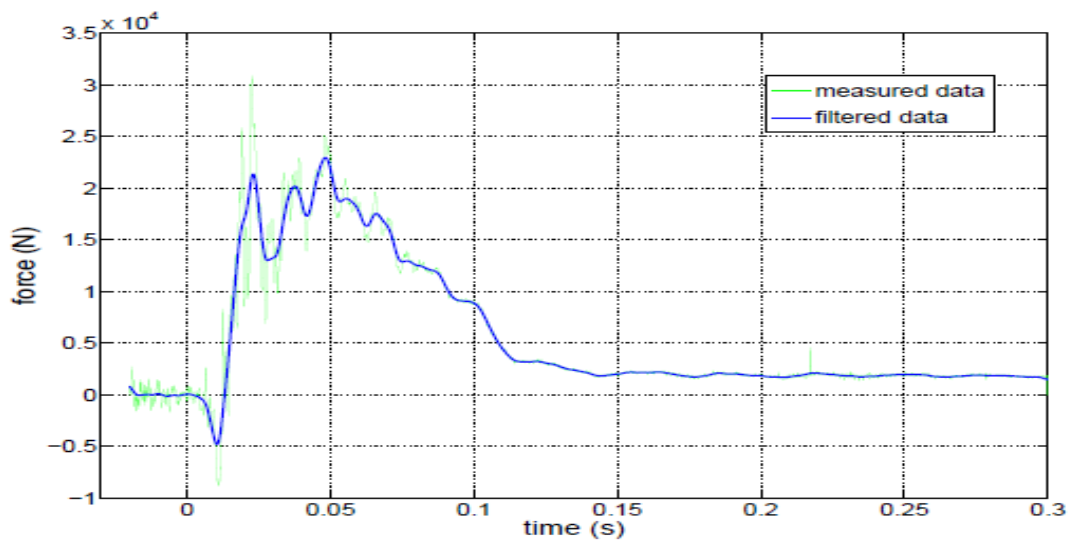


Fig. 1. The measured force and the force after filtering by CFC60 filter vs. time

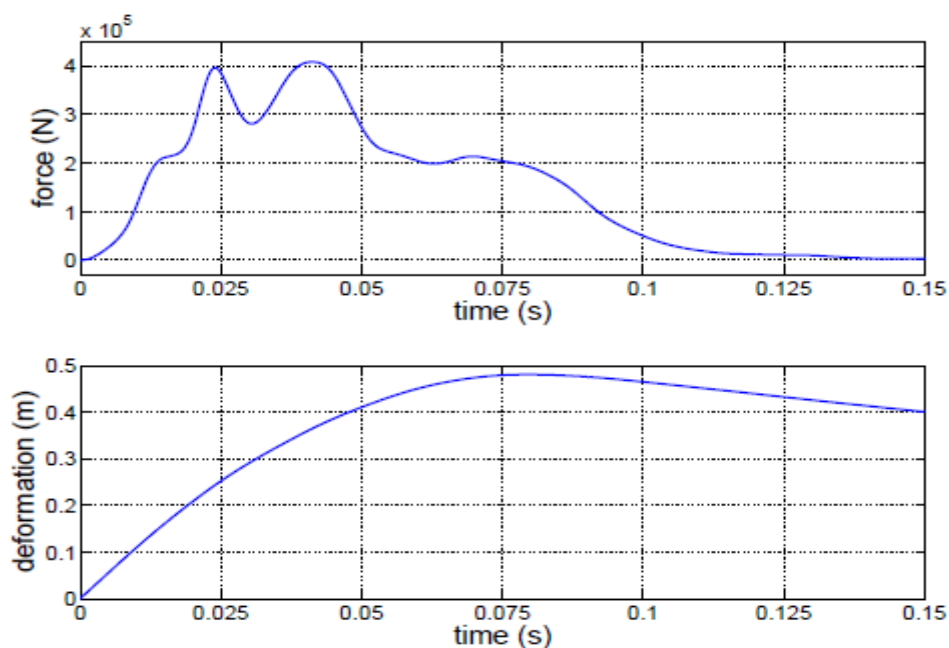


Fig. 2. Filtered force and computed deformation vs. time from a real crash test

We can observe that the first region of the curve is not so far from the linear, but after there appear local maxima and minima, the nonlinearity of the force-deflection relation will be more dominant. Also important to observe the turning back end of the curve: this means that the deformation process has an elastic component (elastic recovery) (fig. 3).

Analyzing the usual force models we can state that those are too simple to be able to describe the peaks and the elastic recovery in the force-deflection curve. Moreover, from the concepts of stiffness it is clear, that this cannot be the same numerical value during the deformation process for the whole car body. Based on these experiences we are searching for a model, which approximates the measured data better and which is a kind of generalization of the linear ($k \cdot x$) model, but deals with a non-constant stiffness.

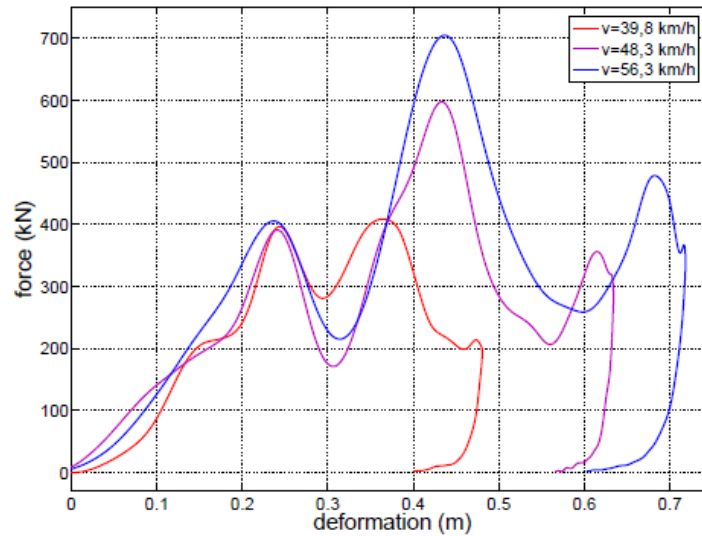


Fig. 3. Force-deflection curves for the same type of vehicles at different impact velocities

LPV Type Force Model

The results of crash tests show difficult force and displacement behaviors. From this, it is obvious that the stiffness parameter of a vehicle (or a part of the vehicle) is not a constant value, but depends on several variables. From practical point of view we search for a model, where the stiffness depends on the measure of deformation (x) and on the impact velocity of the vehicle (v).

The Structure of the Model

Based on the fact mentioned above, we assume the force can be approximated well by a nonlinear form, which is a generalization of the linear spring model:

$$F = k(x, v)x. \quad (1)$$

Or, in differential equation form:

$$m\ddot{x} = k(x, v)x. \quad (2)$$

From this, with $k' = k(x, v)/m$, $x_1 = x$ and $x_2 = \dot{x}_1$ we obtain the following matrix form:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

This is a parameter varying matrix and our main assumption is that the behavior of original system (force and displacement) can be described quite well using this kind of nonlinearity. In general state-space model form

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)) \\ y(t) &= c(x(t))\end{aligned}\quad (4)$$

where

$$\begin{aligned}f(x(t)) &= \begin{pmatrix} x_2(t) \\ k(x_1(t), v) \end{pmatrix} \\ c(x(t)) &= (x_1(t) \ 0)\end{aligned}\quad (5)$$

With the usual notation of LPV models:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = S(p(t)) \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix}.\quad (6)$$

The system matrix $S(p(t))$:

$$S(p(t)) = \begin{pmatrix} A(p(t)) & B(p(t)) \\ C(p(t)) & D(p(t)) \end{pmatrix}.\quad (7)$$

where $p(t) = (x_1(t), v)$ and

$$\begin{aligned}A &= \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \\ C &= (1 \ 0), \quad D = (0).\end{aligned}\quad (8)$$

Identification of Parameter k'

The next task is to determine the function k' . The approach is similar to the methods introduced in [13] and [14]. Firstly the functional dependence of k' on the variables x (depth of deformation) and v (impact speed) must be specified, for example piecewise linear, polynomial, spline or other linear combinations of given functions of x and v .

The model identification includes two major steps: identification of the local models (LTI models) with the same structure of the LPV model and on the base of these models identification of the final LPV model.

Identification of the Local Models

For local model identification we need some data from well-measured crash tests: depth of deformation vs. time, force (at sensors) vs. time. From this data set for a certain deformation x a linear spring model can be identified. Certainly, for other x another model is valid. The stiffness k' depends on x , x depends on time (t), so we handle k' as a function of t , which is determined by the measured $F(t)$ and $x(t)$. In this way, for a certain impact speed a set of simple linear models is determined. After that we have to repeat this measuring and identifying process at other impact speeds, but with the same division on the parameter t . Finally we get a large amount of local models in the space of the impact velocity (v) and the time (t), with the same structure of the searched LPV.

Identification of the Final LPV Model

A set of linear models means a set of certain values of the parameter varying k' at different parameter values. From these points and using our assumption about the type of the functional dependence, the function k' identified.

Reduction of the LPV Model

Because of the large amount of obtained parameter independent models our system may become very complex. In order to reduce the complexity of the system we apply tensor product transformation and higher order singular value decomposition, which were introduced within the mathematical tools. As we will see, for an acceptable approximation of the deformational force and absorbed energy we do not have to keep all of the singular values, but only a few of them.

Application of the Model on Real Crash Test Data

The method described above was executed on real crash tests data taken from NHTSA. There were three different impact velocity, deformation in time and force in time were measured. From these data sets we obtained by interpolation the functions $F(t, v)$ and the $x(t, v)$, which determined the $k(t, v)$ stiffness (see fig. 4, fig. 5 and fig. 6).

HOSVD Based Reduction

The computation was carried out with Matlab TPToolbox. We applied 108 grid lines in the dimension of the time and 34 grid lines in the dimension of the velocity. Computing HOSVD on each dimension we got 10-10 singular values (which are numerically not zero). So the maximal model was given by keeping all of these singular values. Neglecting singular values step by step we can check the approximation capability of the reduced models (see fig. 7, 8 and 9).

Approximation Capability of the Reduced Model in Case of Deformation Force

As we can see, if we keep three singular values the reduced model produces practically the measured data. If we keep less singular values the approximation becomes worse, but the main features of the curve appears in these cases also. The approximation is better in case of the medium velocity.

Approximation Capability of the Reduced Model in Case of Absorbed Energy

Before analyzing the results of the reduced models we have to examine the notion of absorbed energy. During the deformation process the kinetic energy of the vehicle turns to deformation energy. It is easy to determine the absorbed energy from the force-deflection curve: the absorbed energy is the area under the curve. As it can be seen from the force-deflection curve, the mechanical deformation has two major part: residual and elastic deformation. From this it is clear that not the whole kinetic energy of the vehicle turns to residual deformation (the area of the 'loop'), but a little part of it became kinetic energy again (the area under the final part of the force curve), while the damaged vehicle pushes back (elastic recovery). For this reason the maximal absorbed energy is not equal to the residual absorbed energy, and this results the 'flag' at the end of the absorbed energy vs. deformation curve.

As in the case of the force, the reduced model with only three singular values is the same as the measured data. But if we keep only two singular values the result is almost the same. So for good approximation of the absorbed energy we need less singular values than for good approximation of the force.

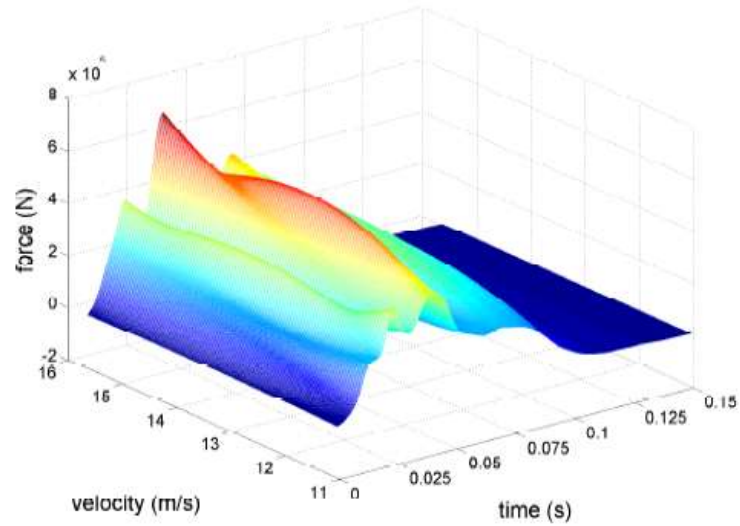


Fig. 4. The interpolated surface of the force vs. impact velocity and time ($F(v, t)$)

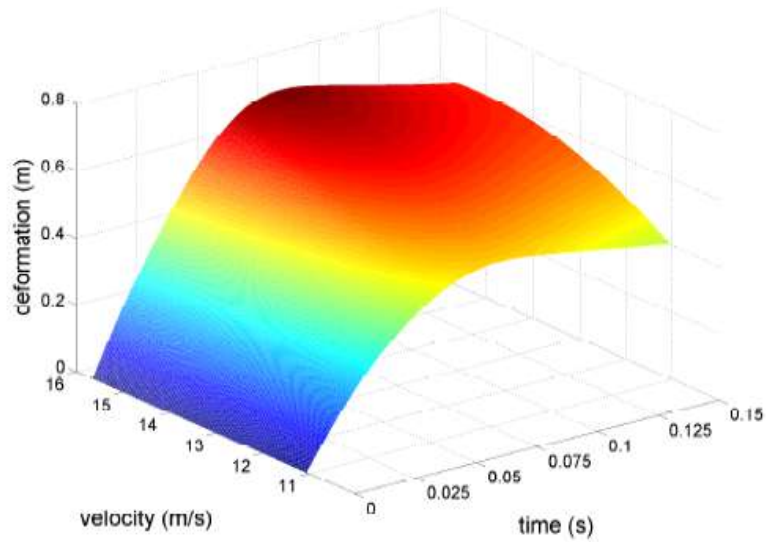


Fig. 5. The interpolated of the deformation vs. impact velocity and time ($x(v, t)$)

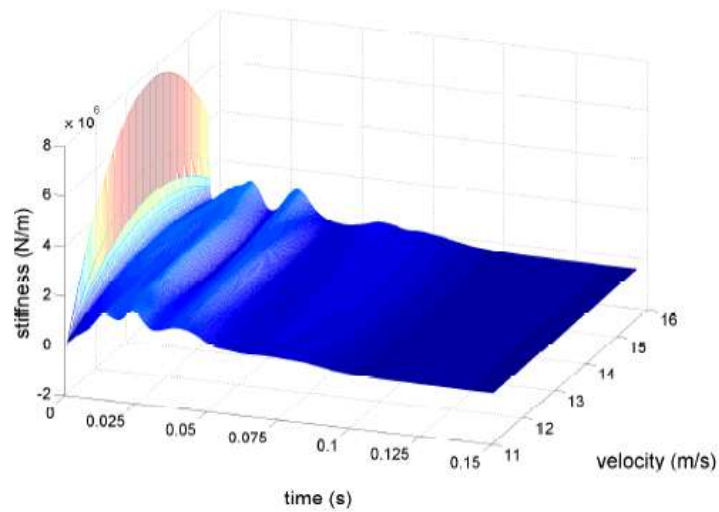


Fig. 6. The surface of the stiffness vs. impact velocity and time, obtained from the force and the deformation surfaces ($k'(v, t)$)

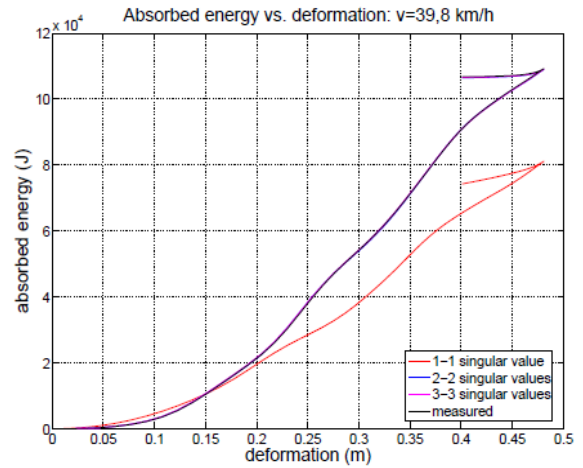
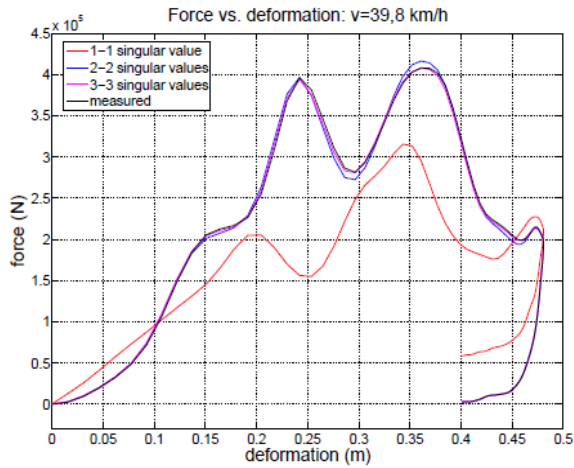


Fig. 7. Comparison of the measured data and the reduced models (impact velocity: 39.8 km/h)

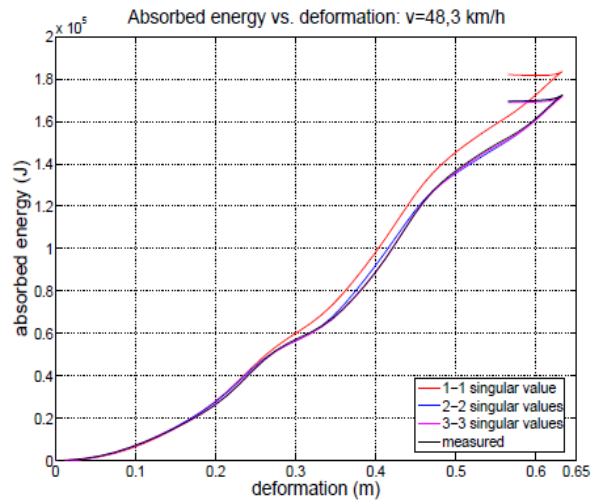
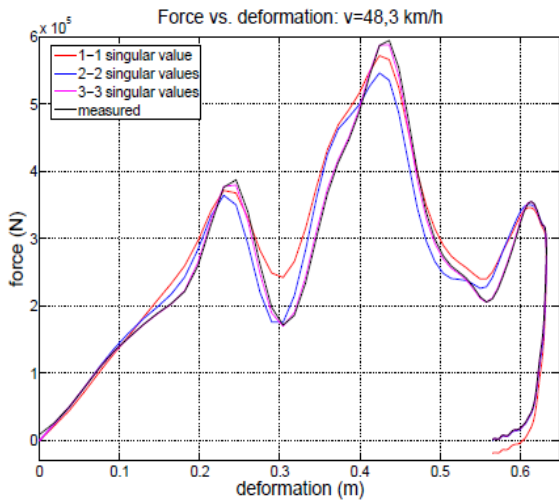


Fig. 3. Comparison of the measured data and the reduced models (impact velocity: 48.3 km/h)

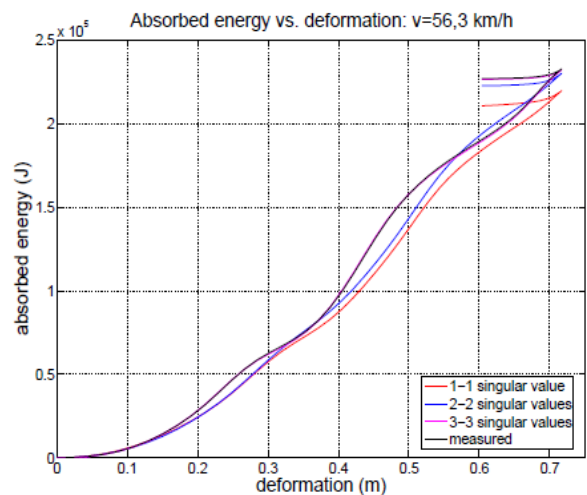
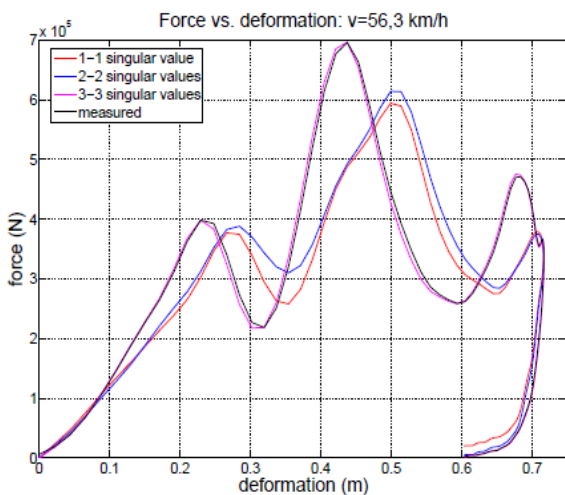


Fig. 9. Comparison of the measured data and the reduced models (impact velocity: 56.3 km/h)

Conclusion

Applying the LPV-HOSVD paradigm we introduced a method based on real crash test data for modeling the force and the absorbed energy during the vehicle deformational process. This model based on the natural fact that the stiffness of a vehicle depends on the depth of deformation and on the impact velocity. The applied concept of the stiffness is more complex than the stiffness notions used in the field of vehicle crash mechanics and accident analysis, but the model gives more better approximation, and with the HOSVD based reduction the complexity of the model can be reduced significantly, while the approximation capability remains satisfactory.

Acknowledgements: The research was sponsored by OTKA CNK 78168 project and Szechenyi Istvan University. A. Rovid was supported by the Janos Bolyai Research Scholarship of the Hungarian Academy of Sciences.

References

1. **Brach, R.M.** Vehicle accident analysis and reconstruction methods / R.M. Brach. – SAE International, 2005.
2. **Steffan, H.** Accident reconstruction methods // *Vehicle System Dynamics*. Vol. 47. 2009. No. 8. Pp. 1049–1073.
3. **Huang, M.** Vehicle Crash Mechanics / M. Huang. – CRC, 2002.
4. **Blumhardt, R.** FEM-crash simulation and optimization // *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 26. 2001. No. 4. Pp. 331–347.
5. **Wagstrom, L.** Structural adaptivity in frontal collisions: implications on crash pulse characteristics / L. Wagstrom, R. Thomson, B. Pipkorn // *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 10. 2005. No. 4. Pp. 371–378.
6. **Kirkpatrick, S.W.** Development and validation of high fidelity vehicle crash simulation models / S.W. Kirkpatrick, J.W. Simons, J.W., T.H. Antoun // *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 4. 1999. No. 4. Pp. 395–406.
7. **Teixeira-Dias, F.** Impact behaviour of aluminum foam and cork in energy absorption systems / F. Teixeira-Dias [et al.] // in Proc. of the WSEAS Int. Conf. on Applied and Theoretical Mechanics, Venice, Italy, November 22–24, 2006. Pp. 148–153.
8. **Mooi, H.G.** Simple and effective lumped mass models for determining kinetics and dynamics of car-to-car crashes / H.G. Mooi, J. Huibers // *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 5. 2000. No. 1. Pp. 7–24.
9. **Moumni, Z.** Simplified modelling of vehicle frontal crashworthiness using a modal approach / Z. Moumni, F. Axisa // *International Journal of Crashworthiness*. Vol. 9. 2004. No. 3. Pp. 285–297.
10. **Vazquez-Alvarez, J. J.** Vehicle mathematical model reduction considering the brake system dynamics / J. J. Vazquez-Alvarez [et al.] // *WSEAS Transactions on Systems*, Vol. 9. 2010. No. 2. Pp. 156–166.
11. **Zhou, J.** Collision model for vehicle motion prediction after light impact / J. Zhou, H. Peng, J. Lu // *Vehicle System Dynamics*, Vol. 46, 2008. Pp. 3–15.
12. **D. Cichos, D. de Vogel, M. Otto, O. Schaar, S. Zolsch,** Crash Analysis Criteria Description / D. Cichos [et al.] // *Workgroup Data Processing Vehicle Safety*, 2006.
13. **Belforte, G.** LPV approximation of distributed parameter systems in environmental modelling / G. Belforte, F. Dabbene, P. Gay // *Environmental Modelling and Software* 2005. № 20(8). Pp. 1063–1070.
14. **Coca, D.** Identification of finite dimensional models of infinite dimensional dynamical systems / D. Coca, S.A. Billings // *Automatica*, 2002. № 38(11). Pp. 1851–1865.

УДК 629.113

И. Хармати¹, А. Ровид², П. Варлаки³**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ПОДБОРА ЛИНЕЙНЫХ ПЕРЕМЕННЫХ
ДЛЯ РАСЧЕТНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ
ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ**

(РЕФЕРАТ НА РУССКОМ ЯЗЫКЕ)

Университет Иштвана Сечени¹,
Обудский университет (Венгрия)²,
Будапештский университет технологий и экономики (Венгрия)³

При анализе дорожно-транспортных происшествий особое внимание уделяется механике деформирования несущих систем транспортных средств, при этом важную роль играют методы моделирования аварийных ситуаций, позволяющие получить графики изменения разрушающей нагрузки и поглощаемой кинетической энергии удара. Применение подходов, основанных на методе конечных элементов, позволяет, как правило, с высокой степенью точности смоделировать процесс аварийного нагружения, тем не менее, требует большого массива информации как об условиях ударного столкновения, так и о конструкции исследуемых транспортных средств. Параллельно с этим существуют более упрощенные методы, но они не позволяют получить достоверных результатов. В данной статье рассматривается использование метода подбора линейных переменных (*LPV-HOSVD*) для решения задач по исследованию дорожно-транспортных происшествий, характеризуемого хорошей точностью получаемых результатов, а также малыми вычислительными затратами.

Ключевые слова: дорожно-транспортное происшествие, модель изменения разрушающей нагрузки, модель линейных переменных (*LPV*), тензорное преобразование произведения, разложение по сингулярным числам матрицы высшего порядка (*HOSVD*).

Одной из наиболее важных задач автозаводов является производство автомобилей, обладающих высоким уровнем активной и пассивной безопасности. При этом в области механики дорожно-транспортных происшествий (ДТП), анализе и реконструкции аварийных ситуаций, наиболее важным оцениваемым параметром является характер изменения поглощаемой энергии удара, дающий полное представление о процессе ударного нагружения. Известно, что выполнение исследований по данному направлению требует насыщенной базы данных, содержащей результаты натуральных испытаний, а также результаты компьютерного моделирования аварийных ситуаций, на основе которых возможна разработка моделей транспортных средств, необходимых для оценки безопасности и прочности. В то же время очевидно, что для инженерной практики наиболее ценным является использование максимально простых моделей, позволяющих с достаточной степенью точности описать характер изменения разрушающей нагрузки и кинетической энергии, но не требующих большого массива данных о конструктивных параметрах транспортного средства [1–3].

Существует большое разнообразие инструментов, разработанных для реконструкции и анализа аварийных ситуаций, тем не менее, для детального воссоздания условий быстропротекающих процессов, они требуют ввода достаточно точных данных. Наиболее распространенным способом моделирования существенно нелинейных процессов (не только в области анализа ДТП) является использование метода конечных элементов (МКЭ) [4–7]. Такой подход дает полное описание всего процесса деформации исследуемой конструкции, но требует детального и достаточно точного знания параметров геометрии автомобиля, свойств материалов (которые в общем случае неизвестны), при этом расчеты с помощью МКЭ требуют существенных вычислительных ресурсов и обстоятельств, а также о свойствах материала транспортного средства (которые не известны точно), и, как следствие, огромного количества свободы, компьютерного моделирования требует очень больших вычислительных мощностей.

В связи с этими, более рациональным является подход, не требующий подробной информации о процессе столкновения, но позволяющий получить адекватные значения наиболее важных параметров, характеризующих исследуемый процесс (например, характер изменения разрушающей нагрузки и поглощенной энергии удара). В этом случае становится возможным использование более простых моделей [1], [3], [8], [9–11].

В статье приводится модель, описывающая процесс деформирования конструкции транспортного средства, которая позволяет получить относительно точные значения разрушающей нагрузки и поглощаемой энергии в зависимости от времени удара. Результаты, полученные с использованием созданной модели, хорошо согласуются с данными ранее проведенных расчетно-экспериментальных исследований, при этом работа с моделью не требует существенных вычислительных и временных затрат.

Авторы отмечают, что наиболее распространенным испытанием при оценке пассивной безопасности транспортных средств является тест, при котором автомобиль соударяется с неподвижным деформируемым препятствием, оснащенным датчиками усилий. Во время испытаний, датчики установленные на автомобиле измеряют ускорения, а датчики барьера разрушающую нагрузку.

В статье использовались данные испытаний, полученные Национальной администрацией безопасности дорожного движения США (*NHTSA*). Данные экспериментальных исследований были сглажены с помощью *CFC60* фильтра (рис. 1). Значения деформаций были получены двойным интегрированием кривых ускорений, таким образом была возможность построить графики изменения нагрузки от времени и деформаций несущей конструкции от времени (рис. 2).

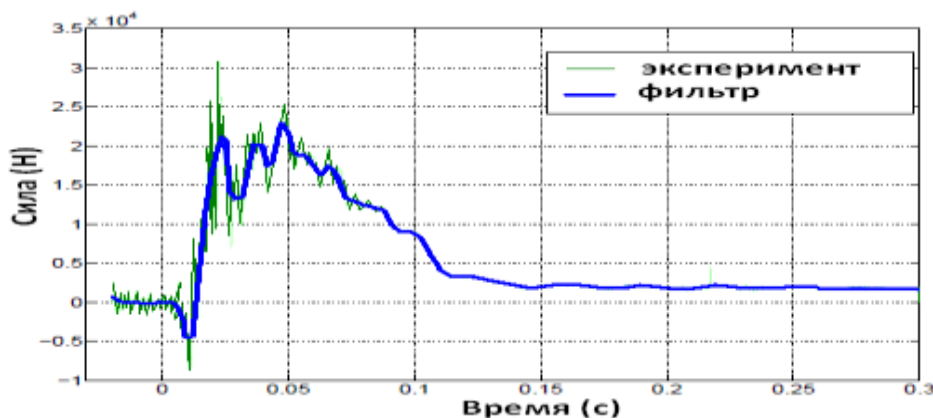


Рис. 1. Графики изменения силы от времени (полученные при эксперименте и обработанные с помощью *CFC60* фильтра)

Анализ графиков показывает, что начальный участок кривых может быть аппроксимирован линейной зависимостью, однако следующие области локального максимума и минимума кривой нагрузки требуют применения нелинейных зависимостей. Следует также обратить внимание на форму кривых в конечный момент времени, характеризующую одновременным уменьшением нагрузки и деформаций, что объясняется наличием эффекта упругого восстановления конструкции (рис. 3).

Указанные особенности были учтены при разработке новой математической модели, описывающей процесс фронтального столкновения автомобиля с препятствием, учитывающей как линейные так и нелинейные законы изменения жесткости конструкции при аварийном нагружении.

Учитывая тот факт, что характер поведения конструкции зависит от многих параметров, для упрощения модели были учтены только наиболее важные особенности, деформирования несущих систем автомобилей: жесткостные свойства определяют деформациями конструкции (x), которые во многом зависят от скорости столкновения (v).

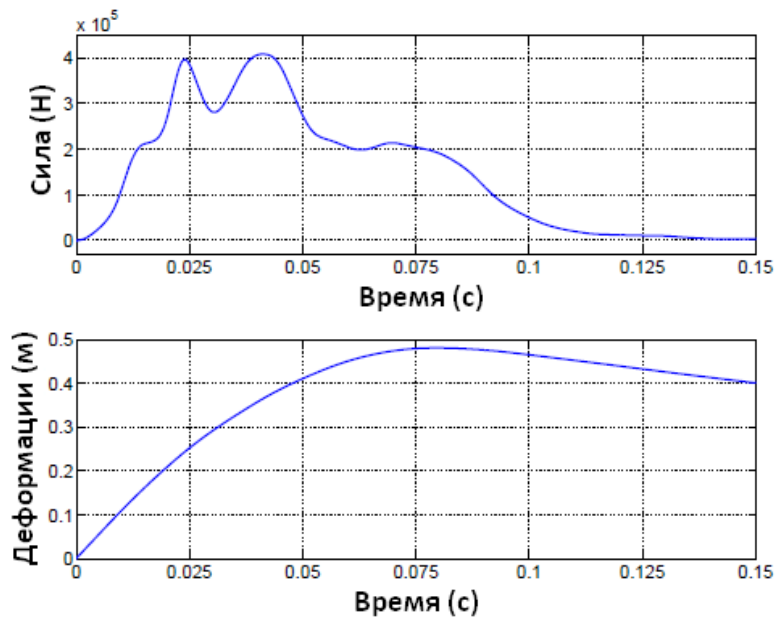


Рис. 2. Обработанные экспериментальные кривые изменения силы и деформаций в зависимости от времени

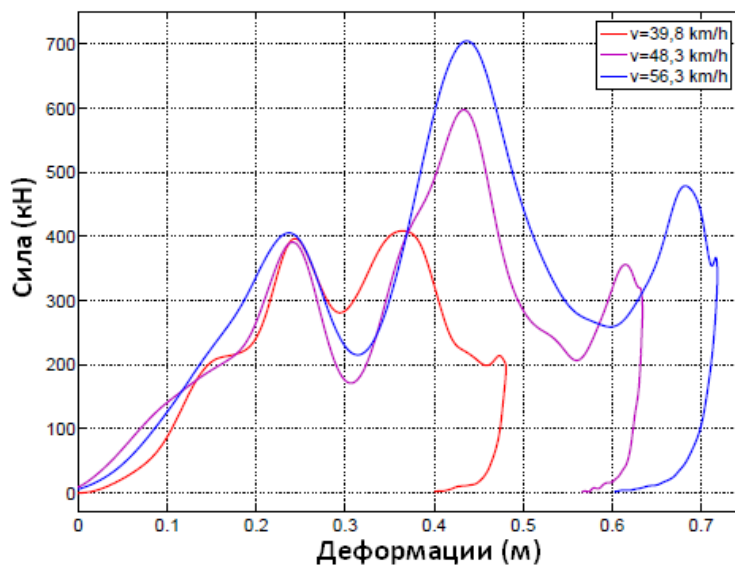


Рис. 3. Графики изменения нагрузки в зависимости от деформаций для одного и того же типа транспортного средства при разных скоростях столкновений

На основе изложенного за основу была принята следующая математическая зависимость, описывающая зависимость силы F от деформаций x , а также жесткости k , являющейся функцией x и скорости удара v :

$$F = k(x, v)x. \tag{1}$$

В дифференциальной форме справедливо следующее:

$$m\ddot{x} = k(x, v)x. \tag{2}$$

С учетом того, что $k' = k(x, v)/m$, $x_1 = x$ and $x_2 = \dot{x}_1$ можно определить следующую матрицу:

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \end{pmatrix}. \tag{3}$$

Для общей модели в пространстве состояний справедливо

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= f(x(t)), \\ y(t) &= c(x(t)),\end{aligned}\quad (4)$$

где

$$\begin{aligned}f(x(t)) &= \begin{pmatrix} x_2(t) \\ k(x_1(t), v) \end{pmatrix} \\ c(x(t)) &= (x_1(t) \quad 0).\end{aligned}\quad (5)$$

С учетом специфики метода подбора линейных переменных (*LPV*), можно записать

$$\begin{pmatrix} \dot{x}(t) \\ y(t) \end{pmatrix} = S(p(t)) \begin{pmatrix} x(t) \\ u(t) \end{pmatrix}.\quad (6)$$

При этом матрица $S(p(t))$ записывается следующим образом

$$S(p(t)) = \begin{pmatrix} A(p(t)) & B(p(t)) \\ C(p(t)) & D(p(t)) \end{pmatrix},\quad (7)$$

где $p(t) = (x_1(t), v)$, а коэффициенты определяются следующими матрицами:

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ k' & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix},\quad (8)$$

$$C = (1 \quad 0), \quad D = (0).$$

Важным является поиск функции k' , методы определения которой описаны в работах [13] и [14]. Прежде всего определяется функциональная зависимость k' от переменной x (деформации) и v (скорость соударения).

Для отладки модели используются экспериментальные кривые (деформации-время $x(t)$ и сила-время $F(t)$), так как жесткость k' – от x , а x зависит от времени t , то k' является функцией времени t , которое может быть вычислено из кривых $F(t)$ и $x(t)$. При этом сопоставление модели с данными экспериментальных исследований проводится по числовым параметрам, полученным при различных скоростях столкновений.

Таким образом, получается набор частных моделей, хорошо описывающих конкретные условия аварийного нагружения. Анализ моделей позволяет определить функцию k' , наилучшим образом подходящую для всех рассматриваемых случаев.

На основе имеющейся базы экспериментальных данных были определены функции $F(t, v)$ и $x(t, v)$, которые позволили определить функцию $k(t, v)$ (рис. 4 – рис. 6).

Вычисления были выполнены с использованием пакета *Matlab TPTtoolbox*. С учетом разложения по сингулярным числам матрицы высшего порядка (*HOSVD*) был получен необходимый массив числовых значений (отличных от нуля).

На рис. 7– рис. 9 показаны графики экспериментальных кривых и кривых, полученных с использованием разработанной модели. Как видно из графиков, наилучшее сходжение результатов наблюдается на средних скоростях столкновения.

Очевидно, что в условиях аварийного нагружения кинетическая энергия удара переходит в энергию деформаций, при этом поглощаемая энергия представляет собой площадь под графиком сила-деформации $F(x)$.

Тем не менее, следует отметить что в процессе нагружения наблюдаются как остаточные так и упругие деформации. Этот факт необходимо учитывать при расчете энергоемкости кузовных конструкций.

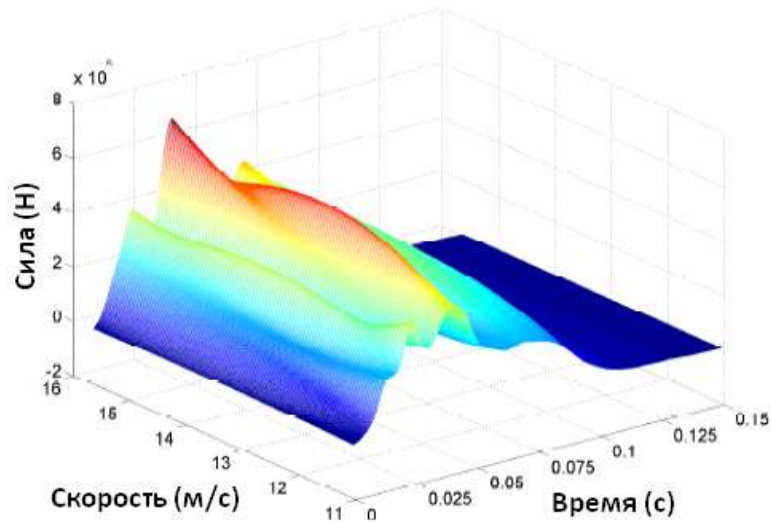


Рис. 4. Интерполированная поверхность зависимости силы от скорости и времени удара ($F(v, t)$)

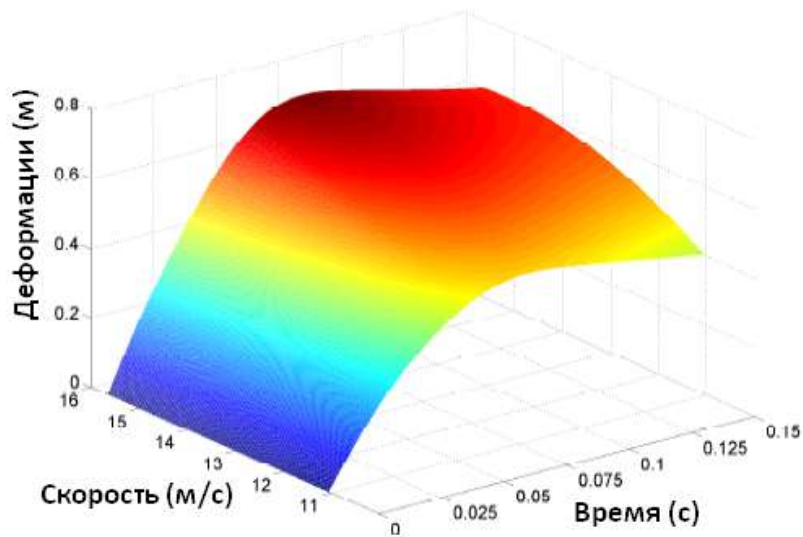


Рис. 5. Интерполированная поверхность зависимости деформации от скорости и времени удара ($x(v, t)$)

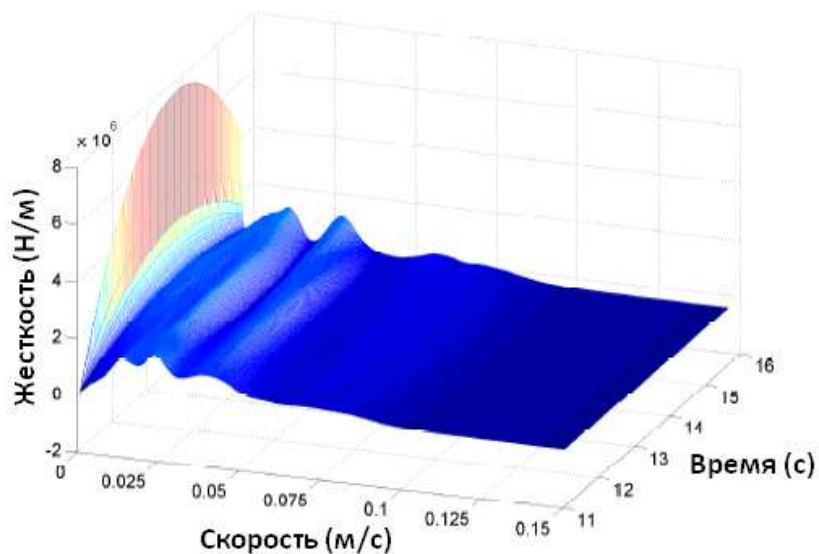


Рис. 6. Интерполированная поверхность зависимости жесткости от скорости и времени удара ($k'(v, t)$)

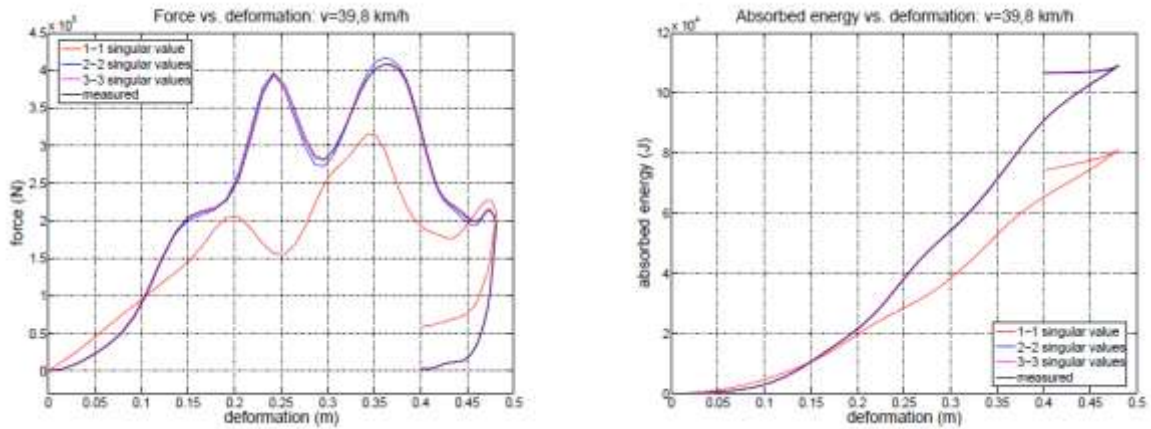


Рис. 7. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 39.8 км/ч)

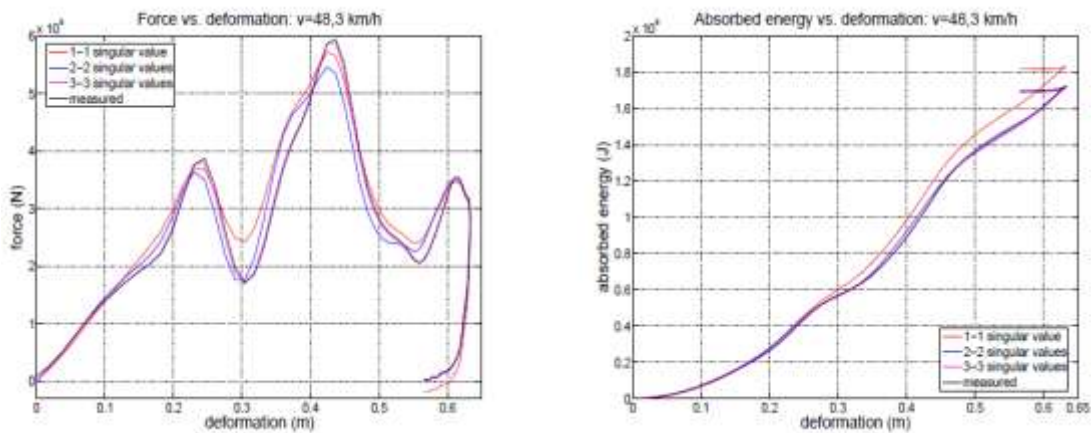


Рис. 8. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 48.3 км/ч)

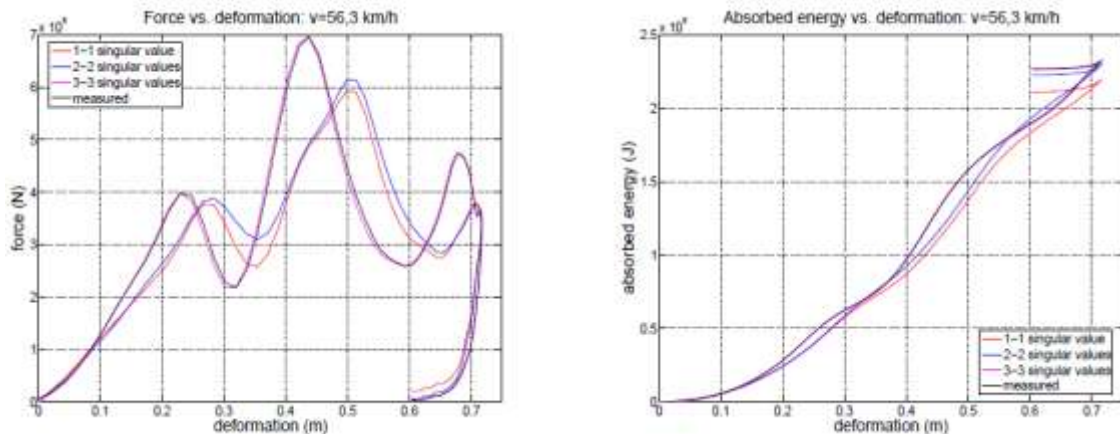


Рис. 9. Сравнение результатов расчетов с данными эксперимента (скорость удара 56.3 км/ч)

Таким образом, предложен новый метод расчетного исследования пассивной безопасности транспортных средств, основанный на использовании данных экспериментальных исследований и алгоритма подбора линейных переменных, не требующего существенных вычислительных и временных затрат и позволяющего получить удовлетворительную сходимость результатов.

Дата поступления
В редакцию 02.11.2011

УДК 629:113

С.М. Огороднов, С.Г. Синичкин

**ЭФФЕКТИВНОСТЬ ТОРМОЗНОГО УПРАВЛЕНИЯ
С МАГНИТОСТРИКЦИОННЫМ ПРИВОДОМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены конструктивные особенности известных приводов тормозов транспортных средств. Предложено использование магнитоотрицательных приводов тормозов. Отмечено преимущество магнитоотрицательного привода по сравнению с известными типами, в том числе хорошая совместимость с микропроцессорными системами автоматического управления. Расчетными методами определена эффективность торможения транспортных средств с гидравлическим и магнитоотрицательным приводами.

Ключевые слова: транспортное средство, тормозное управление, магнитоотрицательный привод, эффективность торможения.

В условиях постоянного увеличения парка автомобилей и возрастания интенсивности транспортных потоков задачи повышения безопасности движения становятся первоочередными при разработке конструкции транспортных средств. Одной из наиболее значимых проблем активной безопасности, влияющей на тяжесть последствий дорожно-транспортных происшествий, является повышение эффективности тормозного управления. До настоящего времени эффективность рабочей тормозной системы обеспечивалась совершенствованием конструкций тормозных механизмов и приводов. Известны механические, гидравлические, пневматические, электрические и гибридные (комбинированные) приводы [1], имеющие свои особенности, достоинства и недостатки.

В тормозных системах транспортных и транспортно-технологических машин привод состоит из задатчика, формирующего управляющий, а в некоторых случаях и силовой сигналы, передающих и исполнительных устройств, в которых управляющий сигнал преобразуется в силовое воздействие с помощью рабочего тела (жидкость или сжатый воздух). Исполнительный элемент соединен с фрикционными элементами, перемещающимися относительно подвижной части тормозного механизма, движение которой необходимо замедлить. В приводах, за исключением электрических, используется рабочее тело (жидкость или воздух), обеспечивающее передачу энергии к тормозам.

Тормозные приводы современных автомобилей, кроме функциональных элементов, выполняющих управляющие и исполнительные функции, содержат усилители, регуляторы, корректирующие устройства, повышающие быстродействие и другие устройства, усложняющие конструкцию. В тормозных приводах, работающих на сжатом воздухе, дополнительно используются системы подготовки воздуха, работающие за счет энергии двигателя. Рабочее тело может теряться из привода вследствие неисправности его конструктивных элементов, поэтому тормозные приводы транспортных средств многократно дублируются.

Указанные конструктивные особенности приводов определяют недостатки тормозных систем: необходимость разделения цепей управления, обратных связей и силовых, организации сложного взаимодействия структурных элементов цепей, преобразования параметров различной физической природы, существенное усложнение конструктивной схемы тормозной системы, снижение надежности, значительные габаритные размеры и массы конструктивных элементов, высокую стоимость в производстве и эксплуатации. Комбинированные электрогидравлические и электропневматические приводы существенно не изменяют структурную схему привода и характера недостатков, но позволяют разместить приборы и оборудование тормозного привода вблизи тормозного механизма, обеспечивая повышение быстродействия тормозов.

Тормозная система с магнитострикционным приводом существенно отличается от известных типов систем тормозного управления.

Магнитострикционный эффект заключается в изменении линейных размеров или закручивании образца из магнитострикционного материала при его намагничивании. В качестве магнитострикционных материалов используют ферромагнетики, редкоземельные и интерметаллические материалы, обладающие большим магнитострикционным эффектом. При намагничивании магнитострикционных материалов возникает магнитное взаимодействие электронов, в результате приводящее к изменению межатомного расстояния и деформации кристаллической решетки. Намагничивание возможно за счет размещения магнитострикционных материалов в магнитном поле, создаваемом током, протекающим по обмотке индукционной катушки. Это свойство магнитострикционных материалов позволяет использовать их в качестве активных преобразователей различных типов.

Магнитострикционные преобразователи используют в системах компенсации колебаний и демпфирующих устройствах различных конструкций, для активных клапанов, в нажимных устройствах прокатных станков, излучателях акустических волн, измерителях перемещения, вибраторах и других технических устройствах. Использование магнитострикционных преобразователей в тормозных системах ТС позволяет осуществить управление тормозами с помощью электрических сигналов и автоматизировать этот процесс, интегрировать процессор тормозной системы с устройствами автоматического управления рабочими процессами систем и агрегатов, упростить структурную схему привода, уменьшить время срабатывания тормозной системы.

Тормозное управление с магнитострикционным преобразователем (рис. 1) содержит задатчик 1 тормозного усилия (педаль), преобразователь 2 тормозного усилия в электрический сигнал, средства передачи сигнала 3, усилитель мощности 4, один из выходов которого подключен к источнику электроэнергии, другой к преобразователю 2. Исполнительный механизм 6 содержит электромагнитные катушки 7 с сердечниками 8 из магнитострикционного материала, воздействующими на колодки 9 и тормозной диск 10. Для увеличения перемещения и регулирования силового передаточного числа возможно использование дополнительных преобразователей механического или гидравлического типов.

Технический результат использования тормозов с магнитострикционным приводом заключается в повышении надежности и увеличении быстродействия тормозной системы, повышении точности регулирования силы исполнительного устройства и тормозного момента, уменьшении количества устройств, приборов, агрегатов, механизмов, реализации простых способов взаимодействия с конструктивными элементами автоматических систем активной безопасности, снижении габаритов, массы элементов и стоимости тормозной системы.

Существенным недостатком известных типов приводов, влияющим на эффективность торможения ТС, является их конструктивная особенность, отображаемая тормозной диаграммой [2]. Тормозная диаграмма отображает последовательность процессов при торможении, зависимость замедления и скорости движения автомобиля от времени. Начало координат, соответствует моменту времени, начиная с которого водитель принимает решение о необходимости торможения (рис. 2).

Первый период процесса определяется временем реакции водителя $\tau_{рв}$, в среднем равного $\tau_{рв} = 0,8$ с. Эта часть тормозной диаграммы не отражает конструктивных и эксплуатационных особенностей привода и может не рассматриваться при исследовании особенностей работы тормозных систем различных типов.

Второй период процесса торможения начинается с момента подачи водителем управляющего воздействия и называется *временем запаздывания*. В течение этого времени перемещаются части привода тормозного управления, устраняются зазоры, имеющиеся в исходном состоянии, происходит нарастание давления рабочего тела в трубопроводах, управляющих и исполнительных устройствах до значений, необходимых для преодоления сил трения и упругих сил пружин, а также происходит перемещение колодок до соприкосновения с

вращающимися частями тормозных механизмов. Время запаздывания τ_c существенно зависит от конструкции тормозного управления, типа привода и тормозного механизма и от технического состояния тормозной системы. При расчетах тормозных систем рекомендуют принимать следующие значения времени запаздывания:

- для гидравлического привода с дисковыми тормозными механизмами $\tau_c = 0,05 - 0,07$ с;
- с барабанными тормозными механизмами $\tau_c = 0,1 - 0,2$ с;
- для пневматического привода с барабанными тормозными механизмами одиночных автомобилей $\tau_c = 0,2 - 0,4$ с;
- для автопоездов $\tau_c = 0,4 - 0,6$ с [3].

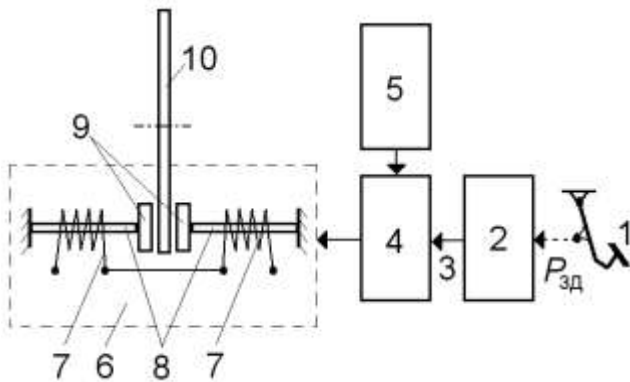


Рис. 1. Тормозное управление с магнитоэлектрическим преобразователем

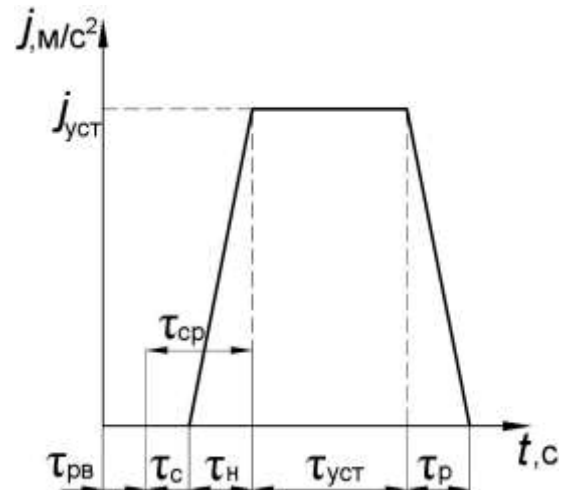


Рис. 2. Тормозная диаграмма ТС по ГОСТ Р 51709-2001

Третий период процесса торможения начинается с момента действия тормозной силы и называется *временем нарастания замедления*. Время нарастания замедления в основном определяется интенсивностью увеличения управляющего воздействия водителя и временем нарастания давления в исполнительных механизмах тормозной системы, зависящим от сопротивлений перетеканию рабочего тела и рабочих объемов аппаратов и устройств. При расчетах тормозных систем рекомендуют принимать следующие значения времени нарастания замедления τ_n :

- для гидравлического привода легковых автомобилей $\tau_n = 0,05 - 0,2$ с;
- грузовых автомобилей $\tau_n = 0,05 - 0,4$ с;
- для пневматического привода грузовых автомобилей $\tau_n = 0,15 - 1,5$ с;
- автобусов $\tau_n = 0,2 - 1,3$ с.

Сумма периодов запаздывания и нарастания замедления называется *временем срабатывания тормозной системы* $\tau_{ср} = \tau_c + \tau_n$. Время срабатывания является нормируемым показателем тормозной эффективности. В соответствии с [2], время срабатывания тормозной системы не должно быть более 0,6 с для ТС категории M_1 и 0,8 с – для ТС категорий M_2, M_3, N_1, N_2, N_3 . Четвертый период процесса торможения характеризуется движением с примерно постоянным замедлением и называется *временем торможения* $\tau_{уст}$ с установившимся замедлением $j_{уст}$. При достижении автомобилем необходимой скорости водитель отпускает тормозную педаль, разжимные силы, действующие на колодки тормозного механизма, уменьшаются, и тормозные силы прекращают действовать при появлении зазора между фрикционными элементами. Этот период называется *временем растормаживания* τ_r .

Тормозная диаграмма автомобиля с магнитоэлектрическим приводом отличается от рассмотренной тем, что практически отсутствуют периоды запаздывания τ_c и нарастания замедления τ_n (рис. 3). Время запаздывания (рис. 1) торможения автомобиля с магнитоэлектрическим

ционному приводом практически равно нулю, $\tau_c^M = 0$, так как привод имеет электронное управление, в исходном состоянии отсутствуют зазоры, а перемещение колодок и нарастание разжимной силы в тормозе обеспечиваются с помощью специализированного процессора управления.

Время нарастания замедления для автомобиля с магнитоэлектрическим приводом не зависит от переходных процессов, присущих приводам традиционных конструкций, а в режиме экстренного торможения для этого периода можно не учитывать временную составляющую, определяемую интенсивностью увеличения управляющего воздействия водителя, поэтому можно считать $\tau_n = 0$.

Для анализа эффективности торможения ТС с гидравлическим и магнитоэлектрическим приводами необходимо установить показатели эффективности в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Правила в отношении торможения установлены единообразными предписаниями, касающимися официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O ГОСТ Р 41.13-99 и ГОСТ Р 41.13-Н-99. Эффективность, предписанная для тормозных систем, должна основываться на измерении тормозного пути, отнесенного к начальной скорости ТС, и/или среднего значения предельного замедления. Указанными документами тормозной путь определяется как расстояние, пройденное ТС с момента, когда водитель начинает действовать на управление тормозной системы, до остановки ТС. Начальная скорость определяется в момент, когда водитель начинает воздействовать на управление тормозной системы. Среднее значение предельного замедления в соответствии с [1] рассчитывают по формуле

$$d_m = \frac{v_b^2 - v_e^2}{25,92(s_e - s_b)}, \quad (1)$$

где d_m – среднее значение предельного замедления; v_b, v_e – скорости ТС при $0,8v_o$ и $0,1v_o$; v_o – начальная скорость ТС; s_b – расстояние, пройденное при изменении скорости от v_o до v_b ; s_e – расстояние, пройденное при изменении скорости от v_o до v_e .

Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки автотранспортных средств (АТС), эксплуатируемых на дорогах установлены ГОСТ Р 51709-2001. Стандарт применяется при проверках технического состояния эксплуатируемых АТС по критериям безопасности. В частности, требования к рабочей тормозной системе определяются показателями эффективности и устойчивости АТС при торможении. В качестве показателей эффективности при стендовых испытаниях указанный нормативный документ устанавливает удельную тормозную силу или блокирование колес АТС на роликах стенда при ограничении максимальных усилий, действующих на орган управления. Устойчивость АТС определяется относительной разностью тормозных сил колес оси. При проверке в дорожных условиях в качестве показателей эффективности используются величины тормозного пути, установившегося замедления, усилия на органе управления и время срабатывания тормозной системы. Устойчивость при торможении в дорожных условиях оценивается шириной коридора движения АТС без антиблокировочных систем (АБС) и отсутствием следов юза за колесами для транспортных средств с АБС. В соответствии с ГОСТ Р 51709-2001, АТС считают выдержавшими проверку эффективности торможения и устойчивости при торможении рабочей тормозной системой, если рассчитанные значения указанных показателей соответствуют приведенным нормативам удельной тормозной силы, ширины коридора движения и относительной разности тормозных сил колес оси.

Целесообразно выполнить анализ эффективности торможения транспортных средств с различными типами приводов, исключив единообразные факторы. Так как наиболее существенным отличием приводов является тормозная диаграмма, при оценке эффективности торможения не учитываются неравномерность тормозных сил и другие показатели, а в качестве основного критерия принята величина тормозного пути.

При исследовании эффективности торможения считается:

- торможение осуществляется в экстренном режиме с полным использованием сил сцепления;
- торможение осуществляется на горизонтальном прямолинейном участке дороги;
- торможение за время нарастания осуществляется с изменением замедления по линейному закону;
- не учитываются инерционные составляющие тормозного момента, силы сопротивления, действующие при изменении скорости движения, воздуха, сопротивления качению и др.

Уравнение движения автомобиля при торможении в этом случае записывается в виде

$$F_{\tau} = F_j, \quad mg\varphi = jm, \quad (2)$$

где j – замедление ТС $j = \varphi g$; F_{τ}, F_j – суммарная тормозная сила и сила инерции; m – масса ТС; φ – коэффициент сцепления шины с дорогой в продольном направлении.

Путь, пройденный автомобилем за время срабатывания тормозной системы с гидравлическим приводом, определяется формулой

$$s_{cp} = v_0 \tau_{cp} - \frac{j_{уст} \tau_{cp}^2}{16}, \quad (3)$$

где s_{cp} – путь, пройденный автомобилем за время срабатывания тормозной системы; τ_{cp} – время срабатывания тормозной системы; $j_{уст}$ – установившееся замедление.

Путь, пройденный автомобилем с установившимся замедлением, равен

$$s_{уст} = \frac{v_H^2}{2j_{уст}}, \quad v_H = v_0 - \frac{j_{уст} \tau_{cp}}{4}. \quad (4)$$

Полный тормозной путь равен

$$s_T = s_{cp} + s_{уст}, \quad (5)$$

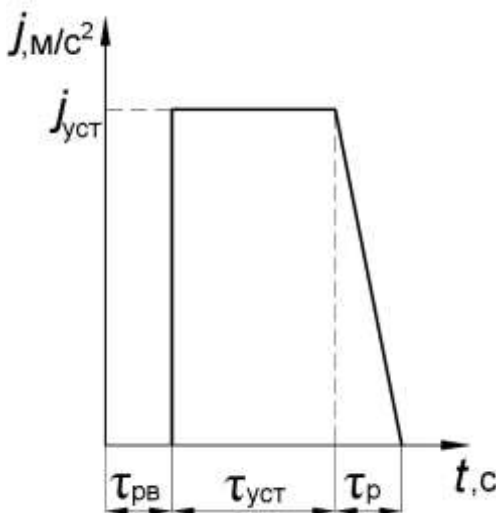


Рис. 3. Тормозная диаграмма ТС с магнотострикционным приводом

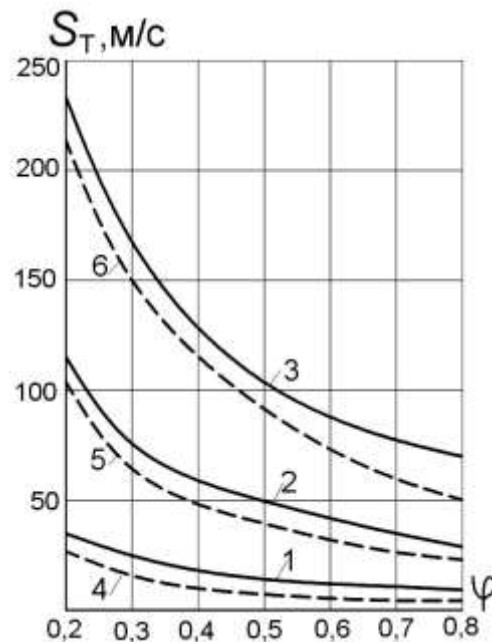


Рис. 4. Тормозной путь ТС с гидравлическим и магнотострикционными приводами:
 1, 2, 3 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 0,6$ с; 4, 5, 6 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 0$

Для автомобиля с магнестрикционным приводом полный тормозной путь равен

$$s_T^M = \frac{v_0^2}{2j_{уст}}. \quad (6)$$

При расчетах тормозного пути автомобиля принято, что коэффициент сцепления шины с опорной поверхностью в продольном направлении φ изменяется в диапазоне $\varphi = 0,2 - 0,8$, а начальная скорость торможения изменяется в диапазоне $v_0 = (10 - 30)$ м/с.

В процессе эксплуатации могут нарушаться регулировки зазоров, попадать воздух в гидравлический привод, автомобиль может эксплуатироваться при давлении в пневматическом приводе, меньше установленного, могут возникать и другие отклонения от нормального технического состояния. Указанные отклонения воспринимаются водителем субъективно и в определенных ситуациях не учитываются как требующие немедленной остановки транспортного средства. В этом случае время запаздывания работы привода может увеличиваться до $\tau_c = 1,5 - 2,0$ с, а время нарастания давления – $\tau_H = 3 - 4$ с [3].

На рис. 4 показаны зависимости тормозного пути, рассчитанные в соответствии с выражениями (2)–(6) при различных начальных скоростях движения и коэффициентах сцепления для гидравлического привода со временем срабатывания $\tau_{cp} = 0,6$ с (кривые 1, 2, 3) и магнестрикционного привода (кривые 4, 5, 6). На рис. 5 показаны зависимости тормозного пути для тех же значений начальных скоростей движения и коэффициентах сцепления при времени срабатывания привода $\tau_{cp} = 2$ с (при отклонениях от оптимальных параметров).

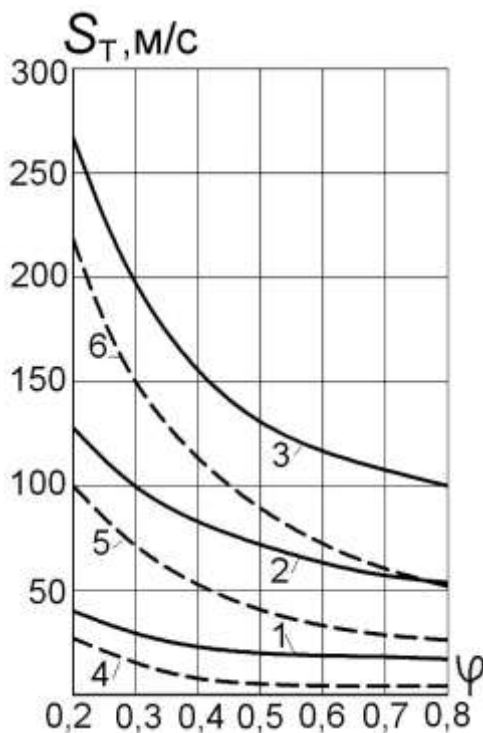


Рис. 5. Тормозной путь ТС с гидравлическим и магнестрикционным приводами: 1, 2, 3 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 2,0$ с; 4, 5, 6 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 0$

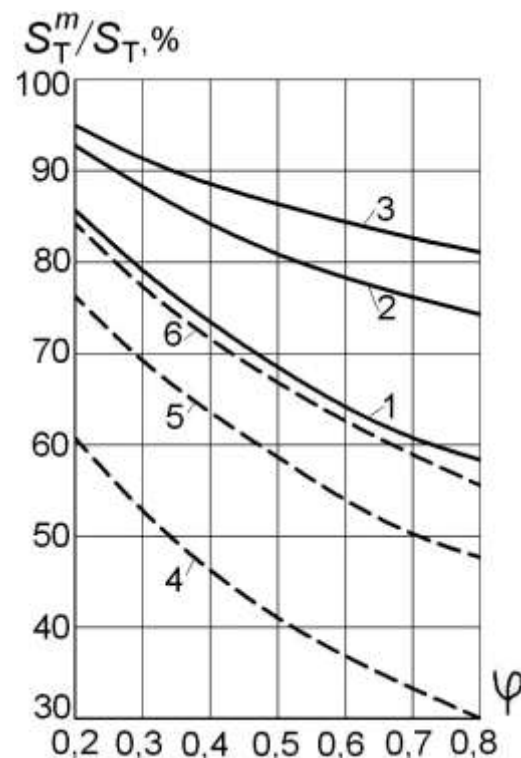


Рис. 6. Сравнительная характеристика тормозного пути ТС с гидравлическим и магнестрикционным приводами: 1, 2, 3 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 0,6$ с; 4, 5, 6 – соответственно для $v_0 = 10, 20, 30$ м/с и $\tau_{cp} = 2,0$

Уменьшение тормозного пути транспортного средства с магнестрикционным приводом определяются относительной величиной s_T^M / s_T , характер изменения которой показан на рис. 6. Проведенные исследования показывают, что тормозной путь ТС, оснащенного магни-

тострикционным приводом тормозов при выбранных начальных параметрах может быть снижен на (8–44)%, а при увеличенном до 2 с времени срабатывании до (23–67)% – в зависимости от величин коэффициентов сцеплений шин колес с опорной поверхностью и начальной скорости торможения.

Существенное уменьшение величины тормозного пути, возможность осуществления электронных способов формирования управляющего и силовых сигналов отдельно для каждого тормоза, интеграции в глобальную систему автоматического управления движением ТС позволяют сделать вывод о целесообразности исследований и разработок в области магнито-стрикционных приводов тормозных систем транспортных и транспортно-технологических машин [5].

Библиографический список

1. ГОСТ Р 41.13-99 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения механических транспортных средств категорий М, N и O в отношении торможения».
2. ГОСТ Р 51709-2001 «Автотранспортные средства. Требования безопасности к техническому состоянию и методы проверки».
3. Кравец, В.Н. Теория автомобиля: учеб. пособие/ В.Н. Кравец. – Н.Новгород: НГТУ, 2007. – 368 с.
4. ГОСТ Р 41.13-Н-99 «Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей в отношении торможения».
5. Система торможения автомобиля. Патент на изобретение №2010108544 от 26.03.2010 г.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2011*

S.M. Ogorodnov, S.G. Sinichkin

THE EFFICIENCY OF BRAKING SISTEM WITH MAGNETOSTRICTIVE ACTUATOR

The paper describes the design philosophy of braking system actuators that are currently in use. The using of magnetostrictive actuators is proposed. The advantages of magnetostrictive actuators in comparison with other types of actuators are shown, including good compatibility with automatically micro integrated systems. By means of rated methods vehicles braking system efficiency was calculated for hydraulic and magnetostrictive types actuators.

Key words: vehicle, braking system, magnetostrictive actuators, braking efficiency.

УДК 629.113

Ю.В. Шапкина, Н.А. Кузьмин, В.А. Шапкин

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПРОСА НА УСЛУГИ СТАНЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ АВТОМОБИЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлена методика прогнозирования спроса на услуги станции технического обслуживания автомобилей. Разработанная математическая модель позволяет произвести прогнозирование спроса на услуги автосервисного предприятия по таким его показателям, как среднесуточное количество обращений и средняя трудоемкость одного обращения. На основании полученных данных возможны оценка деятельности предприятия, разработка методик повышения эффективного его функционирования.

Ключевые слова: станция технического обслуживания автомобилей, автосервисные услуги, прогнозирование спроса, среднесуточное количество обращений, суточная трудоемкость работ.

Существенное увеличение численности парка автомобилей в России (в значительной степени – доли автомобилей иностранного производства) обостряет конкуренцию на рынке предоставления автосервисных услуг. В настоящее время большинство существующих предприятий автосервиса страны не готово к работе в условиях возросшей конкуренции и недостатка информации о собственной клиентуре, ее реальных потребностях. Требуется совершенствование методов управления данными предприятиями на основе изучения и прогнозирования адекватного спроса на свои услуги.

Изучение и прогнозирование спроса дают возможность наиболее полноценного развития предприятия в современных рыночных условиях. Полученные данные могут служить основанием для переоборудования станции технического обслуживания автомобилей (СТОА): оптимизации числа постов (для обеспечения должного уровня их загрузки); повышения вероятности выполнения производственных заданий; контроля за величиной потерь, связанных с функционированием системы в целом.

Данные об услугах позволят выделить среди них наиболее важные для клиента и отдать им предпочтение в планировании размещения технологических процессов, распределении затрат на оборудование и работников.

Первым этапом прогнозирования показателей спроса является анализ тенденций развития автомобильного парка района деловой активности рассматриваемой СТОА, которым в данном исследовании явился г. Нижний Новгород.

Результаты моделирования по ретроспективному периоду на 2006–2010 гг. позволили спрогнозировать динамику изменения автомобильного парка г. Нижнего Новгорода, представленную на рис. 1. Данное моделирование производилось в 2005 году [1] и на настоящий момент совпало с существующим уровнем.

Произведенный ретроспективный анализ подтвердил свою тенденциозность и может по представленному алгоритму проводиться и применяться в дальнейшем [2, 3].

Вторым этапом исследований является непосредственно прогнозирование показателей спроса на услуги рассматриваемого предприятия, т.е. количества среднесуточных обращений и распределения суточной трудоемкости по различным участкам на базе разработанной математической модели. В модели учитываются следующие факторы:

- возможное изменение общего количества автомобилей $N_{\text{авт}}$ находящихся в зоне деловой активности рассматриваемой СТОА;

- интенсивность эксплуатации, т.е. среднегодовой пробег \bar{L}_T автомобилей, находящихся в рассматриваемом регионе, а также динамику его изменения по различным периодам года;
- средняя наработка \bar{I}_j на один автомобиле-заезд на СТОА;
- возможное изменение доли рынка K_j , занимаемой данным предприятием в районе деловой активности;
- доли владельцев α , обращающихся на СТОА:

$$\bar{N}_{ij} = \frac{N_{\text{авт}} \cdot \bar{L}_T \cdot K_{cj} \cdot \alpha \cdot K_j}{(I_j \cdot D_p)}, \quad (1)$$

где K_{cj} - коэффициент, учитывающий сезонность годового пробега автомобилей рассматриваемого региона; D_p - количество дней работы данного предприятия за рассматриваемый период.

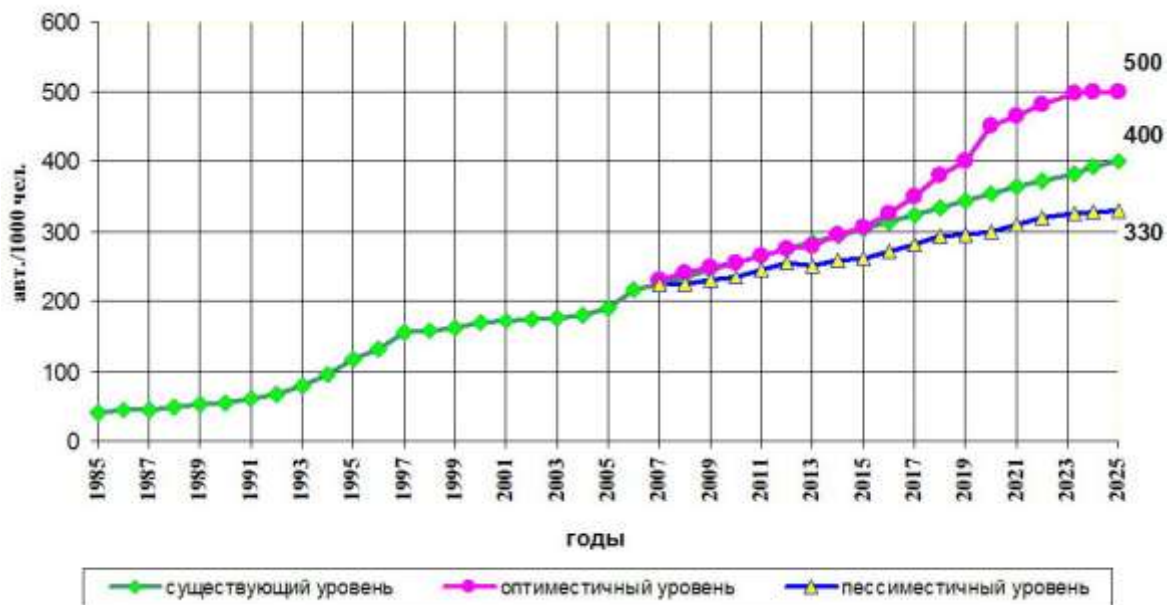


Рис. 1. Прогноз развития автомобильного парка г. Нижнего Новгорода (легковые автомобили отечественного и зарубежного производства) от 2005 года

Для упрощения модели с учетом краткосрочного периода прогнозирования без потери точности получаемого результата, можно принять постоянными следующие величины:

- средний годовой пробег \bar{L}_T ;
- коэффициент, учитывающий динамику посезонного изменения среднегодового пробега K_{cj} ;
- долю владельцев, пользующихся услугами СТО в данном регионе α ;
- режим работы СТО, определяющийся количеством дней работы D_p предприятия на рассматриваемых периодах года;
- $\bar{t}_{1обрj}$ – среднюю трудоемкость одного обращения.

Получены зависимости (математические модели), позволяющие осуществлять прогнозирование суточного количества обращений (табл. 1). Модели разрабатывались и апробировались для конкретной СТОА «Омега» г. Нижнего Новгорода [3, 4].

Таблица 1

Зависимости для прогнозирования спроса на услуги СТО «Омега»

Наименование участков	Зависимости для прогнозирования суточного количества обращений
Участок по диагностике и ремонту ЭСУД*	$\bar{N}_{ij}^{сут} = 15777,85 \cdot K_{Cj} \cdot \left[0,0015 + 0,0003t - 0,0011 \sin\left(\frac{2\pi t}{1,77} + 2,3\right) \right]$
Участок электротехнических работ	$\bar{N}_{ij}^{сут} = 34797,98 \cdot K_{Cj} \cdot \left[0,0014 - 0,00005t + 0,00024 \cos\left(\frac{2\pi t}{1,2}\right) + 0,00024 \sin\left(\frac{2\pi t}{1,2}\right) \right]$
Участок общего ремонта	$\bar{N}_{ij}^{сут} = 29831,09 \cdot K_{Cj} \cdot \left[0,0031 - 0,00001t + 0,00068 \cos\left(\frac{2\pi t}{1,19} - 0,2\right) + 0,00068 \sin\left(\frac{2\pi t}{1,19} - 0,2\right) \right]$
Участок по ремонту узлов и агрегатов	$\bar{N}_{ij}^{сут} = 38710,27 \cdot K_{Cj} \cdot \left[0,001 - 0,0006t + 0,00041 \cos\left(\frac{2\pi t}{1,2} + 0,1\right) + 0,00041 \sin\left(\frac{2\pi t}{1,2} + 0,1\right) \right]$
Участок по регулировке углов установки управляемых колес	$\bar{N}_{ij}^{сут} = 40597,64 \cdot K_{Cj} \cdot \left[0,00044 - 0,000003t + 0,000072 \cos\left(\frac{2\pi t}{1,51} + 0,6\right) + 0,000072 \sin\left(\frac{2\pi t}{1,51} + 0,6\right) \right]$

Примечание: * – ЭСУД-электронные системы управления двигателем

Для последующей оценки эффективности предприятия в целом необходимо осуществить выбор временного периода, исходя из необходимости учета максимальной нагрузки на производственные подразделения моделируемого предприятия, а также требования нахождения суточного количества обращений в данном периоде в области верхней доверительной границы колебаний (соответствующей вероятности 95%) на прогнозном периоде [4, 5]. В соответствии с поставленной задачей был выбран период с 01.04.2011 по 31.03.12 гг.

Результаты прогнозирования спроса на услуги предприятия (среднего суточного количества обращений) представлены на рис. 2–6.

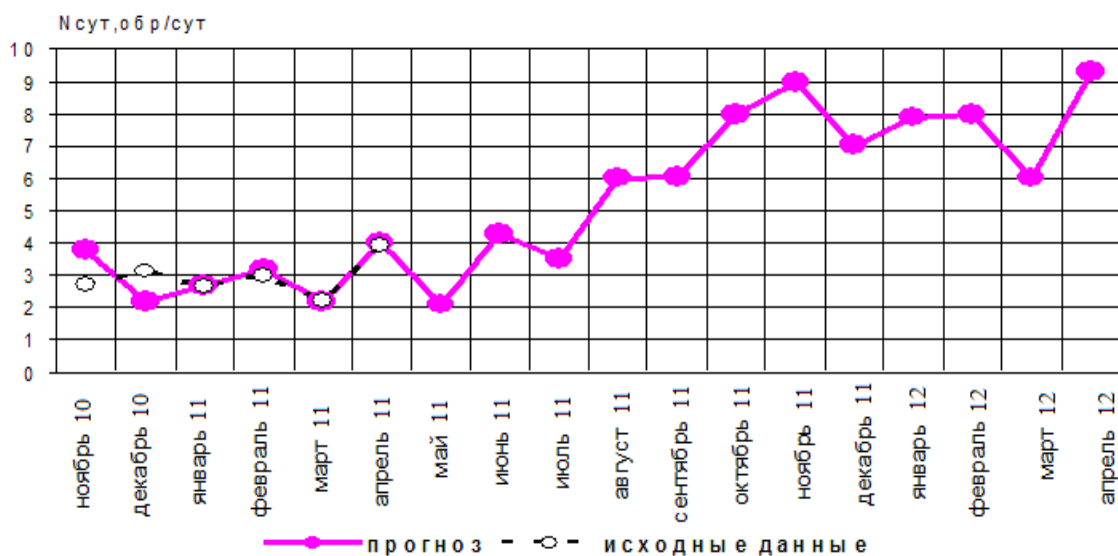


Рис. 2. Прогнозирование среднего суточного количества обращений для участка «Диагностика и ремонт ЭСУД»

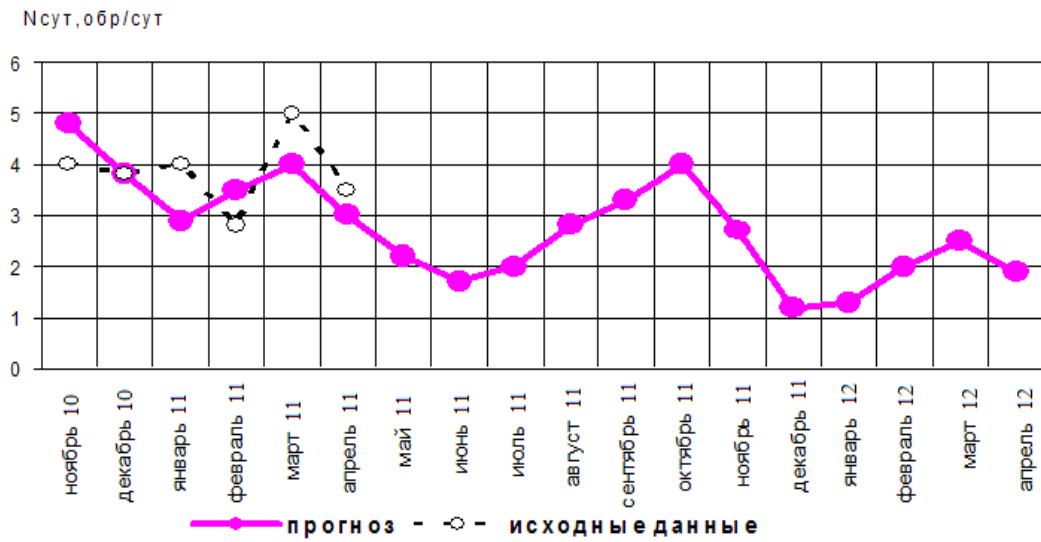


Рис. 3. Прогнозирование среднего суточного количества обращений для участка «Электротехнические работы»

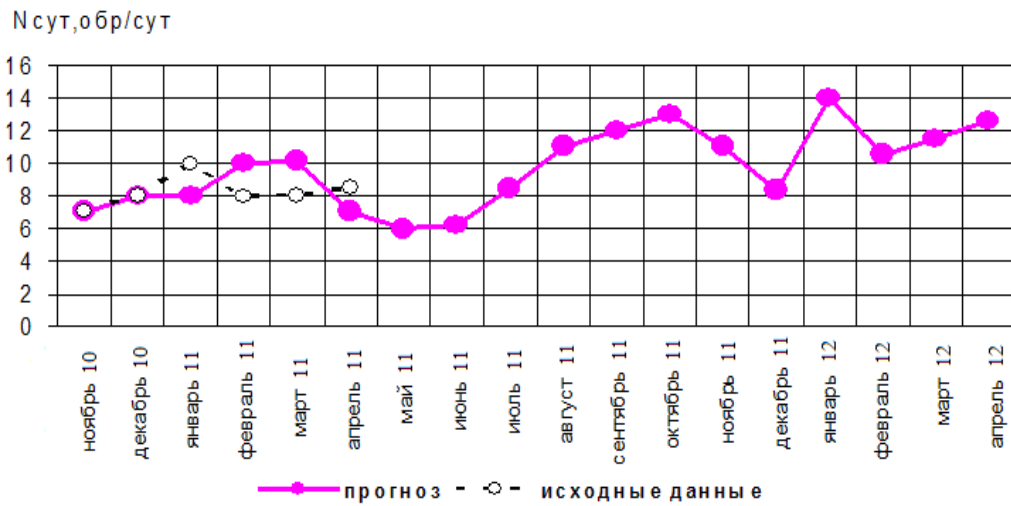


Рис. 4. Прогнозирование среднего суточного количества обращений для участка «Общий ремонт»

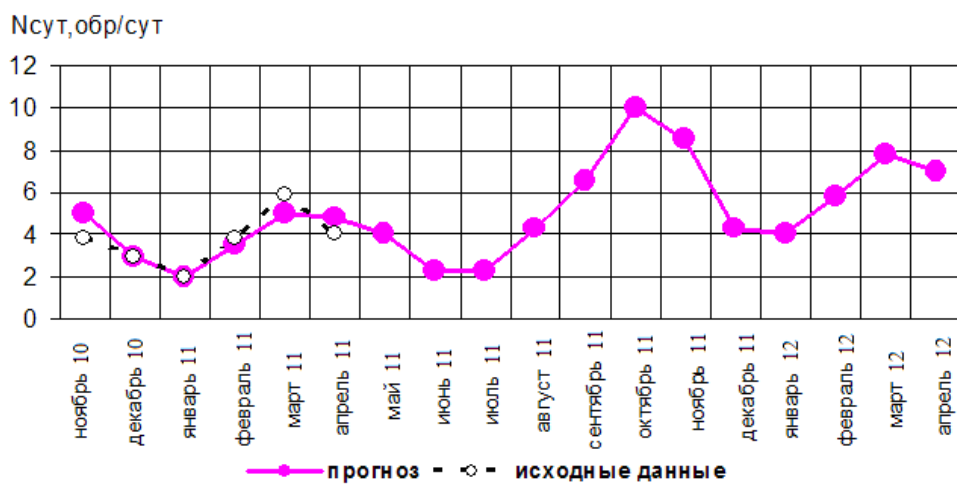


Рис. 5. Прогнозирование среднего суточного количества обращений по участку «Ремонт узлов и агрегатов»

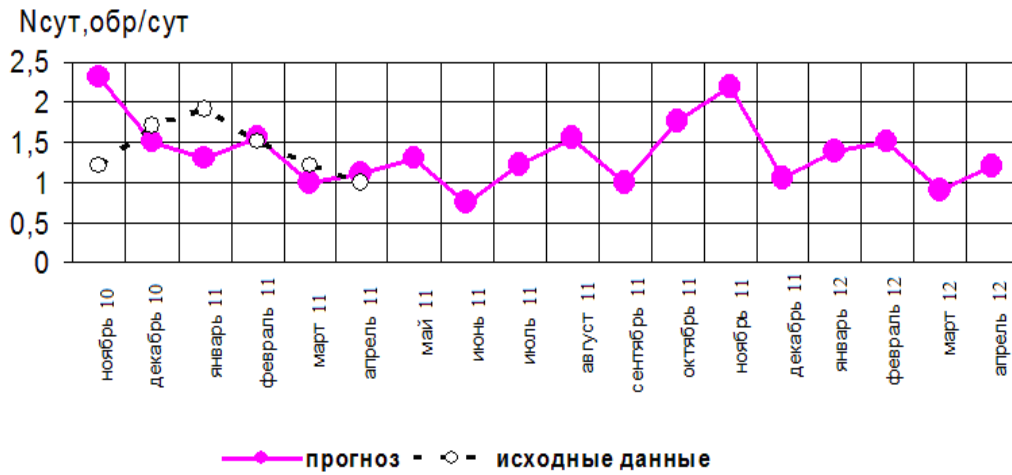


Рис. 6. Прогнозирование среднего суточного количества обращений по участку «Регулировки углов установки управляемых колес»

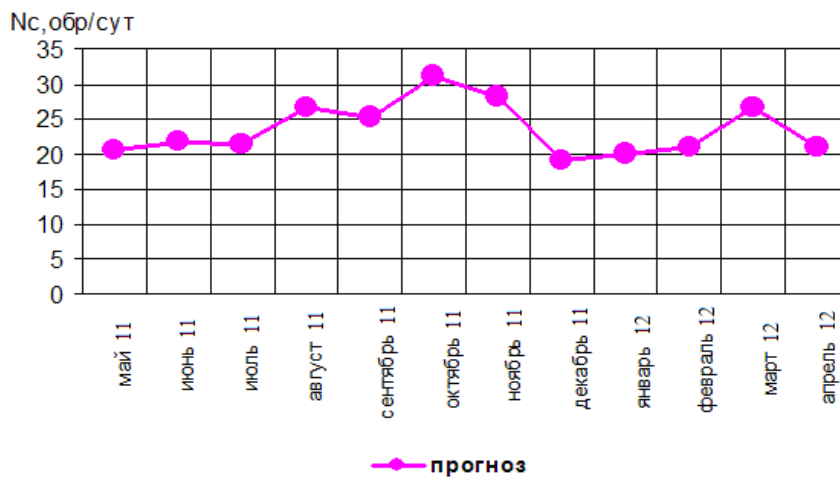


Рис. 7. Изменение общего количества обращений на СТО «Омега» по периодам года на 2011–2012 гг. (прогнозируемый период)

Приведенные зависимости позволяют утверждать об устойчивом спросе на услуги рассматриваемого предприятия СТОА «Омега».

Показатели спроса для выбранного временного периода, являющиеся исходными данными для моделирования, представлены в табл. 2.

Таблица 2

Прогнозные величины для СТО «Омега»

Наименование участка	N_c ,обр/сут	$t_{1обр}$ чел. час	$\sigma(t_{1обр})$ чел. час	$v(t_{1обр})$	t_c чел. час	$\sigma(t_c)$ чел. час	$v(t_c)$
ЭСУД	9,348	0,62	0,291	0,469	4,91	2,891	0,59
ЭТР	4,091	0,849	0,612	0,721	3,47	3,036	0,87
Общий ремонт	14,874	0,895	1,68	1,305	13,31	17,712	1,33
РУА	9,808	1,109	1,643	1,482	10,88	16,485	1,52

Прогнозные величины, представленные в табл. 2:

$$N_c = \frac{\sum_{k=1}^{n_{\text{выб}}} N_{ck}}{n_{\text{выб}}} - \text{среднесуточное количество обращений;}$$

$$t_{1обрI} = \frac{\sum_{I=1}^{N_{\Sigma}} t_{1обрI}}{N_{\Sigma}} \quad \text{– трудоемкость одного обслуживания};$$

$$\sigma(t_{1обрI}) = \sqrt{\frac{\sum_{I=1}^{N_{\Sigma}} (t_{1обрI} - \bar{t}_{1обрI})^2}{N_{\Sigma} - 1}} \quad \text{– среднеквадратическое отклонение трудоемкости одного обслуживания};$$

$\nu(t_{1обрI})$ – коэффициент вариации трудоемкости одного обслуживания;

$\bar{t}_c = \bar{t}_{1обр} \cdot \bar{N}_c$ – суточная трудоемкость работ;

$\sigma(t_c) = \sqrt{\bar{t}_{1обр}^2 \cdot \bar{N}_c \cdot \bar{N}_c^2 \cdot \sigma^2(t_{1обр})}$ – среднеквадратическое отклонение суточной трудоемкости работ;

$\nu(t_c)$ – коэффициент вариации суточной трудоемкости работ.

Распределения суточного количества обращений и суточной трудоемкости, полученные для указанного прогнозного временного периода, приведены на рис. 8 – рис. 11.

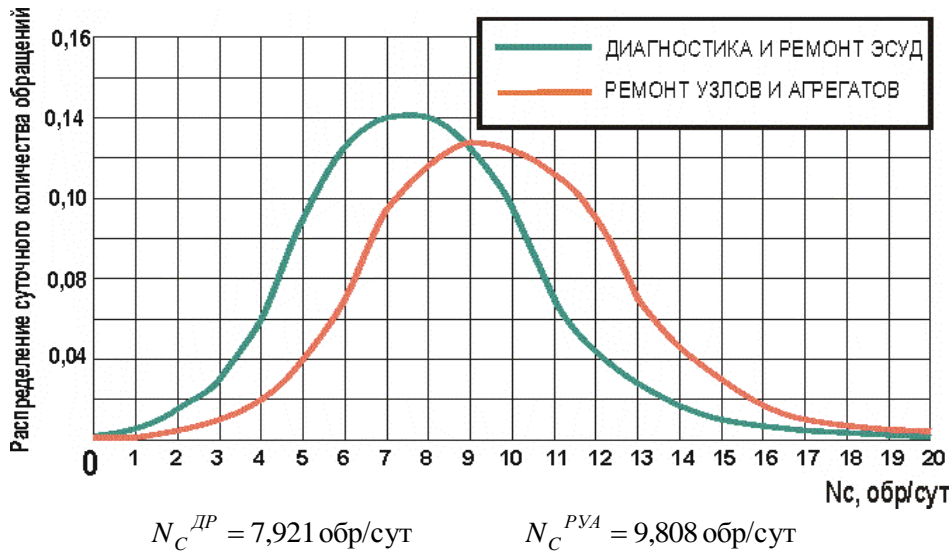


Рис. 8. Распределение суточного количества обращений для участков «Диагностика и ремонт ЭСУД» и «Ремонт узлов и агрегатов»

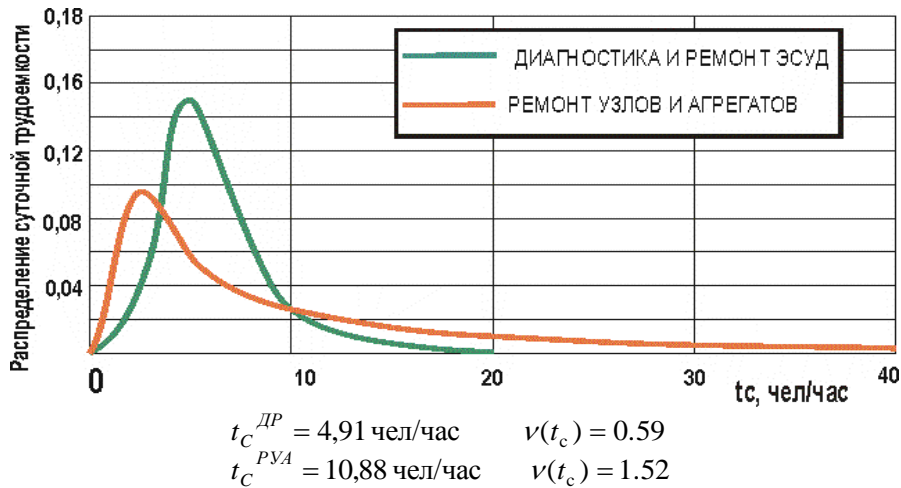


Рис. 9. Распределение суточной трудоемкости для участков «Диагностика и ремонт ЭСУД» и «Ремонт узлов и агрегатов»

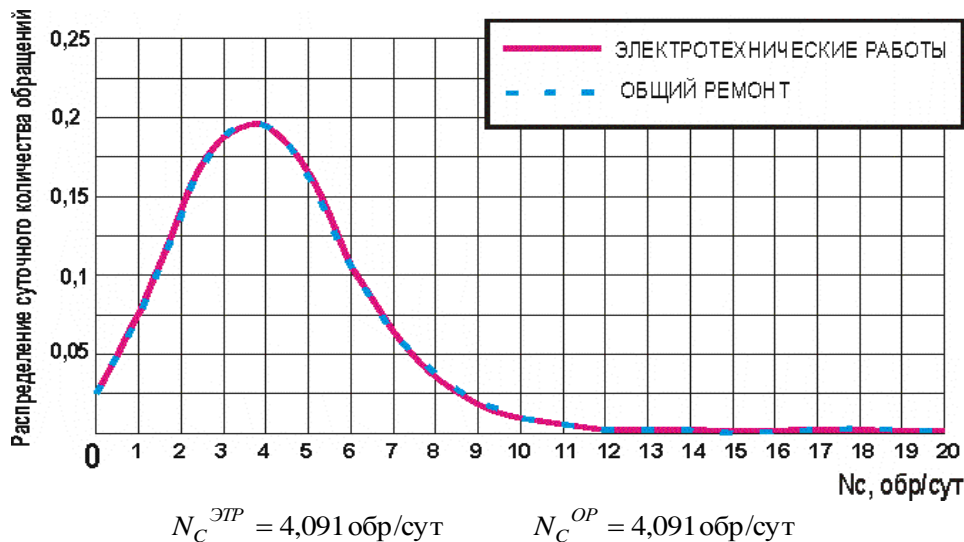


Рис. 10. Распределение суточного количества обращений для участков: «Электротехнические работы» «Общий ремонт»

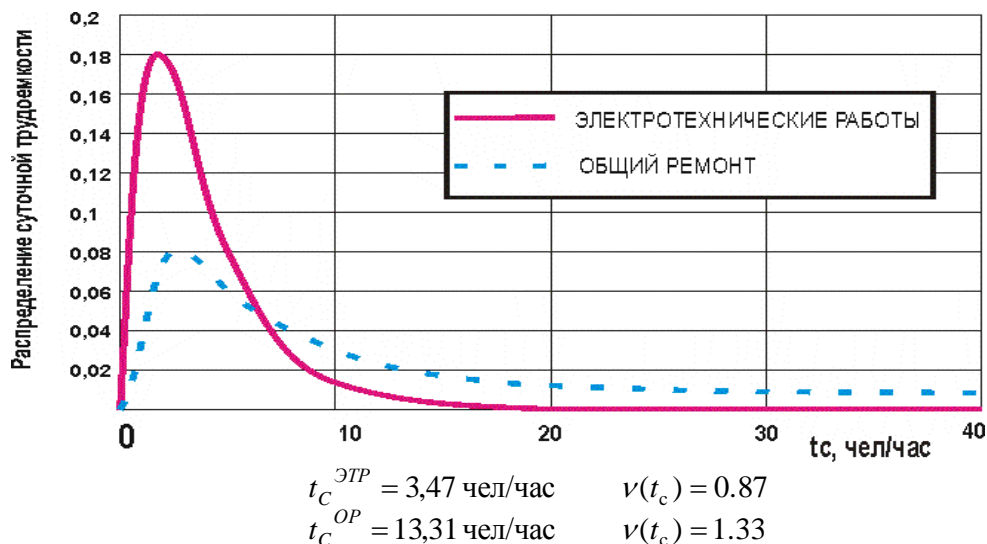


Рис. 11. Распределение суточной трудоемкости для участков: «Электротехнические работы» и «Общий ремонт»

Выводы

Представленный методический подход позволяет с остаточной точностью производить необходимые расчеты, связанные с прогнозированием спроса на услуги автосервисных предприятий, что является необходимым условием для обеспечения успешной работы и долгосрочных перспектив выживаемости предприятия.

Практическая реализация данной методики обеспечит руководителей СТОА оперативной информацией и позволит принимать решения, касающиеся рационального варианта настройки производственных подразделений относительно с анализом его планировочных решений и возможностью размещения в существующем производственном корпусе необходимого количества постов либо изменения режима работы СТО.

На основании полученных данных возможна разработка методик эффективного функционирования предприятия как на настоящий момент, так и на перспективу, что позволит наиболее полно использовать производственные мощности, удовлетворять потребности клиентов и обеспечить устойчивость положения СТОА на рынке.

Библиографический список

1. **Кузьмин, Н.А.** Процессы и причины изменения работоспособности автомобилей: учеб. пособие / Н.А. Кузьмин; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 160 с.
2. **Кузьмин, Н.А.** //Динамика роста парка легковых автомобилей в Нижнем Новгороде и области / Н.А. Кузьмин, Ю.И. Молев, В.А. Шапкин // Безопасность транспортных средств в эксплуатации: сб. материалов 71-й международной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. С. 153–154.
3. **Шапкин, В.А.** Анализ парка легковых автомобилей в Нижнем Новгороде и области / В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина, А.А. Заботин // Будущее технической науки: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. Н. Новгород, 2010. – С. 160–162.
4. **Шапкин, В.А.** Определение показателей качества обслуживания клиентов СТО автомобилей // Будущее технической науки: материалы X международной молодежной научно-технической конференции / В.А. Шапкин; Ю.В. Шапкина; НГТУ. – Н. Новгород, 2011. С. 173-174
5. **Шапкина, Ю.В.** Анализ методов исследования и прогнозирования рынка автосервисных услуг // Будущее технической науки: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. С. 157–158.
6. **Шапкина, Ю.В.** Оценка показателей эффективности услуг станции технического обслуживания / Ю.В. Шапкина, Н.А. Кузьмин // Будущее технической науки: материалы IX Международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2010. С. 159–160.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2011*

J.V Shapkina, N.A. Kuzmin, V.A. Shapkin

FORECASTING OF DEMAND FOR SERVICES OF CARS SERVICE STATION

This article describes method of forecasting the demand for car service station. The developed mathematical model allows to make forecasting of demand for services of the autoservice enterprise on its such parameters, as daily average quantity of references and average labour input of one reference. On the basis of the received data the assessment of activity of the enterprise, development of procedures of increase of its effective functioning is possible.

Key words: servicing deport of cars, autoservice services, forecasting of demand, daily average quantity of references, daily labour input of works.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.12.011.1.001

П.А. Бимбереков

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ ПО ДОПУСКАЕМОМУ ПРОГИБУ БАЛКИ ПРОФИЛЕЙ

ФГОУ ВПО «Новосибирская государственная академия водного транспорта»

Представлен вариант схемы проектирования профиля по значению предельно допустимого прогиба балки, который представляет модификацию проектирования оптимального по моменту сопротивления сечения профиля с учетом сдвиговых деформаций. Данный вариант проектирования актуален для телескопических люковых закрытий, не превышение допустимого прогиба от действующей нагрузки у которых обуславливает их работоспособность.

Ключевые слова: проектирование, судовой профиль, допускаемый прогиб, оптимизация

В [1] показано, что параметры профиля, удовлетворяющие требованиям технологичности и устойчивости, могут быть получены только при оптимизации сечения профиля по моменту сопротивления. Поэтому в [1], зависимости, полученные при оптимизации сечения профиля по моменту сопротивления, были переведены к зависимостям по другим нормируемым параметрам, в частности, по моменту инерции сечения профиля. В случаях, когда лимитирован прогиб для данной балки $[\varpi]$, необходимо производить подбор оптимального профиля, одновременно учитывающий изгибную и сдвиговую составляющие прогиба.

Для оптимального профиля, проектируемого по моменту сопротивления его сечения с присоединенным пояском обшивки W , приведенного к соответственному моменту инерции I , имеем следующую зависимость для высоты стенки h [1, С.142], по выражению

$$h = \sqrt[4]{6 \frac{k_{II}}{1+k_{II}} Im}, \quad (1)$$

где $k_{II} = f_1/f$ (f_1 и f - площади сечений полки и стенки профиля соответственно); $m = h/t$ (h и t - высота и толщина стенки профиля соответственно).

Для оптимального профиля, спроектированного по W , соотношение составляющих прогиба от изгиба ϖ_u и сдвига $\varpi_{сд}$ выражается зависимостью [1, с. 216]

$$\frac{\varpi_{сд}}{\varpi_u} = \frac{2C_u}{C_{сд}} (1 + \mu) \frac{h^2}{l^2} \frac{k_{II} + 1}{6k_{II}}, \quad (2)$$

где μ - коэффициент Пуассона; l - длина пролета балки.

Для составляющей прогиба от изгиба ϖ_u имеем известное выражение

$$\varpi_u = Ql^3 / (C_u EI), \quad (3)$$

где Q - значение действующей нагрузки; E - модуль Юнга.

Общий прогиб от изгиба и сдвига ϖ выразится очевидной зависимостью

$$\varpi = \varpi_u + \varpi_{c\delta} = \varpi_u \left(1 + \frac{\varpi_{c\delta}}{\varpi_u} \right) = \varpi_u \left(1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2 k_{II} + 1}{l^2 6k_{II}} \right). \quad (4)$$

Приняв допускаемое значение общего прогиба $[\varpi]$ из (4), выразим ϖ_u , получая при этом его допускаемое значение $[\varpi_u]$

$$[\varpi_u] = [\varpi] \left(1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2 k_{II} + 1}{l^2 6k_{II}} \right)^{-1}. \quad (5)$$

Выражая из (3) I и беря в расчет допускаемое значение $[\varpi_u]$ по (5), получим допускаемое значение для момента инерции профиля $[I]$, оптимально проектируемого по моменту сопротивления W с учетом сдвига

$$[I] = \frac{Ql^3}{C_u E [\varpi_u]} = \frac{Ql^3}{C_u E [\varpi]} \left(1 + \frac{2C_u}{C_{c\delta}} (1 + \mu) \frac{h^2 k_{II} + 1}{l^2 6k_{II}} \right). \quad (6)$$

Подставим (6) в (1) и преобразуем относительно h

$$h^4 - h^2 \frac{2(1 + \mu)m}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} - 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} m = 0. \quad (7)$$

Разрешив (7) относительно h , получим

$$h = \sqrt{\frac{(1 + \mu)m}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2 m^2}{C_{c\delta}^2} \left(\frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} m}}. \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определить оптимальную высоту профиля с учетом деформаций изгиба и сдвига, при заданной нагрузке Q , данном виде защемления балки, известном материале балки (известных коэффициенты μ и модуле Юнга E), заданном допускаемом прогибе балки $[\varpi]$, а также выбранных коэффициенты m и получаемом значении коэффициента k_{II} . Однако для последнего еще надо получить расчетное выражение.

Для толщины стенки профиля из (8) получим равенство

$$t = \sqrt{\frac{(1 + \mu)}{C_{c\delta} m} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2}{C_{c\delta}^2 m^2} \left(\frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi] m^3}}}. \quad (9)$$

Для площади сечения профиля, базирясь на (9), имеем выражение

$$F_T = (1 + k_{II}) t^2 m = \frac{(1 + k_{II})(1 + \mu)}{C_{c\delta}} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2 (1 + k_{II})^2}{C_{c\delta}^2} \left(\frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + \frac{6k_{II}(1 + k_{II})Ql^3}{C_u E[\varpi] m}}. \quad (10)$$

Выражение (8) можно преобразовать к следующему виду

$$h = \frac{(1 + \mu)}{C_{c\delta} t} \frac{Ql}{E[\varpi]} + \frac{1}{t} \sqrt{\frac{(1 + \mu)^2}{C_{c\delta}^2} \left(\frac{Ql}{E[\varpi]} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1 + k_{II}} \frac{Ql^3}{C_u E[\varpi]} \frac{1}{m}}. \quad (11)$$

Введем обозначение

$$I_p = Ql^3 / (C_u E[\varpi]). \quad (12)$$

Тогда (11) с учетом (12) примет вид

$$h = \frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{co} t} \frac{1}{l^2} + \frac{1}{t} \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{co}^2} \left(\frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1+k_{II}} \frac{I_p}{m}}. \quad (13)$$

Для оптимального профиля справедливы соотношения [1, С.119]

$$f = \frac{2(1-3k_{II})}{k_{II}-2} f_2, \quad k_{II} = \frac{2(f_2 - f)}{6f_2 + f}, \quad (14)$$

где f_2 - площадь сечения присоединенного пояска обшивки.

Основываясь на первом выражении (14), а также (12), имеем

$$\frac{2(1-3k_{II})}{k_{II}-2} f_2 = f = ht = \frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{co}} \frac{1}{l^2} + \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{co}^2} \left(\frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{II}}{1+k_{II}} \frac{I_p}{m}}. \quad (15)$$

Для предварительного определения величины коэффициента k_{II} в правой части равенства (15) можно воспользоваться формулой (1), вводя в него вместо I величину I_p по (12). Тогда

$$k_{IIp} = 0,68 \left(I_p / (m f_2^2) \right)^{0,2}. \quad (16)$$

Аппроксимируем дробь в (15) перед f_2 следующим выражением

$$2(1-3k_{II}) / (k_{II}-2) = 6k_{II}^{3,5}. \quad (17)$$

Из выражения (15) с учетом (17) получим равенство

$$k_{II} = \left\{ \frac{1}{6f_2} \left[\frac{(1+\mu) I_p C_u}{C_{co}} \frac{1}{l^2} + \sqrt{\frac{(1+\mu)^2}{C_{co}^2} \left(\frac{I_p}{C_u l^2} \right)^2 + 6 \frac{k_{IIp}}{1+k_{IIp}} \frac{I_p}{m}} \right] \right\}^{1/3,5}. \quad (18)$$

Выражения (1)...(18) позволяют полностью решить поставленную задачу.

Приведём пример предварительного расчета по полученной схеме в табл.1, произведенный без приведения расчетных значений к сортаменту листового проката и реальным значениям ширины (высоты) элементов. Принято, что рассчитываемая балка имеет равномерно распределённую нагрузку и свободно опёрта по концам. Ряд величин в табл. 1 представлен в сантиметрах, так как и в практике проектирования, и в нормативных документах, приняты именно эти единицы, а кроме того, данная таблица предваряет расчет приведенных далее вариантов по специальной программе, где также использованы сантиметры).

Таблица 1

Предварительный расчет параметров сечения профиля

№	Наименование, обозначения, расчетные формулы	Значение, расчет
1	2	3
1	Нагрузка, Q , кН	300
2	Длина балки, L , м	2,4
3	Коэффициент \square	0,3
4	Предельный прогиб, $[\omega]$, м	0,0096
5	Коэффициент C_{II}	76,8
6	Коэффициент $C_{сд}$	8
7	Модуль упругости, $E \times 10^5$, МПа	2,1
8	Напряжение текучести материала, $\square \square_r$, МПа	295
9	Расчетный комплекс I_p : $QL^3 / (C_{II} E [\omega])$, см ⁴	2679

Окончание табл. 1

1	2	3
10	Присоединенный поясok: толщина, t_2 , см ширина, b_2 , см площадь, $f_2=t_2b_2$, см ²	0,8 43,5 34,8
11	Коэффициент $m_{co}=(h/t)_{max}$ при $\sigma_T=235$ МПа	60
12	Коэффициент $m_c=m_{co} ((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$	54
13	Коэффициент $k_{п}$, по формуле (18)	0,414
14	Толщина стенки t , см, по формуле (9)	0,431
15	Высота стенки h , см, по формуле (13)	23,1
16	Площадь стенки $f=ht$, см ²	9,97
17	Коэффициент $k_{п}=2(f_2+f)/(6f_2+f)$	0,409
18	Площадь полки $f_1=k_{п}f$, см ²	0,427
19	Коэффициент $m_1=b_1/t_1=25((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$	22,3
20	Толщина полки $t_1=(f_1/m_1)^{1/2}$, см	0,427
21	Ширина полки $b_1=f_1/t_1$, см	9,52
22	Площадь полки $f_1=h_1t_1$, см ²	4,07
23	Расчетный прогиб, ϖ , м	0,00958

Как видно из табл. 1 расчет дал удовлетворительный результат.

При	Заданные прочностные параметры				Кoeffициенты		Присоединенный поясok				Характеристики материала и условий работы						
	вспомогательные		расчетный		вида балки												
	Момент сопротивления W , см ³	Момент инерции I , см ⁴	Привед. площадь сечения $F_{пр}$, см ²	Предельный момент сопротив. $W_{пр}$, см ⁴	Предельный прогиб ϖ , м	Нагрузка Q , кН	$C_{и}$	$C_{сд}$	Длина балки, м	t_2 , см	b_2 , см	$f_2=t_2b_2$, см ²	σ_T , МПа	E , 10 ³ МПа	Кoeff. Пуассона, μ	$m_{co}=(h/t)_{max}$ при $\sigma_T=235$ МПа	$m_c=m_{co} ((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$
$\sigma_T=235$ МПа	150	2910	21	254	0,0096	300	76,8	8	2,4	0,8	43,5	34,8	295	2,1	0,3	60	54
σ_T	119	2318	17	202													

Толщина стенки расчет t , см: $t=0,7t_2=0,56$, $t=t_2=0,8$, $t=1,4t_2=1,12$. $0,7t_2 < t < 1,4t_2$ - рекомендуемый диапазон, $t_2 < t < 1,4t_2$ - допустимый диапазон. Принимаем t , см: 0,4. Выходит за допустимые пределы.

Высота стенки расчетная h , см: $h=23,61$. Принимаем h , см: 23.

Площадь стенки $f=ht$, см²: 9,2. $m_1=25((E/E_c)*235/\sigma_T)^{1/2}$: 22. Толщина полки $t_{1min}=(f_1/m_1)^{1/2}$, см: 0,41. Характерные значения, см: $t_1=t=0,4$, $t_1=1,4t=0,56$, $t_1=1,75t=0,70$. $t < t_1 < 1,4t_1$ - рекомендуемый диапазон, $1,4t_1 < t_1 < 1,75t_1$ - допустимый диапазон. Принимаем t_1 , см: 0,4. Норма.

Ширина полки b_1 , см: 9,29. Принимаем b_1 , см: 10.

Площадь полки $f_1=b_1t_1$, см²: 4,00. $k_{п}=f_1/f$: 0,435. $m_{расч}$: 25,00. $F_{пр}/f_2$ расч.: 57,50. f_1/f_2 : 0,38. $0,11$. $\alpha_{сд}+\alpha_{сд2}$, М: 0,00958. $\alpha_{сд2}/m_1$: 0,145. $\alpha_{сд1}$, М: 0,00837. $\alpha_{сд2}$, М: 0,00121.

Допустимость значения для m с учетом возможной коррекции $m_k=m(W_0/W)^{1/2}$: норма 25,59, норма 61,41.

Фактические значения прочностных параметров						
F_r , см ²	W , см ³	I , см ⁴	$F_{пр}$, см ²	$W_{пр}$, см ⁴	ϖ , м	
13,20	157,12	3072,15	7,96	217,80	0,00958	
$\Delta b_1=\Delta f_1/t_1$, см	-4,704	-0,674	10,848	-1,449	-0,005	
Погрешность удовлетворения заданию, %	31,49	32,53	-52,39	7,64	-0,19	

Примечание. Толщины листового проката в диапазоне значений 2...30 мм принимать с шагом в 1 мм, причем следующие значения толщин листового проката нежелательны для использования (13,15,17,19,21,24,26).

Таблица 2 - Рекомендуемые величины отношения высоты стенки к ее толщине $m=h/t$

№	Условия эксплуатации	Требование к устойчивости	Назначение балки	$m=h/t$
1	Наряду с изгибом возможно осевое сжатие. Напряжения сжатия соизмеримы с пределом текучести. Возможны случайные локальные нагрузки, вызывающие появление значительных остаточных деформаций	Не должно быть потери устойчивости при действии поперечных нагрузок, вызывающих остаточные прогибы при осевом сжатии до предела текучести	Набор бортов, грузовых палуб и настилов, продольные связи днища и палубы, поперечный набор днища в оконечностях	40 PPP дает до 55
2	Напряжения осевого сжатия незначительны. Случайные перегрузки исключены или маловероятны. Наряду с нормальными напряжениями изгиба действуют касательные напряжения, соизмеримые с пределом текучести	Не должно быть потери устойчивости при одновременном появлении фибровой текучести полки от изгиба и текучести стенки от сдвига	Набор переборок, поперечные связи днища в средней части (кроме судов, эксплуатирующихся на мелководье), поперечный набор палуб, не предназначенных для размещения груза	60
3	Случайные нагрузки исключены или маловероятны. Напряжения осевого сжатия и касательные напряжения - незначительны	Не должно быть потери устойчивости при появлении фибровой текучести полки	Набор люковых крышек, не предназначенных для размещения груза, набор надстроек и рубок, не участвующих в общем изгибе корпуса	80

где PPP - Российский Речной Регистр

Критерии качества профиля			
$2W/(F_r+f_2)h$	0,2846431	$2W/F_rh$	1,035066
$W^{2/3}/(F_r+f_2)$	0,6066227	$\Delta f_1/\Delta f$	1,050312

Рис. 1. Пример 1 программы расчета сечения профиля балки при задании допустимого прогиба, а также ряда геометрических параметров его сечения

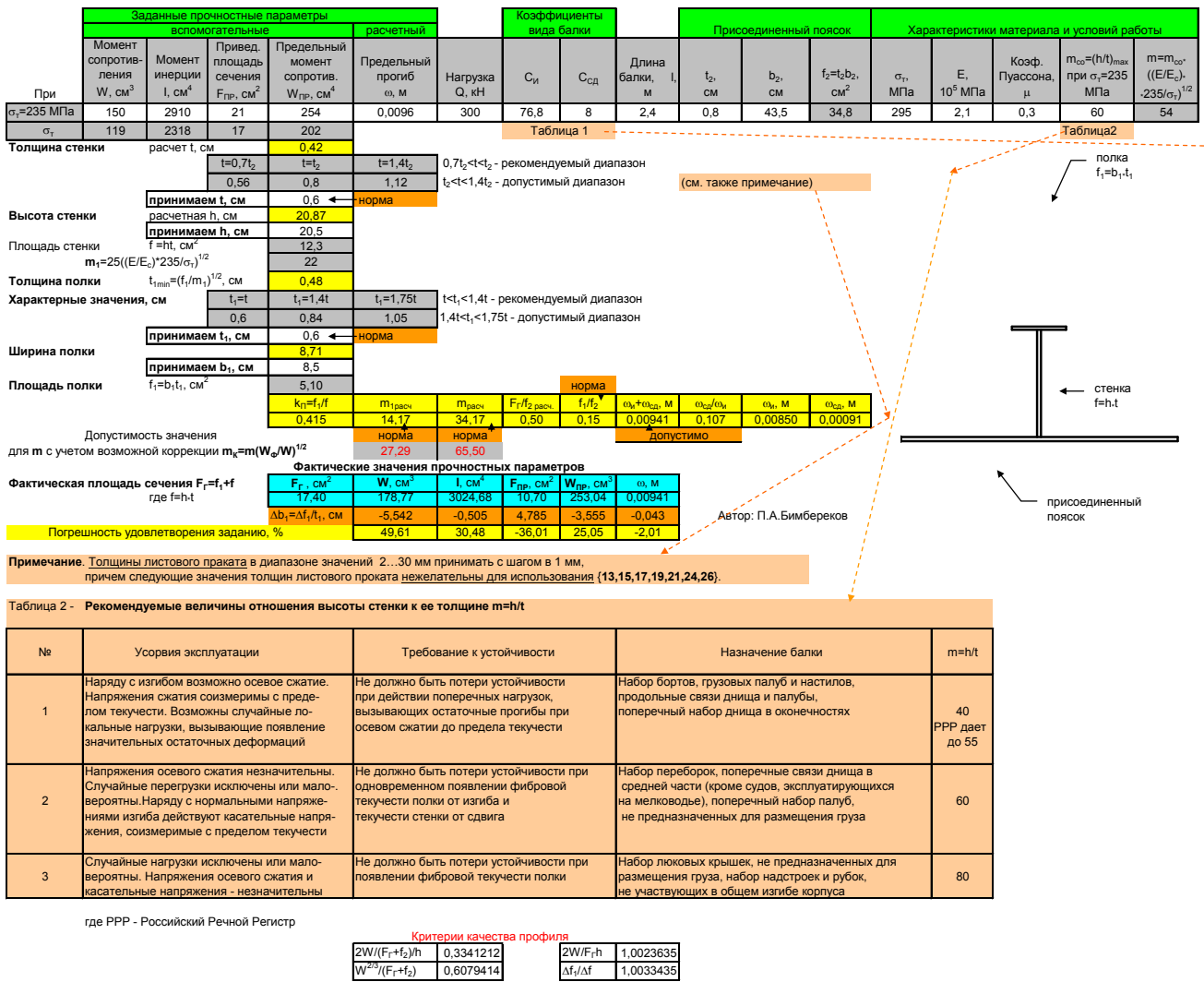


Рис. 2. Пример 2 программы расчета сечения профиля балки при задании допустимого прогиба, а также ряда геометрических параметров его сечения

На рис. 1 и рис. 2 даны варианты подбора элементов профиля балки, ранее рассчитанной в табл. 1, по специальной мини-программе. Здесь приводятся варианты уточнённого подбора параметров сечения профиля балки с учетом значений сортамента листового проката, с технологическим шагом ширины элементов в 0,005 м. Данная схема подбора позволяет также контролировать соответствие заданию в случае нормирования (кроме прогиба) и ряд геометрических параметров сечения балки (момент инерции, момент сопротивления, приведенную площадь сечения, предельный момент сопротивления).

На рис. 1 выбран вариант толщины стенки в два раза меньший, чем у присоединенного пояса обшивки. Такое соотношение не входит в рекомендованные рамки, однако отдельные случаи существующих конструкций говорят о том, что такое соотношение имеет право на существование. Так, настил палубы в районе грузовой площадки барж-площадок проекта №Р-56 имеет построечное значение 0,010 м, в то время как построечная толщина стенки рамных бимсов имеет значение 0,005 м. Эксплуатация барж данного проекта ведется уже более 30 лет и палубное перекрытие показало удовлетворительную работоспособность.

На рис. 2 взят вариант с удовлетворяющим рекомендациям значением стенки, однако площадь профиля при этом значительно возросла – с 13,20 см² (13,2×10⁻⁴ м²) при варианте примера 1 до 17,40 см² (17,4×10⁻⁴ м²) при варианте примера 2.

Отметим, что следует произвести специальные исследования по работоспособности стенок балок относительно малых толщин по сравнению с присоединенными поясками обшивки при величинах толщин обшивки 0,010 м и более.

Выводы

Предложенная схема расчета, имеющая в своей основе получение оптимальных соотношений элементов сечения профиля при оптимизации его по моменту сопротивления с одновременным удовлетворением требования не превышения заданного прогиба, дала удовлетворительный результат и её можно рекомендовать к практическому использованию.

-
1. **Бимбереков, П.А.** Анализ и оптимизация размеров профилей и эквивалентного бруса корпуса судна / П.А. Бимбереков. – Новосибирск: НГАВТ, 2004. – 272 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

P.A. Bimberekov

DESIGNING OF SHAPES OPTIMAL IN SECANT MODULUS BY ALLOWABLE DEFLECTION OF GIRDER

Hereby was represented variant of shape designing scheme by maximum girder deflection value. This variant is modification of designing of shape cross-section optimal in secant modulus taking in account shear deformation. Given variant of designing is actual for telescopic hold covers which working capacity is conditioned by unexcess of allowable deflection because of acting load.

Key words: designing, ship shape, allowable deflection, optimization.

УДК 629.124

Д.А. Бусоргин¹, Е.М. Грамузов², В.А. Зуев²**ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ОПЫТОВ КРЕНОВАНИЯ СУДОВ**Тольяттинский судостроительный и судоремонтный завод¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Предложен программно-аппаратный комплекс для проведения опытов кренования судов. Комплекс позволяет автоматизировать трудоемкие операции проведения опытов, обработки результатов и составление отчетной документации, а также повысить точность экспериментов.

Ключевые слова: программно-аппаратный комплекс, опыт кренования, точность экспериментов, автоматизация, судно.

Одним из важнейших технологических этапов создания нового судна или его модернизации является проведение опытов кренования (ОК).

Опыт кренования проводится грузами или людьми, соответствующие методики описаны в "Правилах..." [1, 2]. Основную трудность составляет измерение крена судна, так как эта величина мала (1° – 4°). Помимо этого необходимо постоянно измерять угол крена во времени, из-за качки. Эти обстоятельства приводят к жестким требованиям к точности измерения угла крена (погрешность должна быть меньше $\pm 0,01^\circ$). Поскольку обработка результатов опыта занимает значительное время, то нет возможности оперативно проконтролировать результаты и при необходимости повторить опыт. Этот момент отрицательно сказывается на методике и производительности труда. Современный комплекс должен позволять в режиме реального времени отслеживать результаты опыта. Итогом проведения опыта кренования является документ – отчет об опыте кренования. Система должна позволять создавать этот документ автоматически.

Можно выделить следующие требования, которым должен удовлетворять современный комплекс по проведению опыта кренования:

- 1) электронный способ определения углов наклона;
- 2) малая погрешность измерений;
- 3) совместимость с любым компьютером;
- 4) мониторинг результатов в реальном времени;
- 5) автоматическая обработка результатов опыта;
- 6) автоматический выпуск документации по результатам опыта.

Рассмотрим программно-аппаратный комплекс для проведения опытов кренования судов [3].

Обобщенные требования Российского речного регистра (РРР) по проведению опыта кренования представлены в табл. 1.

В результате данного анализа можно сделать следующие выводы:

1. Пределы измерения прибора должны лежать в пределах 1 – 4° .
2. Использовать вески и ватерпасы не представляется возможным.
3. Точность измерения прибора должна составлять не менее $0,01^\circ$.

Эти требования выражают техническую составляющую характеристик прибора.

В соответствии с п. 1.5.13 Морского регистра судоходства (МРС) опыт кренования производится по "Инструктивным указаниям по кренованию судов" (п. 2.17 ч. V "Техническое наблюдение за постройкой судов" и изготовлением материалов и изделий для судов). Обобщенные требования МРС по проведению опыта кренования представлены в табл. 2.

Таблица 1

Требования РРР

№	Пункт "Правил..."	Понятие	Требуемое значение
1	2.1	Максимальное значение скорости ветра при проведении ОК	3 м/с
2	2.2	Запас воды под днищем	1 м
3	3.1.3	Максимальное значение угла начального крена судна	0,5°
4	3.1.4	Максимальная масса недостающих грузов	2 % от водоизмещения порожнем
5	3.1.4	Максимальная масса излишних грузов, включая крен-балласт	5 % от водоизмещения порожнем
6	3.1.9	Минимальное значение метацентрической высоты	0,2 м
7	3.2.2	Необходимый крен при расположении всего твердого крен-балласта на одном борту	2-4°
8	3.2.2	Необходимый крен при расположении всего крен-балласта на одном борту при креновании переходами людей.	1,5-2°
9	3.3.1.1	Методы, используемые при креновании твердым крен-балластом	-вески; -ватерпасы; -приборы.
10	3.3.1.2	Методы, используемые при креновании "переходами людей"	-приборы.
11	3.3.2.1	Минимальное количество весков	3
12	3.3.2.2	Минимальное количество приборов	2
13	3.3.2.3	Минимальное количество приборов и весков	2
14	3.3.4	Минимальное отклонение веска по рейке	150 мм
15	3.3.4	Минимальная длина нити веска	3 м
16	4.1.3.1	Точность измерения длины весков	5 мм
17	4.1.3.2	Точность измерения осадки	10 мм
18	4.1.3.3	Точность измерения плечей перемещения крен-балласта	10 мм
19	4.1.3.4	Точность измерения отклонения веска	1 мм
20	4.1.3.5	Точность измерения отклонения инклинограмм	0,2 мм
21	4.1.3.6	Точность измерения массы крен-балласта	1%
22	4.1.3.7	Точность измерения времени	0,1 с
23	4.3.4	Минимальное необходимое количество перемещений людей	8
24	4.4.2.3	Минимальный масштаб записи прибора	15 мм/град

Таблица 2

Требования МРС по проведению опыта кренования

№	Пункт "Правил..."	Понятие	Требуемое значение
1	2	3	4
1	2.1	Максимальное значение скорости ветра при проведении ОК	3,5 м/с
2	1.3	Максимальное значение угла начального крена судна	0,5°
3	1.5	Минимальное значение метацентрической высоты	0,2 м
4	1.10	Необходимый крен при расположении всего твердого крен-балласта на одном борту	2-4°

Окончание табл. 2

1	2	3	4
5	1.10	Необходимый крен при расположении всего крен-балласта на одном борту при креновании переходами людей.	1,5-2°
6	1.14.1	Методы, используемые при креновании твердым крен-балластом	-вески; -ватерпасы; -приборы.
7	1.14.2	Методы, используемые при креновании "переходами людей"	-приборы.
8	1.17	Минимальное количество весков	2
9	1.17	Минимальное количество приборов	2
10	1.17	Минимальное количество приборов и весков	2
11	1.15	Минимальное отклонение веска по рейке	150 мм
12	1.15	Минимальная длина нити веска	3 м
13	2.2	Точность измерения длины весков	5 мм
14	2.2	Точность измерения садки	10 мм
15	2.2	Точность измерения плечей перемещения крен-балласта	10 мм
16	2.2	Точность измерения отклонения веска	1 мм
17	2.2	Точность измерения отклонения инклинограмм	0,2 мм
18	2.2	Точность измерения массы крен-балласта	1%
19	2.2	Точность измерения времени	0,1 с
20	2.12.2	Минимальный масштаб записи прибора	15 мм/град

Если сопоставить табл. 1 и 2 то можно увидеть, что они имеют практически одинаковые данные и полностью идентичные данные по параметрам, необходимым при проектировании прибора.

В соответствии с РРР водоизмещение судна D и координаты ЦТ x_g и z_g необходимо вычислять по следующим формулам:

- при дифференте менее 0,005L:

$$D = \rho g V; \quad z_g = r + z_c - h_k; \quad x_g = x_c - R \operatorname{tg} \psi;$$

- при дифференте более 0,005L:

$$D = \rho g V; \quad z_g = z_c + (r - h_k) \cos \psi; \quad x_g = x_c - (r - h_k) \sin \psi,$$

где ρ – плотность забортной воды; g – ускорение свободного падения; V – объемное водоизмещение; r и R – поперечный и продольный метацентрические радиусы; x_c и z_c – абсцисса и аппликата центра величины; $h_k = \sum h_i / n$ – среднее значение поперечной метацентрической высоты; h_i – метацентрическая высота i -того измерения; n – число измерений; ψ – угол дифферента.

Теоретические элементы определяют любым достаточно точным способом или снимают с кривых элементов теоретического чертежа.

Качество опыта кренования следует устанавливать следующим образом:

- среднее квадратичное отклонение значений метацентрической высоты от среднего арифметического, м:

$$\sigma_h = \sqrt{\frac{\sum (h_i - h_k)^2}{n(n-1)}};$$

- доверительная точность опыта: $\varepsilon = t_{0,98} \sigma_h$.

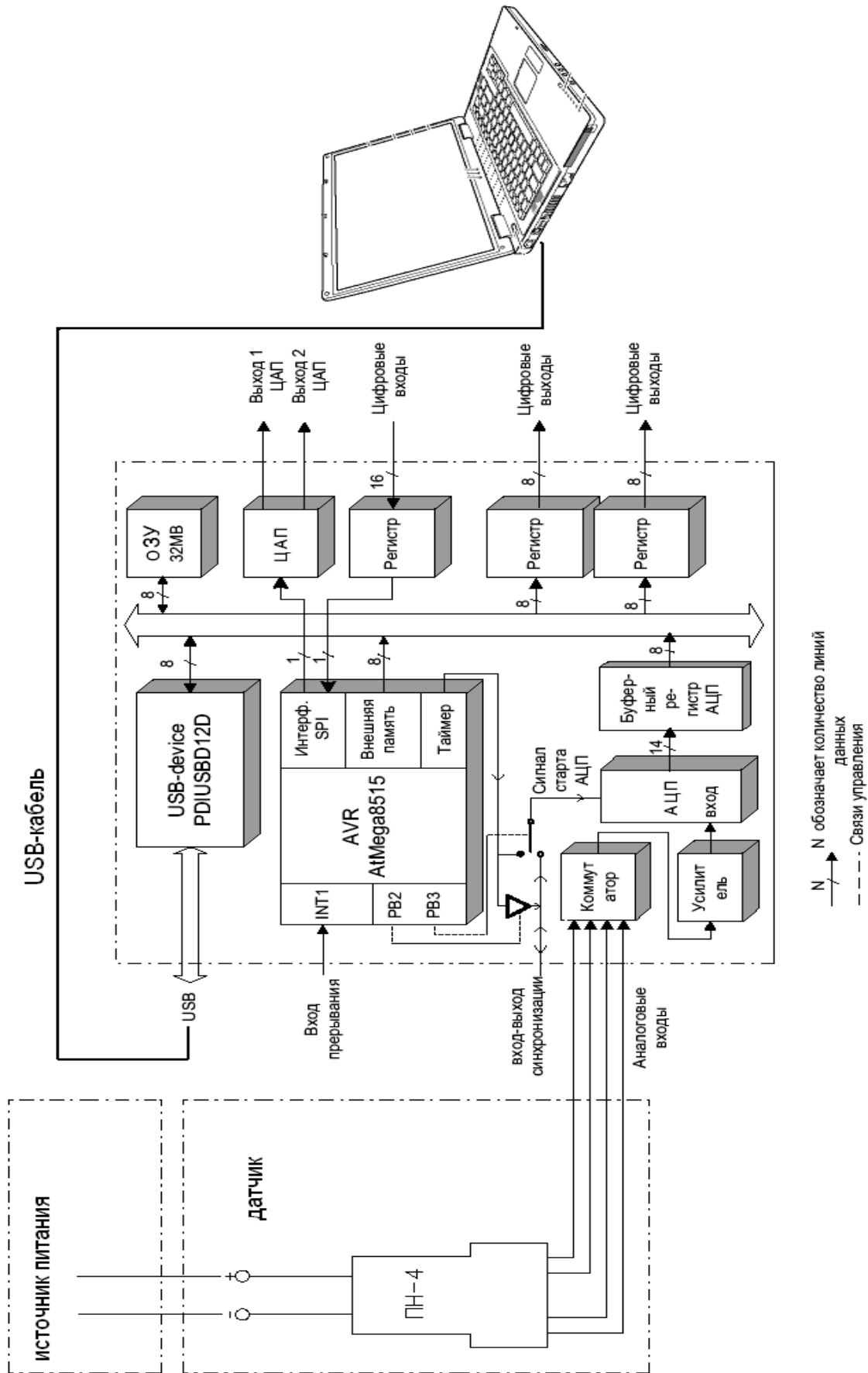


Рис. 1. Узловая схема прибора для проведения ОК

Инерционный коэффициент судна при креновании следует вычислять по формуле:

$$C = \frac{\tau \sqrt{h_k}}{B},$$

где τ – период бортовой качки судна, шириной B .

После рассмотрения перечисленных методов становится очевидно, что использование механических методов для автоматизированного проведения опыта кренования невозможно в силу отсутствия способа передачи измеренных параметров на средство обработки (ПК). Поэтому остается единственный вариант – электронные средства измерений.

Выбор датчика осуществляется по критериям, которые определяются несколькими положениями:

- определенная погрешность измерения датчика;
- определенный рабочий диапазон измерений датчика;
- возможность использования на судне;
- определенный максимальный собственный дрейф.

Из перечисленных критериев наиболее важными являются первые два, поскольку они определяют работоспособность прибора в принципе.

При изучении "Правил..." были получены данные по погрешности измерения датчика. Поскольку напрямую погрешность в градусах не указана, то определим ее по требованию к инклинограмме исходя из следующих соображений:

- 1) точность отклонения инклинограммы должна быть не более 0,2 мм;
- 2) масштаб записи инклинограммы должен быть не менее 15 мм/град.

Аналізу подвергались датчики, приведенные в табл. 3.

Таблица 3

Датчики измерения углов

Наименование	Предел измерений	Точность
ИН-ДЗ	$\pm 300''$ (расширенный $\pm 450''$)	не более $1''$
ПН-2	± 20 град	не более $3'$
ПН-4	$\pm 300''$ (расширение $\pm 450''$)	не более $1''$
ПН-5	$\pm 2^\circ$	не более $25''$
GNAMG	15° или 30° (на выбор)	$0,1^\circ$ (в пределе 15°) или $0,2^\circ$ (в пределе 30°)
RS-232	$\pm 0,1^\circ, \pm 0,5^\circ, \pm 2^\circ, \pm 10^\circ, \pm 20^\circ, \pm 60^\circ$	$\pm 0,1'', \pm 0,5'', \pm 2'', \pm 10'', \pm 20'', \pm 60''$
MS-TL	$0,5^\circ$	$60''$
ИЛИМ-01	$\pm 0,1^0$	$2''$

Из этих двух требований получаем, что погрешность измерения угла должна быть не более 0,013 град или 48". Находим, что наиболее подходящий датчик – ПН-5.

В общем случае прибор состоит из трех основных узлов: датчик, АЦП и ПК. Выбранные нами типы узлов представлены в табл. 4.

Таблица 4

Типы основных узлов проектируемого прибора

Узел	Тип	Примечание
1	2	3
Датчик наклона	ПН-5	См. пп. 3.4 и 3.10
Аналого-Цифровой преобразователь (АЦП)	Е-140	См. п. 6.5

1	2	3
Компьютер персональный	IBM PC – совместимый ПК	Предпочтение отдается ноутбуку для обеспечения мобильности прибора.
Источники питания	Штатные портативные источники питания	Датчики питаются от стандартных аккумуляторных батарей.
Кабели и интерфейсы	Штатные кабели и интерфейсы	Все узлы имеют современные USB-интерфейсы.
Программное обеспечение	Базовое и прикладное ПО	Базовое ПО – ПО, поставляемое с приборами, ОС на компьютере и проч. Прикладное ПО – ПО, разработанное специально для автоматизации опыта кренования.

Следует отметить, что в табл. 4 представлен полный комплекс узлов установки, в объеме, необходимом для проведения опыта кренования. Но, естественно, в сам прибор компьютер и базовое ПО входить не будут. Поэтому необходимо учитывать этот момент при проектировании схемы подключения прибора к ПК и при разработке прикладного программного обеспечения. Узловая схема прибора представлена на рис. 1.

Датчик должен быть установлен на судне в ДП на горизонтальной поверхности. Будем ориентироваться на три датчика, установленных на разных шпангоутах. Необходимым условием правильной ориентации прибора является совпадение рисок датчика с диаметральной плоскостью и плоскостью мидель-шпангоута, в противном случае показания прибора будут некорректными.

Установка датчика в одной точке представлена на рис. 2.

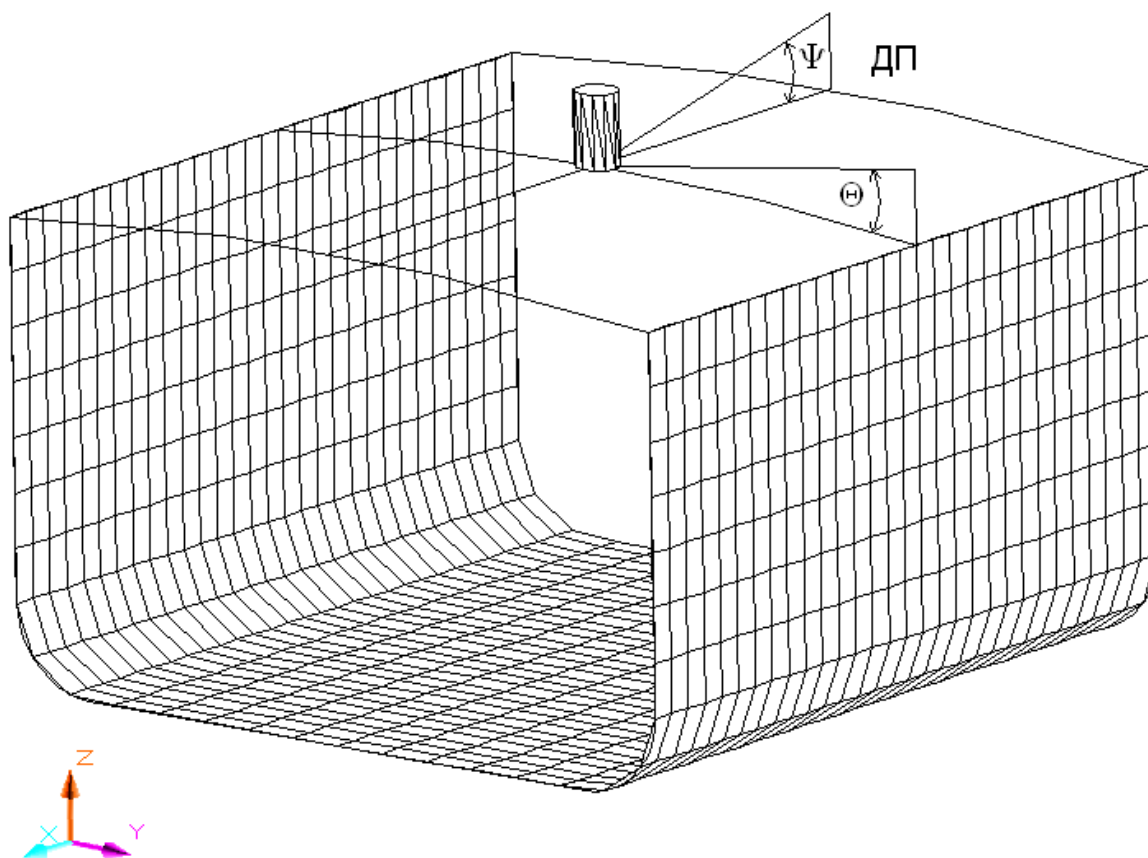


Рис. 2. Установка прибора в одной точке

Требования к программе для обработки данных опыта кренования:

1. Обработка производится в соответствии с правилами РРР.
2. Должна быть обеспечена возможность пошагового отслеживания результатов расчета.
3. Программа должна иметь по возможности простой и интуитивный интерфейс.
4. Должна быть предусмотрена возможность сохранения результатов в форматах

файлов программы.

5. Необходима возможность производить расчеты по формированию групп крен-балласта.

6. Программа должна генерировать отчет об ОК в форме, принятой РРР.

Реализация данных требований влечет за собой следующие особенности.

Поскольку для обеспечения общей функциональности требуется выполнять несколько отдельных задач, то программа использует модульный принцип. Т.е. код разбит на отдельные модули в которых решаются автономные задачи. Все модули будут в один проект, с возможностью обмениваться данными между собой.

Стиль программирования – объектно-ориентированный, в отдельных случаях процедурно-алгоритмический. Для расчетов используются численные методы. Для реализации объектно-ориентированного метода были созданы классы TShip и TInk, т.е. судно и инклинотраммы. В эти классы инкапсулированы данные и методы, применяемые для обработки данных.

Интерфейс программы основан на основной форме и формах расчета, которые реализуют пошаговую концепцию проведения обработки опыта кренования.

Для обмена, сохранения и загрузки данных были разработаны следующие типы файлов со специальными расширениями:

- .idf – файл данных инклинотраммы;
- .dpf – файл данных проекта;
- .gpf – файл данных по группам крен-балласта;
- .spf – файл данных по набору крен-балласта.

Библиографический список

1. Правила классификации и постройки судов внутреннего плавания (ПСВП) // Российский Речной Регистр. – М.: «По Волге», 2008. Т. 2. – 395 с.
2. Правила классификации и постройки морских судов // Российский морской регистр судоходства. – СПб: «Российский морской регистр судоходства», 2008. Т. 1. – 500 с.
3. Зуев В.А., Грамузов Е.М., Бусоргин Д.А. Комплекс для проведения опытов кренования. Свидетельство на полезную модель № 76629. Опубликовано: 27.09.2008.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

D.A. Busorgin, V.A. Zuev, E.M. Gramuzov

HARDWARE AND SOFTWARE COMPLEX FOR CARRING OUT INCLINING EXPERIMENTS OF VESSELS

Hardware and software complex for inclining experiment of vessels is proposed. Complex allows to automate time-consuming operations needed for carrying out experiments, processing of the results and report writing as well as to improve the accuracy of the results.

Key words: hardware and software complex, inclining experiment, accuracy of experiments, automatization, vessel.

УДК 629.124.791

Е.М. Грамузов, Н.Е. Тихонова

МЕТОД УЧЕТА ВЛИЯНИЯ СНЕГА НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ЛЕДОКОЛА ЗА СЧЕТ ПРИВЕДЕННОЙ ТОЛЩИНЫ СПЛОШНОГО ЛЕДЯНОГО ПОКРОВА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предложен метод учета влияния снега на сопротивление ледокола. Для этого использована приведенная толщина льда.

Ключевые слова: сплошной ледяной покров, снег, сопротивление ледокола, толщина льда.

Встречающиеся в природе ледовые условия весьма разнообразны, и почти невозможно найти совершенно идентичные ледовые условия. Практически не встречается чистый ледяной покров, он всегда в той или иной мере покрыт снегом. Для того чтобы можно было сравнивать ледопроездимость судов по натурным данным, полученным в ледовых условиях, отличающихся между собой толщиной льда и снега, удобно использовать приведённую толщину льда. Под ней понимается условная толщина незаснеженного ровного сплошного ледяного покрова, при которой ледокол испытывает такое же ледовое сопротивление, как и при наличии снега на ледяном покрове.

Для получения зависимостей, позволяющих определить приведённую толщину льда, использовались расчётные методы для вычисления ледового сопротивления и сопротивления снега движению речного ледокола, наиболее полно учитывающие особенности формы его корпуса [1, 2].

Чистое ледовое сопротивление представлено в виде

$$R = \sum_{j=1}^m k_j r_j, \quad (1)$$

где r_j - комбинация определяющих ледовое сопротивление факторов, связанная с некоторым физическим процессом; k_j - эмпирический коэффициент.

Выражение (1) для R в силовой интерпретации выглядит:

$$R = R_{p_{ст}} + R_{p_v} + R_{o_{ст}} + R_{o_v}, \quad (2)$$

где $R_{p_{ст}}, R_{p_v}$ - статическая и зависящая от скорости составляющие сопротивления разрушению; $R_{o_{ст}}, R_{o_v}$ - аналогичные составляющие сопротивления обломков льда.

С учетом сказанного напишем выражения для комбинаций определяющих факторов r_j .

$$r_{p_{ст}} = \frac{h^4}{D\alpha} \left[\left(1 + f\gamma_{лт\phi} \right) + k_{c\phi} \gamma_{c\phi} \sqrt{\frac{\operatorname{tg}\varphi_{2\phi}}{1 + \operatorname{tg}^2\varphi_{2\phi}} \frac{D\alpha^2}{h}} + \right. \\ \left. + 0.66(1 + \Phi_{лт})B\alpha + k_{c\phi} \Phi_c \frac{D\alpha^3 B}{h} \right]; \\ r_{p_v} = Fr_h \operatorname{tg}\varphi_{1\phi} r_{p_{ст}}; \\ r_{o_{ст}} = (\rho - \rho_l)gh\Omega_l(\Phi_n + f\Phi_{лт}); \\ r_{o_v} = \rho_l h B v^2 \left[\left(1 + \frac{0.019}{(0.215 + Fr_h \operatorname{tg}\varphi_{1\phi})} \frac{\rho}{\rho_l} \frac{1}{\alpha h} \right) (\Phi_u + f\Phi_{лт}) + \right. \\ \left. + 2 \frac{\rho}{\rho_l} \frac{\Omega_l}{Bh} (\Phi_r + f\Phi_{лт}) \right], \quad (3)$$

где $k_{сф} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}$, $k_{сф} = 0.5 \cdot 10^{-3} \text{кПа}^{-1}$;

$\text{tg}\varphi_{1\phi}$, $\sqrt{\text{tg}\varphi_{2\phi}/(1-\text{tg}^2\varphi_{2\phi})}$, $\gamma_{лт\phi}$, $\gamma_{сф}$, $\Phi_{лт}$, $\Phi_{с}$, $\Phi_{п}$, $\Phi_{пт}$, $\Phi_{и}$, $\Phi_{ит}$, $\Phi_{г}$, $\Phi_{гт}$, - коэффициенты формы носовой оконечности; h , D , α - толщина, цилиндрическая жесткость и параметр изгиба пластины на упругом основании; ρ и $\rho_{л}$ - плотность воды и льда; v , Fr_h - скорость хода, число Фруда по глубине; f - коэффициент трения льда о корпус судна; g - ускорение свободного падения; B - ширина по КВЛ; $\Omega_{л}$ - площадь поверхности корпуса, облегаемой битым льдом.

Эмпирические коэффициенты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Значения эмпирических коэффициентов

Обозначение	$k_{рсм}$	$k_{рв}$	$k_{осм}$	$k_{ов}$
Единица измерения	кПа ²	кПа ²	-	-
Значения	$1,3 \cdot 10^6$	$4,7 \cdot 10^6$	2,7	0,88

Сопротивление снега рассчитывается по формуле

$$R_c = k_{сн} g h_c \Omega_{л} (\Phi_{п} - f \Phi_{пт}).$$

$$k_{сн} = 0.3 \Gamma / \text{м}^3 \quad (4)$$

Расчёт производился для проектов речных ледоколов Р47, 16, 1105, 1191 следующим образом. Для различных толщин льда и скоростей движения судна вычислялось суммарное сопротивление снега и льда, затем подбиралась толщина незаснеженного льда, для которой сопротивление равнялось полученной ранее величине суммарного сопротивления. Результаты расчётов выборочно приведены на графиках (рис. 1).

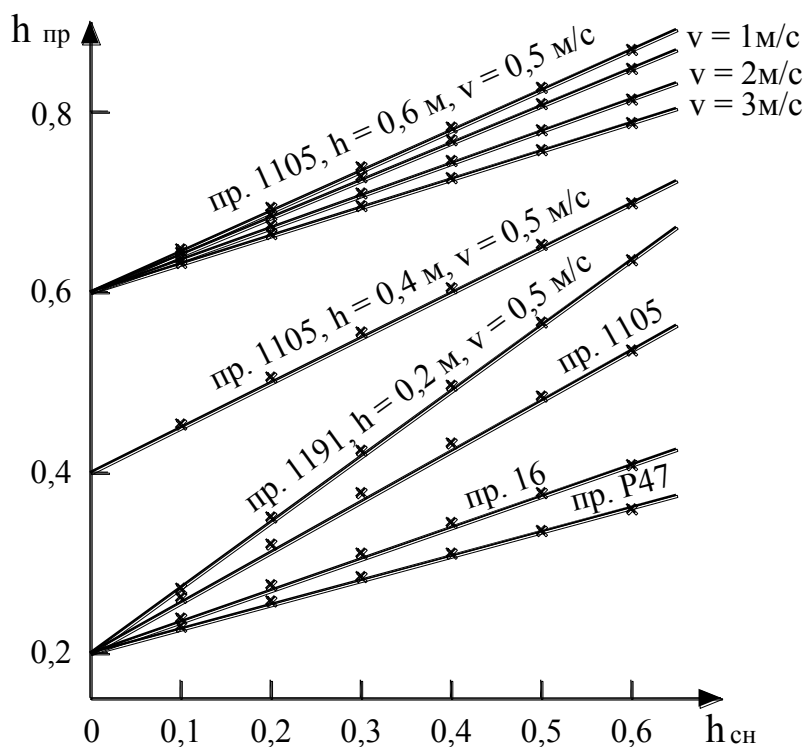


Рис. 1. Графики зависимостей приведённой толщины льда от толщины снега, толщины льда, скорости судна и проекта судна

Из анализа рис. 1 следует, что существует линейная зависимость, связывающая между собой толщины льда и снега и приведённую толщину льда $h_{пр}$.

$$h_{пр} = h + kh_{сн}, \quad (5)$$

где k – коэффициент приведения толщины снега к толщине льда.

При определении коэффициентов приведения k использовался метод наименьших квадратов. Эти коэффициенты получены для всех перечисленных ранее проектов речных ледоколов при разных толщинах льда и скоростях движения судна.

Как видно из рис. 1, коэффициент k зависит от скорости судна, толщины льда и проекта судна.

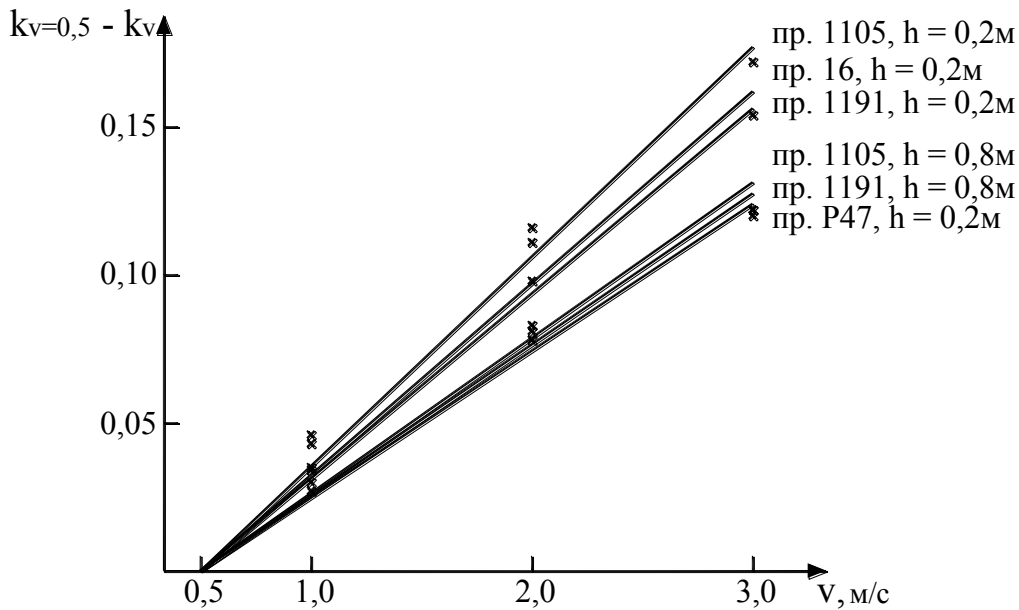


Рис. 2. Графики зависимостей уменьшения коэффициента k от его значения при скорости судна равной 0,5 м/с до значения при текущей скорости судна от скорости, толщины льда и проекта судна

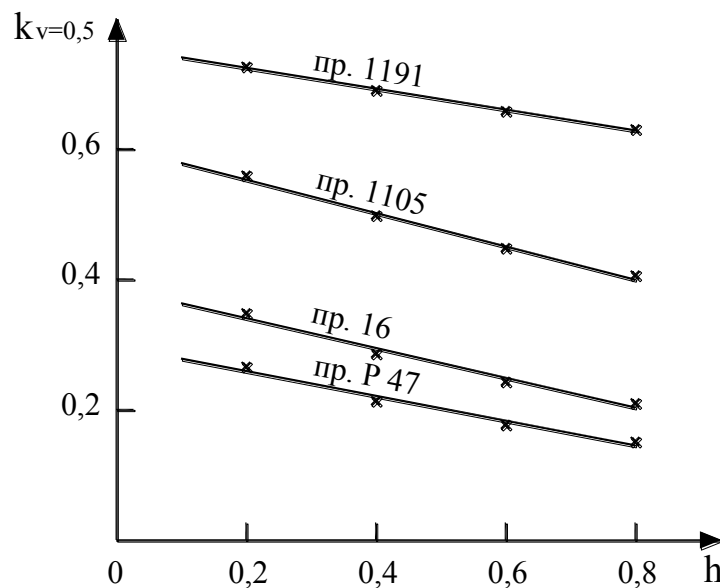


Рис. 3. Графики зависимостей значения коэффициента k при скорости судна равной 0,5 м/с от толщины льда и проекта судна

На рис. 2 приведены графики зависимостей уменьшения коэффициента k от его значения при скорости судна равной 0,5 м/с ($k_{v=0,5}$) до значения при текущей скорости судна (k_v) от скорости, толщины льда и проекта судна.

Из рис. 2 следует, что разность $k_{v=0,5} - k_v$ зависит от скорости судна и практически не зависит от проекта судна и от толщины льда. Зависимость разности $k_{v=0,5} - k_v$ от скорости судна можно аппроксимировать линейной регрессией:

$$k_{v=0,5} - k_v = a_0 + a_1 v \text{ или } k_v = k_{v=0,5} - a_0 - a_1 v.$$

На рис. 3 приведены графики зависимостей коэффициента $k_{v=0,5}$ от толщины льда и проекта судна.

Как видно из рис. 3, между коэффициентом $k_{v=0,5}$ и толщиной льда также существует линейная зависимость, т.е. можно записать:

$$k_{v=0,5} = a_0 + a_1 h. \quad (6)$$

Коэффициенты a_0 и a_1 из уравнения (2) различны для разных проектов судов. В качестве параметра, характеризующего проект судна, была принята площадь зоны облегания корпуса судна льдом ($\Omega_{\text{л}}$). Такой выбор был сделан на основании анализа формул для расчёта сопротивления льда и снега. Лишь некоторые составляющие сопротивления льда движению судна, а именно сопротивление притапливанию льдин и гидродинамическая часть сопротивления, обусловленная сопротивлением воды движению льдин, зависит от $\Omega_{\text{л}}$. В то же время между $\Omega_{\text{л}}$ и величиной сопротивления снега существует прямо пропорциональная зависимость. Величина приведённой толщины льда зависит от того, какую долю составляет сопротивление снега от суммарного сопротивления. С увеличением $\Omega_{\text{л}}$ эта доля растёт, и наоборот. В расчётной формуле для определения сопротивления снега не участвуют толщина льда и скорость судна, поэтому с ростом этих величин доля сопротивления снега от суммарного сопротивления уменьшается, и приведённая толщина льда также уменьшается.

На рис. 4 приведены графики зависимостей коэффициентов a_0 и a_1 из (6) от $\Omega_{\text{л}}$.

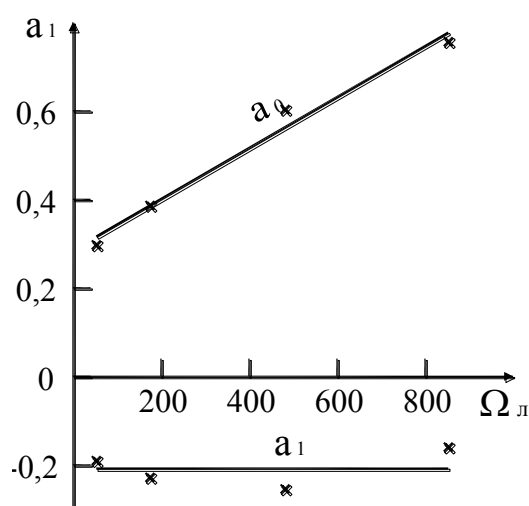


Рис. 4. Графики зависимостей коэффициентов линейной регрессии из выражения (6) от площади зоны облегания судна льдом

Как видно из рис. 4, коэффициент a_0 линейно зависит от $\Omega_{\text{л}}$, а коэффициент a_1 практически от неё не зависит.

С учётом сказанного получается следующая зависимость для определения коэффициента приведения:

$$k = a_0 + a_1 \Omega_{\text{л}} + a_2 h + a_3 v. \quad (7)$$

Коэффициенты $a_0 \div a_3$ определены с помощью метода наименьших квадратов. Окончательно выражение (7) запишется:

$$k = 0,284 + 0,575 \cdot 10^{-3} \Omega_{\text{л}} - 0,164h - 0,048v. \quad (8)$$

Учитывая, что площадь зоны облепания корпуса льдом в соответствии со схемой, принятой в [3], приближённо равна площади конструктивной ватерлинии от носового перпендикуляра до конца цилиндрической вставки, её следует вычислять по формуле:

$$\Omega_{\text{л}} = (L_{\text{нз}} \alpha_{\text{нз}} + L_{\text{цв}}) B$$

где $L_{\text{нз}}$ – длина носового заострения; $\alpha_{\text{нз}}$ – коэффициент полноты носовой ветви КВЛ.

В табл. 2 приведены значения $\Omega_{\text{л}}$ для проектов речных ледоколов.

Таблица 2

Значения величины площади зоны облепания судна льдом

№ проекта	P47	16	1105	1191
$\Omega_{\text{л}}, \text{м}^2$	53	175	482	853

Формула (8) получена для толщин льда в диапазоне $0,2 \div 0,8$ м, толщин снега в диапазоне $0 \div 0,6$ м и скоростей движения судна в диапазоне $0,5 \div 3$ м/с. Шаг для вычисления коэффициента k составил: по толщине льда – $0,2$ м; по толщине снега – $0,1$ м; по скорости движения судна – $0,5$ м/с.

Для оценки точности аппроксимации таблично заданной функции выражением (8) вычислены средние квадратичные отклонения σ значений коэффициента k , а также максимальные отклонения, взятые по модулю δ_{max} . Эти отклонения составили: $\sigma = 0,017$; $\delta_{\text{max}} = 0,055$.

Можно предположить, что рассматриваемая выборка из генеральной совокупности может представлять всю совокупность, так как охвачены все проекты речных ледоколов, имеющие к тому же сильно отличающуюся друг от друга площадь зоны облепания судна льдом, все толщины льда, которые речной ледокол может преодолевать непрерывным ходом, а также толщины снега и скорости движения судна, реально встречающиеся на внутренних водных путях. Максимальная возможная ошибка при вычислении эффективной толщины льда по предложенной формуле будет при толщине снега $0,6$ м и составит 3 см, что не превышает точности натуральных измерений. Разумеется, что точность расчётных значений определена по отношению к используемым методам определения ледового сопротивления.

В качестве примера покажем значения коэффициентов приведения k для случая, когда приведённая толщина ледяного покрова равна предельной, преодолеваемой ледоколом с минимальной устойчивой скоростью $0,5$ м/с. Расчёты выполнены для относительной толщины снежного покрова $h_{\text{сн}}/h = 0,5$ и приведены в табл. 3. В таблице также даны значения относительной приведённой толщины льда $h_{\text{пр}}/h$ и предельных толщин льда, для которых проводились расчёты.

Таблица 3

Коэффициенты приведения в предельных льдах

№ проекта	P47	16	1105	1191
$h_{\text{пр}}$	0,35	0,35	0,75	0,75
k	0,26	0,34	0,42	0,68
$h_{\text{пр}}/h$	1,13	1,17	1,21	1,34

Анализ проведённых исследований показывает, что приведённая толщина ледяного покрова с учётом снега зависит не только от толщины льда и снега, но и от геометрических параметров ледокола и скорости его движения. Это можно объяснить различной ролью отдельных составляющих в общем балансе ледового сопротивления.

Наличие снега на ледяном покрове существенно увеличивает приведённую толщину льда, а, следовательно, и полное ледовое сопротивление движению ледокола. Для приведённого в качестве примера расчётного случая движения речных ледоколов в предельных льдах коэффициент приведения снега колеблется в пределах $0,26 \div 0,68$, а приведённая толщина льда возрастает по сравнению с незаснеженным льдом в $1,13 \div 1,34$ раза.

Библиографический список

1. **Ионов, Б.П.** Ледовая ходкость судов / Б.П. Ионов, Е.М. Грамузов. – СПб.: Судостроение. 2001. – 512 с.
2. **Грамузов, Е.М.** Сопротивление снега при движении ледокола // Проектирование средств продления навигации: межвуз. сб. / Горьков. политехн. ин-т. – Горький, 1986. С. 59–71.
3. **Зуев, В.А.** Взаимодействие судов со льдом: учеб. пособие / В.А. Зуев, Е.М. Грамузов; Горьков. политехн. ин-т. – Горький, 1988. – 89 с.
4. **Зуев, В.А.** Средства продления навигации на внутренних водных путях / В.А. Зуев. – Л.: Судостроение, 1986. – 207 с.
5. **Сазонов, К.Е.** Теоретические основы плавания судов во льдах / К.Е. Сазонов. – СПб.: ЦНИИ им. акад. А.Н. Крылова, 2010. – 274 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

Е.М. Gramuzov, N.E. Tihonova

METHOD OF ACCOUNTING FOR THE INFLUENCE OF SNOW ON THE RESISTANCE ICEBREAKER DUE REDUCED THICKNESS SOLID ICE COVER

We propose a method of accounting for the influence of snow on the resistance of the icebreaker. Reduced thicknesses of the ice are used for this.

Key words: solid ice cover, snow, ice breaker resistance, the thickness of ice.

УДК 629.124.9.011.17-112

А. Ю. Панов, Вик. И. Хазова, Вер. И. Хазова

ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ НА ПРЯМОМ КУРСЕ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО КАТАМАРАНА С ПОДВОДНЫМИ КРЫЛЬЯМИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Изучена устойчивость на курсе высокоскоростного катамарана с подводными крыльями. Показано, что подобные суда обладают неасимптотической устойчивостью на курсе.

Ключевые слова: высокоскоростные катамараны, устойчивость на курсе.

Устойчивость движения судов на прямом курсе является совместно с поворотливостью составной частью управляемости судов. Поворотливость высокоскоростного катамарана с подводными крыльями исследовалась в [1]. В данной работе рассматривается численными методами по параметру угла курса φ устойчивость движения этого же катамарана. Отличительной особенностью высокоскоростных судов, в том числе и высокоскоростных катамаранов с подводными крыльями, является зависимость посадки и, следовательно, водоизмещения от скорости судна. Каждому значению скорости соответствуют свои значения угла дифферента и вертикальной координаты центра масс катамарана, которые определялись по данным модельного эксперимента [2]. В этом случае при каждом значении скорости катамарана допускается, что судно совершает плоское движение, которое описывается системой дифференциальных уравнений движения судна в горизонтальной плоскости [3]:

$$\begin{aligned}
 (M_c + \lambda_{11}) \frac{dV_x}{dt} - (M_c + \lambda_{22}) V_y \omega_z &= (-X_k - X_{ky}) \cos \beta - (Y_k + Y_{ky}) \sin \beta + \sum_{i=1}^n P_{bi} \cos \alpha_i - \\
 - \sum_{j=1}^m P_{xpj} \cos \beta + \sum_{j=1}^m P_{ypj} \sin \beta, \\
 (M_c + \lambda_{22}) \frac{dV_y}{dt} + (M_c + \lambda_{11}) V_x \omega_z &= (X_k + X_{ky}) \sin \beta - (Y_k + Y_{ky}) \cos \beta + \sum_{j=1}^m P_{xpj} \sin \beta + \\
 + \sum_{j=1}^m P_{ypj} \cos \beta, \\
 (J_z + \lambda_{66}) \frac{d\omega_z}{dt} + (\lambda_{22} - \lambda_{11}) V_x V_y &= M_k + M_{ky} - M_\omega + \sum_{j=1}^m P_{ypj} l_{xp},
 \end{aligned} \quad (1)$$

где M_c – масса судна; λ_{sk} – обобщенные присоединенные массы жидкости; J_x, J_y, J_z – моменты инерции судна относительно осей связанной с судном системы координат; $V_x, V_y, V_z, \omega_x, \omega_y, \omega_z$ – проекции векторов скорости центра масс и угловой скорости судна на оси связанной системы координат $Gxyz$; X_k, Y_k, M_k – гидродинамические силы и момент на корпусе высокоскоростного судна соответственно; P_b – упор гребного винта; P_{xp}, P_{yp} – сопротивление и боковая сила на рулях; M_ω – демпфирующий момент; n – число гребных валов; m – число средств управления; l_{xp} – расстояние от центра масс судна G до центра давления средств управления, измеренное вдоль оси Gx связанной с центром масс судна системы координат $Gxyz$.

В левую часть уравнений движения (1) входят присоединенные массы и моменты инерции катамарана. Они определяются по методике [4]:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{11к} &= 2f_{11к}\lambda_{111}; & \lambda_{22к} &= 2f_{22к}\lambda_{221}; \\ \lambda_{66к} &= 2f_{66к}\left[\lambda_{661} + \lambda_{111}\left(\frac{\bar{h}_B}{2}\right)^3\right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где λ_{111} , λ_{221} , λ_{661} – присоединенные массы одного корпуса катамарана; $f_{11к}$, $f_{22к}$, $f_{66к}$ – относительные коэффициенты присоединенных масс катамарана $\lambda_{11к}$, $\lambda_{22к}$, $\lambda_{66к}$.

Относительные коэффициенты присоединенных масс находятся по формулам

$$\left. \begin{aligned} f_{11к} &= 1; & f_{22к} &= -0,097\bar{h}_B^2 + 0,650\bar{h}_B - 0,053; \\ f_{66к} &= -0,047\bar{h}_B^2 + 0,340\bar{h}_B + 0,387. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $\bar{h}_B = \frac{h_B}{B_1}$ – относительный клиренс; h_B – клиренс катамарана – расстояние между диаметрными плоскостями корпусов катамарана; B_1 – ширина одного корпуса катамарана.

Присоединенные массы и моменты инерции одиночных корпусов определяются по формулам

$$\begin{aligned} \lambda_{22} &= m_{022}\rho\pi T^2 L \frac{\beta_{шп}^2}{1 + \beta_{шп}}, \\ \lambda_{66} &= m_{022} \frac{\rho\pi T^2}{12} L^3 \frac{\beta_{шп}^2}{(3 - \beta_{шп})(3 - 2\beta_{шп})^2}, \\ \lambda_{11} &= m_{\delta 1}\rho\pi T^2 B \frac{\delta^2}{1 + \delta}, \end{aligned} \quad (4)$$

где T , B – осадка и ширина корпуса по действующей ватерлинии; $\alpha_{вл}$ – коэффициент полноты действующей ватерлинии; $\beta_{шп}$ – коэффициент полноты наибольшего по площади шпангоута при действующей ватерлинии; δ – коэффициент полноты погруженной части диаметрального батокса; m_{0sk} – поправки Льюиса.

Поправка Льюиса для λ_{11} определяется по диаметральному батоксу [5]:

$$m_{022} = \frac{(1 + p)^2 + 3q^2}{(1 + p + q)^2}. \quad (5)$$

Параметры p и q определяются для миделевого шпангоута по формулам

$$\frac{1 + p + q}{1 - p + q} = \frac{2T}{B}, \quad \frac{(1 - p^2 - 3q^2)2T}{(1 + p + q)^2 B} = \beta_{\delta 1}. \quad (6)$$

Значения параметров p и q приведены в [5], либо их получают, решая два уравнения (6) совместно.

Поправка Льюиса $m_{\delta 1}$ также, по аналогии с m_{022} будет

$$m_{\delta 1} = \frac{(1 + p_{\delta})^2 + 3q_{\delta}^2}{(1 + p_{\delta} + q_{\delta})^2}, \quad (7)$$

$$\frac{1 + p_{\delta} + q_{\delta}}{1 - p_{\delta} + q_{\delta}} = \frac{2T}{L}; \quad \frac{\pi(1 - p_{\delta}^2 - 3q_{\delta}^2)}{4(1 + p_{\delta} + q_{\delta})^2} \cdot \frac{2T}{B} = \delta. \quad (8)$$

Коэффициенты полноты α , β определяются для каждого значения посадки катамарана.

В правые части уравнений (1) входят гидродинамические силы и моменты, действующие на катамаран (рис. 1).

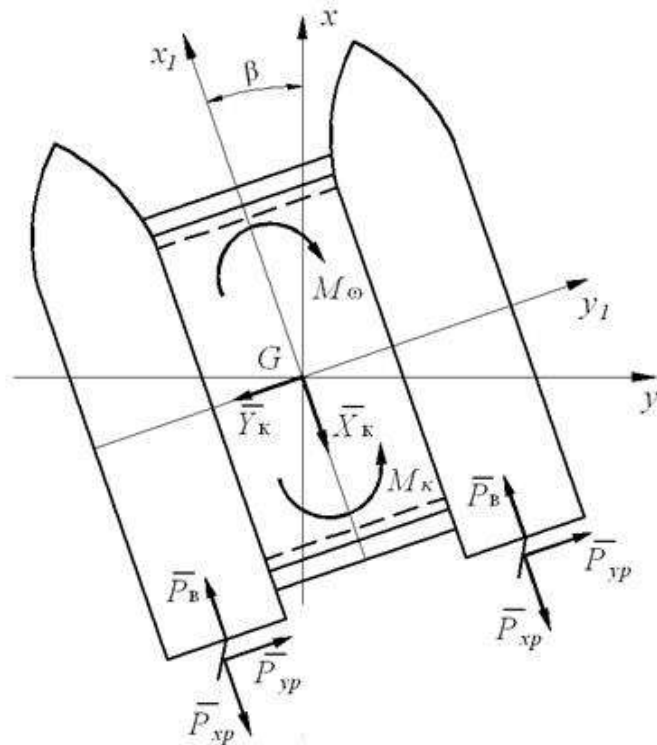


Рис. 1. Схема сил, действующих на высокоскоростной катамаран

Эксперимент для нахождения коэффициентов гидродинамических сил и моментов проводился в опытовом бассейне Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева [2]. Буксировка модели осуществлялась с помощью буксировочной тележки на скоростях 1, 1,5 и 2 м/с. Модель крепилась к тележке с помощью пилона, на модель дополнительно устанавливался двухкомпонентный динамометр, позволяющий измерить составляющую гидродинамической реакции X_K либо Y_K (в зависимости от схемы установки динамометра) и момент M_K . Прогонки модели осуществлялись с углами дрейфа $0 \dots 30^\circ$. Полученные по результатам эксперимента зависимости гидродинамических коэффициентов от угла дрейфа β приведены на рис. 2–4.

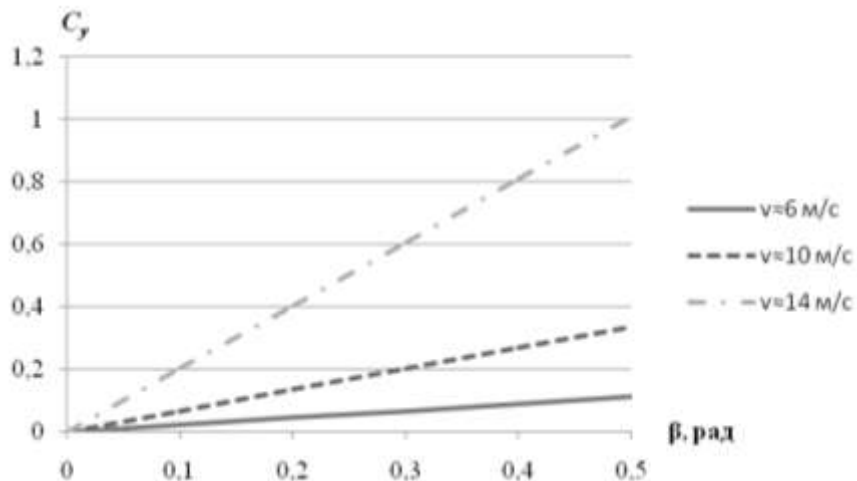
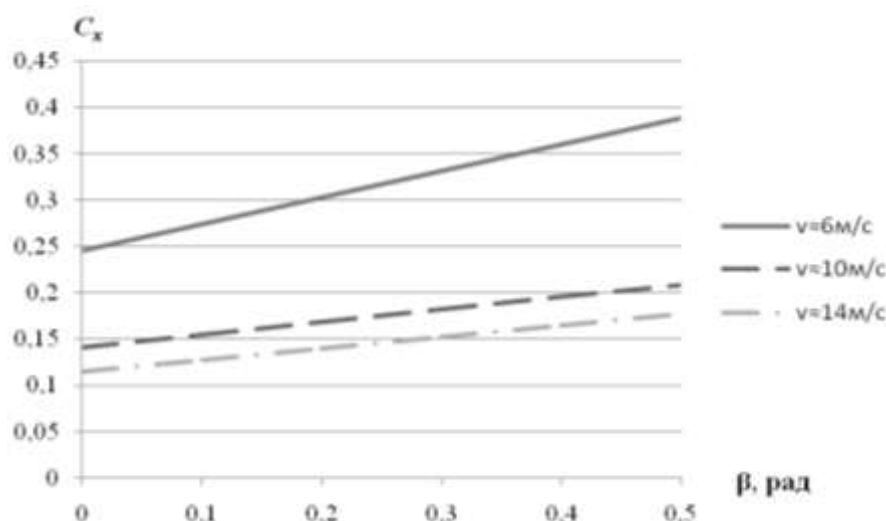
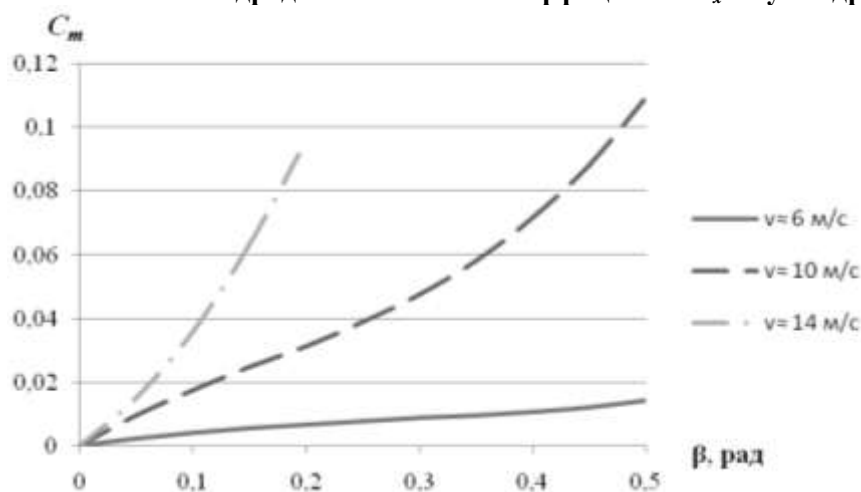


Рис. 2. Зависимость гидродинамического коэффициента C_y от угла дрейфа β

Рис. 3. Зависимость гидродинамического коэффициента C_x от угла дрейфа β Рис. 4. Зависимость гидродинамического коэффициента C_m от угла дрейфа β

Демпфирующий момент корпусов катамарана определялся по методике [6]:

$$M_{\omega} = -C_m^{\omega} \frac{\rho}{2} V S_d L^2 \omega, \quad (9)$$

где S_d – площадь погруженного в воду диаметрального батокса судна, определяемая по формуле $S_d = \frac{\sigma_d}{LT}$; σ_d – коэффициент полноты площади S_d ; C_m^{ω} – коэффициент демпфирующего момента, определяемый по работе [6].

Гидродинамические силы на рулях определялись по методике [6], а упор гребных винтов – по работе [7].

Пусть катамаран движется прямолинейно, равномерно, поступательно. В соответствии с принципом Галилея, такое движение не отличается от состояния равновесия. Система (1) тождественно выполняется и является системой уравнений равновесия. В этом случае устойчивость движения можно исследовать по А.М. Ляпунову. Если задать какому-либо параметру движения катамарана малое возмущение, то система (1) становится системой дифференциальных уравнений возмущенного движения, на основе которой выполняется численное исследование устойчивости движения катамарана.

Расчет возмущенного движения высокоскоростного катамарана производился на скоростях 3, 4, 5, 8 и 14 м/с при переключке руля в течение 20 с на 5° . График зависимости угла переключки α от времени при мгновенном возмущении представлен на рис. 5.

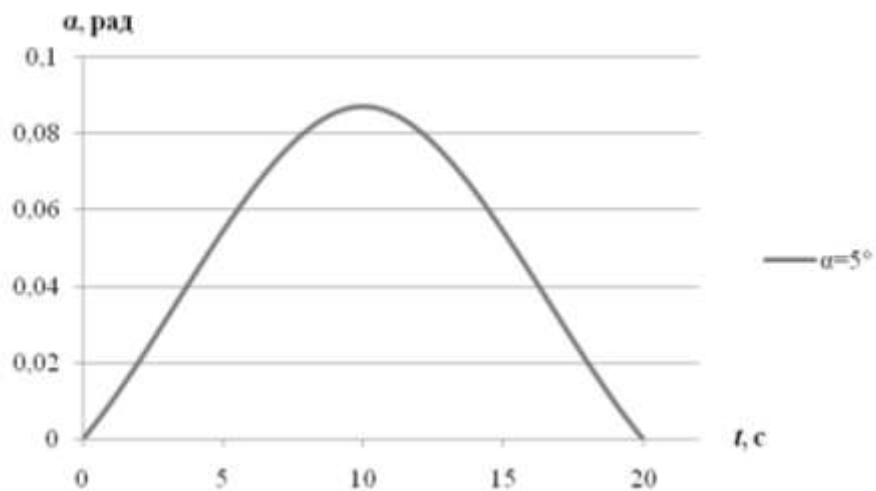


Рис. 5. Зависимость углов перекадки руля α от времени t

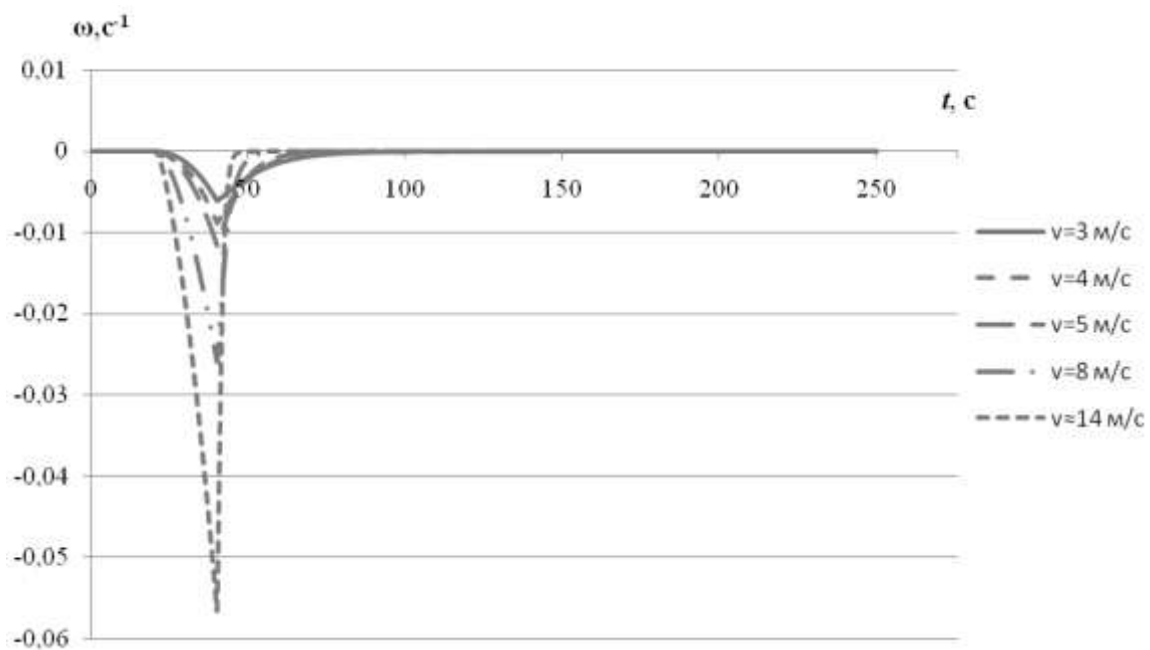


Рис. 6. Зависимость угловой скорости ω от времени при $\alpha=5^\circ$

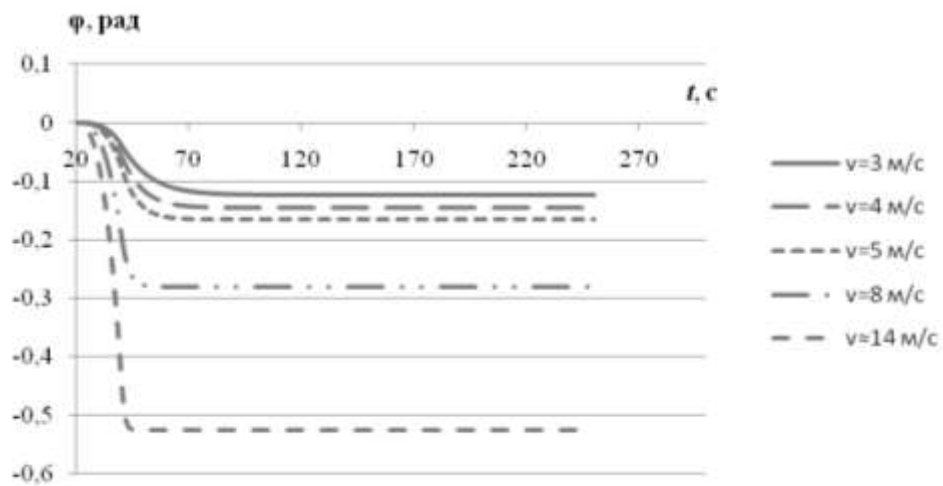


Рис. 7. Зависимость угла курса ϕ от времени при $\alpha=5^\circ$

При этом рассчитывались скорость центра масс катамарана, угловая скорость катамарана ω и угол курса φ .

На рис. 6 и рис. 7 приведены полученные зависимости угловой скорости ω и угла курса φ от времени на различных скоростях возмущенного движения.

На рис. 8 представлена сводная диаграмма, демонстрирующая зависимость угла курса φ от времени на различных скоростях возмущенного движения.

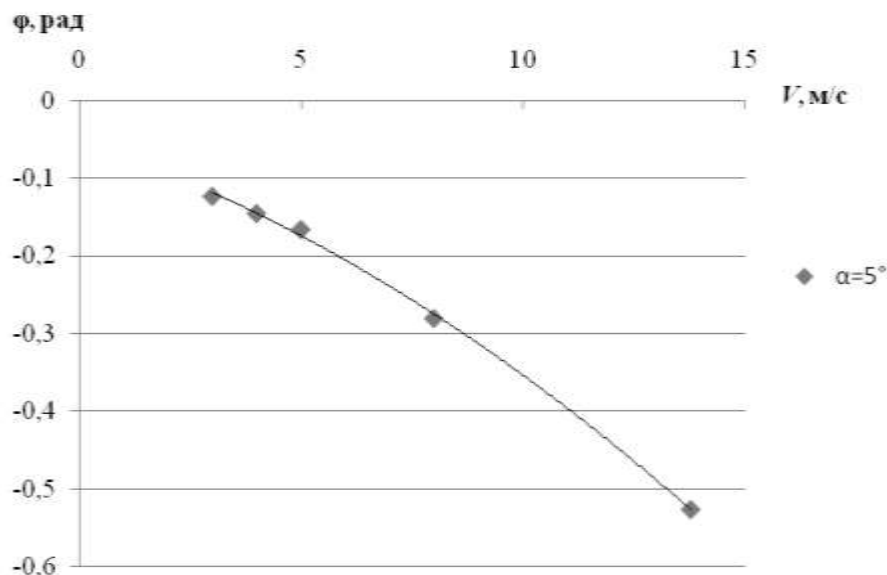


Рис. 8. Диаграмма курсовых углов

Полученная диаграмма курсовых углов может использоваться для определения угла курса на различных скоростях возмущенного движения катамарана.

По результатам численного исследования возмущенного движения катамарана можно сделать следующие выводы.

После прекращения возмущающего воздействия катамаран выходит на новый курс и продолжает устойчиво двигаться с этим курсовым углом, то есть судно обладает неасимптотической устойчивостью.

Полученные зависимости $\varphi = f(t)$ не имеют экстремумов. Это означает, что после прекращения возмущения рули катамарана переключаются в исходное положение, но угол курса не приводится к первоначальному значению, что демонстрирует наличие у катамарана гидродинамического люфта, отмеченного для водоизмещающих судов профессором В.Г. Павленко [8].

Для возвращения катамарана на исходный курс необходимо дополнительное симметричное возмущение в виде перекладки рулей на аналогичный угол той же продолжительности.

С увеличением скорости катамарана при одинаковых возмущениях рулей отклонение от первоначального курса нарастает.

Библиографический список

1. **Хазова, Вик. И.** Исследование управляемости высокоскоростных пассажирских катамаранов на подводных крыльях // Транспортное дело России. 2011. №2. С. 58–61.
2. **Хазова, Вер. И.** Экспериментальное определение гидродинамических характеристик скоростного катамарана / Вер. И. Хазова, Вик. И. Хазова, И. Д. Краснокутский // Современные технологии в кораблестроит. и авиац. образовании, науке и производстве: матер. Всеросс. научно-техн. конф.; НГТУ. – Н. Новгород, 2009. С. 137–141.
3. **Басин, А.М.** Ходкость и управляемость судов / А.М. Басин. – М.: Транспорт. 1977. – 451 с.

4. **Васильев, А.В.** Управляемость судов / А.В. Васильев. – Л.: Судостроение, 1989. – 328 с.
5. **Хаскинд, М.Д.** Гидродинамическая теория качки корабля / М. Д. Хаскинд. – М.: Наука, 1973. – 328 с.
6. **Войткунский, Я.И.** Справочник по теории корабля. Судовые движители и управляемость / Я. И. Войткунский, Р. Я. Першиц, И. А. Титов. – Л.: Судостроение. 1973. – 512 с.
7. **Панов, А.Ю.** Расчет упора кавитирующих гребных винтов быстроходных судов // НТО им. акад. А. Н. Крылова. – Л., 1978. Вып. 282. С. 78–83.
8. Ходкость и управляемость судов / под ред. В.Г. Павленко. – М.: Транспорт, 1991. – 397 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

Alexey Y. Panov, Vic. I. Khazova, Ver. I. Khazova

**NUMERIC RESEARCH ON STABILITY OF HIGH-SPEED HYDROFOIL
CATAMARAN AT DIRECT COURSE MOVEMENT**

Course stability of high-speed hydrofoil catamarans is studied. It is shown that nonasymptotic course stability is characteristic of such type of vessel.

Key words: high-speed catamarans, course stability.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314.222.6

А.С. Серебряков¹, Д.А. Семенов²

ТЕСТОВАЯ ДИАГНОСТИКА КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ АПК

Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения¹,
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт²

Предложено устройство для диагностики состояния корпусной изоляции распределительных трансформаторов по напряжению саморазряда и возвратному напряжению.

Ключевые слова: диагностики высоковольтной изоляции, заряд абсорбции, ток абсорбции, напряжение саморазряда, возвратное напряжение постоянные времени саморазряда, схема замещения корпусной изоляции трансформатора, износ изоляции.

Распределительные трансформаторы напряжением 6-10 кВ являются одним из важнейших устройств систем электроснабжения объектов АПК. Трансформаторы, как и другие электрические машины и аппараты могут нормально работать лишь с исправной изоляцией. В процессе эксплуатации из-за увлажнения, перегрева, динамических нагрузок и перенапряжений происходит общее старение изоляции, т.е. ухудшение ее физико-химических характеристик. В изоляции возникают распределенные и местные (сосредоточенные) дефекты, которые в конечном итоге приводят к пробое.

Ресурс изоляции, как правило, определяет и ресурс трансформаторов. Многочисленные исследования показали, что в подавляющем числе случаев причиной отказов распределительных трансформаторов является нарушение работы его изоляционной системы. При этом более 25% отказов приходится на долю корпусной изоляции.

Чтобы своевременно выявлять развивающиеся дефекты и не допускать внезапных пробоев электрической изоляции, свойства ее в процессе эксплуатации периодически проверяют. Такие мероприятия обеспечивают поддержание необходимой степени надежности электрооборудования в процессе его эксплуатации. Периодический контроль с целью прогнозирования расходования ресурса трансформаторного оборудования необходим и для обоснования выбора очередности замены этого оборудования. Это особенно важно на современном этапе эксплуатации энергетических систем, когда более 70% основного трансформаторного оборудования уже выработало свой ресурс времени, регламентированный нормативными документами.

Периодичность и нормы испытаний устанавливаются стандартами, Правилами технической эксплуатации и ведомственными инструкциями для каждого вида оборудования. При такой системе обслуживания контроль и ремонт оборудования производят по времени эксплуатации.

Как показывает практика, такая система технического обслуживания не является оптимальной. Большие резервы повышения эффективности эксплуатации трансформаторов и другого электрооборудования заложены в системе обслуживания по реальной потребности или по реальному техническому состоянию. Переход к такой системе невозможен без использования современных приборных средств, основанных на надежных и научно обосно-

ванных методах выявления дефектов и оценки технического состояния изоляции. Эти вопросы решает техническая диагностика [1, 2].

Одним из эффективных неразрушающих методов тестового контроля состояния главной изоляции является метод, основанный на использовании явления абсорбции. Известно, что о состоянии изоляции и степени ее старения судят по току абсорбции, или точнее, по коэффициенту абсорбции, который определяют как отношение одноминутного значения сопротивления изоляции к пятнадцатисекундному значению ее.

Коэффициент абсорбции дает объективную оценку состояния изоляции, так как учитывает заряд абсорбции. Однако контроль заряда абсорбции по току абсорбции неудобен тем, что ток абсорбции мал и промышленные помехи сильно искажают его. Поэтому удобнее пользоваться другими методами обнаружения явления абсорбции. Так, например, на практике можно применить метод измерения *напряжения саморазряда и возвратного напряжения*. Рассмотрим подробнее эти явления.

С учетом электропроводности и поляризации схема замещения изоляции в простейшем случае может быть представлена как параллельное соединение резистора R и конденсатора C (рис. 1, а). Если зарядить конденсатор C , зашунтированный резистором R , до напряжения U_0 (переключатель $P1$ в положении 1), а затем отключить его от источника напряжения и оставить разомкнутым (переключатель $P1$ в положении 2), то конденсатор C будет постепенно разряжаться на резистор R . При этом напряжение на конденсаторе u_C , называемое напряжением саморазряда, измеряемое измерителем напряжения $И_2$, будет изменяться по закону затухающей экспоненты (рис. 1, б):

$$u_C = U_0 e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (1)$$

Величину $\tau = RC$ называют постоянной времени саморазряда конденсатора C . Она измеряется в секундах и равна тому промежутку времени, в течение которого напряжение на конденсаторе C уменьшится в $e=2,718$ раза и составит $0,368U_0$. Чем больше постоянная времени, тем медленнее идет процесс саморазряда. Если представить себе, что в качестве изолятора используется диэлектрик прямоугольной формы, площадь поперечного сечения которого S , а толщина h , то формула для постоянной времени τ примет вид:

$$\tau = RC = \rho_V \frac{h}{S} \cdot \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r S}{h} = \varepsilon_0 \varepsilon_r \rho_V. \quad (2)$$

Здесь ρ_V - удельное объемное сопротивление диэлектрика, ε_0 - электрическая постоянная, ε_r - относительная диэлектрическая проницаемость диэлектрика. Из формулы (2) следует важный вывод: постоянная времени саморазряда изоляции $\tau = RC$ не зависит от геометрических размеров изоляции, а определяется исключительно свойствами изоляции ε_r и ρ_V . Более строгий анализ показывает, что постоянная времени не зависит и от формы изоляции.

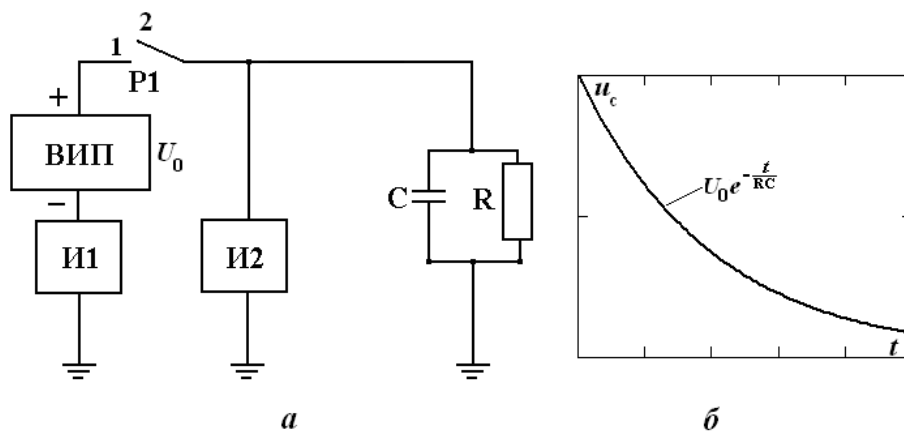


Рис. 1. Схема для измерения напряжения саморазряда (а) и зависимость напряжения саморазряда от времени (б)

В действительности главная или корпусная изоляция силовых трансформаторов состоит из нескольких изоляционных элементов, различных по конструкции и по электрическим параметрам. Комбинация нескольких диэлектриков с разными электрическими параметрами позволяет получить наиболее благоприятные свойства изоляционной конструкции. Это обстоятельство делает главную изоляцию неоднородной. Поэтому корпусная изоляция представляется схемой замещения, состоящей не из одного слоя, а из нескольких слоев, каждый из которых имеет свое сопротивление, емкость и постоянную времени.

Для упрощения анализа процессов представим схему замещения корпусной изоляции, как простейшую модель неоднородного диэлектрика, состоящего из двух слоев, обладающих различными сопротивлениями R_1 и R_2 и емкостями C_1 и C_2 (рис. 2, а). В действительности число слоев может быть равно трем и более. Для модели двухслойной изоляции после отключения ее от источника напряжения заряженные конденсаторы C_1 и C_2 слоев неоднородной изоляции будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 . Напряжение саморазряда будет равно сумме напряжений на отдельных слоях изоляции, то есть будет равно сумме экспонент:

$$u_C = U_{01}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{\tau_2}} = U_{01}e^{-\frac{t}{R_1C_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{R_2C_2}}. \quad (3)$$

Если изоляция заряжалась в течение длительного времени, то напряжения на слоях в начальный момент времени саморазряда будут прямо пропорциональны значениям активных сопротивлений слоев:

$$U_{01} = \frac{U_0R_1}{R_1 + R_2} = \frac{U_0R_1}{R_{60}}, \quad U_{02} = \frac{U_0R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_0R_2}{R_{60}}. \quad (4)$$

Здесь $R_{60} = R_1 + R_2$ - одноминутное значение сопротивления изоляции.

Зная зависимость u_C от времени, можно в соответствии с выражением (3) определить начальные напряжения U_{01} , U_{02} , τ_1 и τ_2 . Далее по ним можно рассчитать параметры схемы замещения R_1 , R_2 , C_1 и C_2 . Значения этих параметров позволят рассчитать ток абсорбции, заряд абсорбции, коэффициент абсорбции, $\text{tg}\delta$ и отношение $\frac{C_2}{C_{50}}$, не измеряя их непосредственно. Например, поглощенный заряд абсорбции на границе раздела двух сред можно вычислить по формуле

$$Q_{\text{ГР}} = \frac{U_0(R_2C_2 - R_1C_1)}{R_1 + R_2}. \quad (5)$$

Полученные параметры существенно различаются в зависимости от степени старения изоляции и позволяют объективно судить о ее состоянии. Однако о состоянии изоляции можно судить без вычисления указанных параметров, а непосредственно по измеренным значениям напряжения саморазряда и возвратного напряжения. Поясним сказанное подробнее.

За счет разной поляризации слоев от источника напряжения к изоляции в течение непродолжительного времени притекает ток абсорбции, который измеряют измерителем тока I_1 (рис. 2, а). За счет тока абсорбции на границе раздела слоев накапливается объемный заряд внутреннего поглощения (заряд абсорбции). Следовательно, о процессе абсорбции можно судить не только по току абсорбции, но и по накопленному (поглощенному) заряду абсорбции, который создает возвратное напряжение.

Опыт, в котором наблюдается возвратное напряжение, состоит в следующем (рис. 2, а). Неоднородная изоляция заряжается в течение одной минуты при постоянном напряжении, чтобы в ней накопился заряд абсорбции (переключатели P1 и P2 замкнуты). Затем изоляция

отключается от источника постоянного напряжения (переключатель P1 разомкнут) и ее электроды замыкаются переключателем P2 накоротко на очень малый промежуток времени Δt , после чего вновь размыкаются. За время Δt геометрическая емкость C_T полностью разряжается, а заряд абсорбции, накопленный на границе слоев, остается практически неизменным. Этот заряд распределится на обе емкости и зарядит их до одинакового напряжения U_{0B} . После размыкания внешних электродов изоляции емкости C_1 и C_2 вновь оказываются соединенными последовательно. Емкости C_1 и C_2 будут разряжаться на сопротивления утечки своих слоев R_1 и R_2 с разной скоростью, так как постоянные времени слоев R_1C_1 и R_2C_2 неодинаковы. На изоляции появится напряжение u_6 , равное разности двух экспонент (рис. 2, б):

$$u_6 = U_{0B} e^{-\frac{t}{R_2C_2}} - U_{0B} e^{-\frac{t}{R_1C_1}}. \quad (6)$$

Это напряжение и называют возвратным напряжением. Его измеряют измерителем И2. По значению и форме возвратного напряжения можно судить о состоянии изоляции.

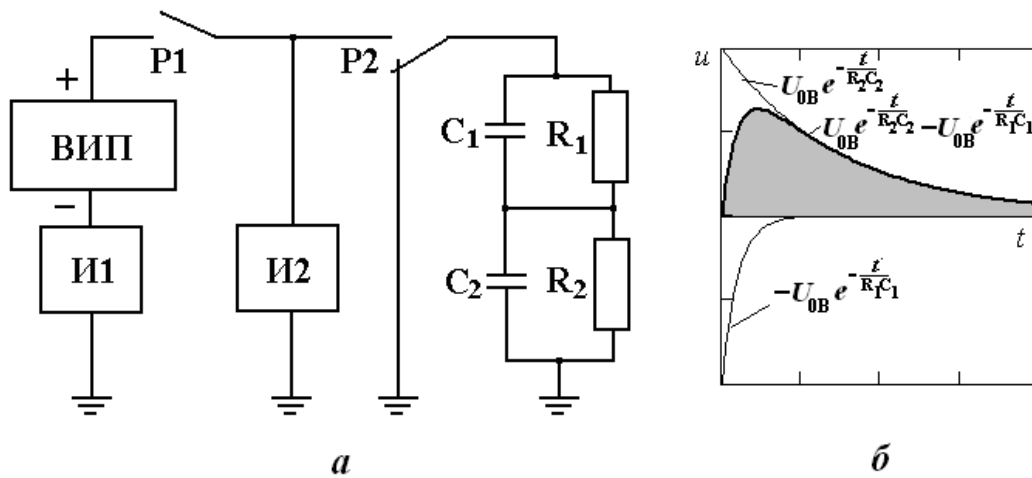


Рис. 2. Принципиальная схема устройства для измерения возвратного напряжения и напряжения саморазряда (а) и зависимость возвратного напряжения от времени

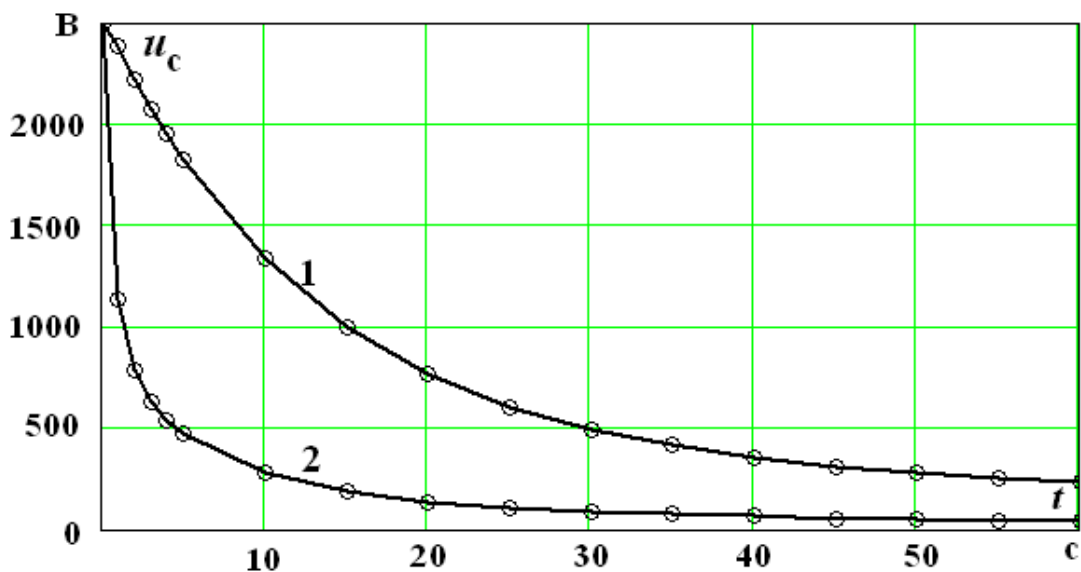


Рис. 3. Кривые напряжения саморазряда нового трансформатора (кривая 1) и трансформатора после 28 лет эксплуатации (кривая 2)

Для измерения рассмотренных выше параметров: сопротивления изоляции, кривой саморазряда и возвратного напряжения авторами в соответствии со схемой 2, а разработано устройство, которое снабжено программируемым микроконтроллером и позволяет измерять параметры изоляции в течение одной минуты через каждую секунду

На рис. 3 показаны зависимости напряжения саморазряда для нового трансформатора при вводе его в эксплуатацию (кривая 1) и после 28 лет эксплуатации (кривая 2). Крестиками на рис. 3 показаны измеренные значения.

Исследования показывают, что кривую 2 на рис. 3 можно аппроксимировать суммой трех экспонент:

$$u_{C(2)} = U_{01}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + U_{02}e^{-\frac{t}{\tau_2}} + U_{03}e^{-\frac{t}{\tau_3}} = 1504e^{-\frac{t}{0,5}} + 764e^{-\frac{t}{5}} + 232e^{-\frac{t}{30}}. \quad (7)$$

Три экспоненты соответствуют трем слоям изоляции: первая экспонента с постоянной времени $\tau_1=0,5$ с соответствует слою трансформаторного масла, вторая экспонента с постоянной времени $\tau_2=5$ с соответствует барьеру между обмотками и третья экспонента с постоянной времени $\tau_3=30$ с соответствует изоляции обмотки. Эти три слоя изоляции имеют соответственно сопротивления изоляции:

$$R_1 = \frac{U_{01}}{U_0} R_{60} = \frac{1504}{2500} 145 = 87,2 \text{ МОм};$$

$$R_2 = \frac{U_{02}}{U_0} R_{60} = \frac{764}{2500} 145 = 44,3 \text{ МОм};$$

$$R_3 = \frac{U_{03}}{U_0} R_{60} = \frac{232}{2500} 145 = 13,5 \text{ МОм}.$$

Здесь $R_{60} = 145$ МОм – одноминутное значение сопротивления изоляции рассматриваемого трансформатора.

Электрические емкости указанных слоев изоляции равны:

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} = \frac{0,5}{87,2} = 0,0057 \text{ мкФ};$$

$$C_2 = \frac{\tau_2}{R_2} = \frac{5}{44,3} = 0,113 \text{ мкФ};$$

$$C_3 = \frac{\tau_3}{R_3} = \frac{30}{13,5} = 2,22 \text{ мкФ}.$$

По известным параметрам схемы замещения можно определить протекание абсорбционных процессов. Однако наиболее ярко их проявления можно наблюдать при измерении возвратного напряжения.

На рис. 4 показаны зависимости возвратного напряжения тех же трансформаторов: нового трансформатора при вводе его в эксплуатацию (кривая 1) и после 28 лет эксплуатации (кривая 2). Зависимости на рис. 3 и 4 измерены при температуре трансформатора 28°C.

Как показали исследования, наиболее информативным является напряжение саморазряда, измеренное на 15 секунде и возвратное напряжение, измеренное на 30-й секунде после начала измерения, которые обозначают u_{c15} и $u_{в30}$.

Из рис. 3 и рис. 4 видно, что в течение срока эксплуатации изоляция стареет и напряжение саморазряда и возвратное напряжение снижаются (напряжение саморазряда u_{c15}

снижается примерно на 28–30 В за год, а возвратное напряжение $u_{в30}$ – примерно на 6–7 В за год). Существенно изменяется и момент времени, при котором наблюдается максимум возвратного напряжения.

Трансформаторы, у которых $u_{с15}$ меньше 100 В и $u_{в30}$ меньше 15 В следует считать изношенными по изоляции более чем на 80% и при возможности заменять их новыми трансформаторами.

Итак, о старении изоляции без ее разрушения, как показали исследования, можно судить по характеру процессов поляризации, а именно по величине возвратного напряжения. С увеличением срока эксплуатации изоляция изнашивается, ее электрическая прочность снижается. С ростом эксплуатации уменьшается и возвратное напряжение, которое может характеризовать состояние изоляции даже лучше чем пробивное напряжение, которое характеризует лишь кратковременную прочность изоляции и в ряде случаев она может быть достаточно высокой. Однако электрическая прочность при длительном воздействии напряжения оказывается недостаточной из-за ухудшившихся электрических характеристик изоляции. В частности, в процессе старения изоляции увеличиваются диэлектрические потери, которые могут привести к тепловому пробую изоляции при длительном приложении напряжения.

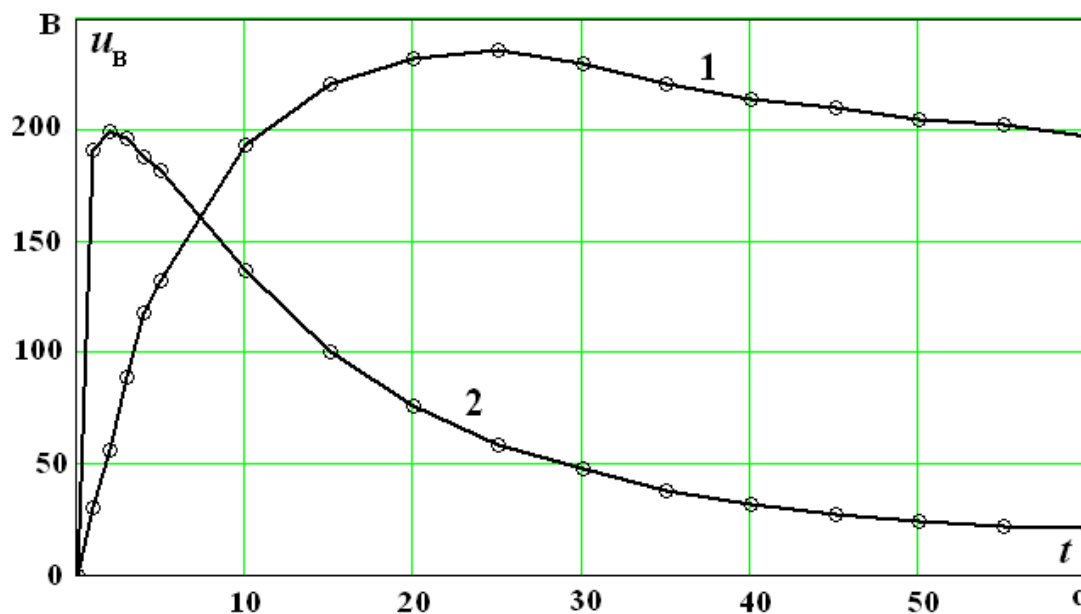


Рис. 4. Кривые возвратного напряжения нового трансформатора (кривая 1) и трансформатора после 28 лет эксплуатации (кривая 2)

Для каждого вида изоляции существует свой внутренний ресурс, который характеризуется способностью изоляции в течение определенного времени выдерживать приложенное напряжение и противостоять разрушающему воздействию процессов, протекающих при этом напряжении.

Внутренний ресурс у каждого вида новой изоляции есть величина постоянная, и естественно он постепенно уменьшается с ростом срока службы. Уменьшается и возвратное напряжение. Следовательно, величина возвратного напряжения в настоящее время лучше, чем какой-либо другой параметр характеризует изношенность изоляции.

В заключении отметим, что при неразрушающих испытаниях для оценки качества изоляции большое значение имеет изменение ее характеристик во времени. Поэтому с повышением частоты контроля увеличивается вероятность своевременного выявления дефектов.

Библиографический список

1. Объем и нормы испытаний электрооборудования / под общей ред. Б.А. Алексеева, Ф.Л. Когана, Л.Г. Мамиконянца. – М.: Издательство НИЦ ЭНАС, 2001. – 256 с.
2. **Серебряков, А.С.** Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы: учеб. пособие для вузов ж.-д. транспорта / А.С. Серебряков. – М.: Маршрут, 2005. – 280 с.

*Дата поступления
в редакцию 18.10.2011*

A.S. Serebryakov. D.A. Semenov

TEST DIAGNOSTICS OF FRAME INSULATION OF DISTRIBUTING TRANSFORMERS IN AGRIBUSINESS INDUSTRY

There was proposed the facility for diagnostics at self-discharge voltage and back voltage in frame insulation of distributing transformers.

Key words: diagnostics of high-voltage insulation, absorption charge, absorption current, self-discharge voltage, back voltage, characteristics time of self-discharge, equivalent network of frame insulation of transformer, insulation deprecation.

УДК 621.331 :621.311.025

Л.А. Герман¹, А.С. Серебряков², Д.Е. Дулепов²**ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ДВУХСТУПЕНЧАТОЙ
УСТАНОВКЕ ПОПЕРЕЧНОЙ ЕМКОСТНОЙ КОМПЕНСАЦИИ
В СИСТЕМЕ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ**Нижегородский филиал Московского государственного университета путей сообщения¹,
Нижегородский государственный инженерно-экономический институт²

Исследованы переходные процессы при включении второй ступени двухступенчатой установки поперечной емкостной компенсации (КУ) в тяговых сетях железных дорог. Предложены технические решения для повышения эксплуатационной надежности КУ.

Ключевые слова: поперечная емкостная компенсация, двухступенчатая регулируемая установка, перенапряжения, коммутация, переходные процессы.

Необходимость поперечной емкостной компенсации (КУ) в тяговой сети переменного тока с учетом специфики электроснабжения железных дорог [1] диктуется следующими требованиями:

1. Повышение пропускной способности участков железной дороги. Эта проблема возникает с ростом грузопотока по железной дороге, когда напряжение на токоприемнике электровагона достигает наименьшего допустимого напряжения 21 кВ и ниже.

2. Требования региональных электроснабжающих сетевых компаний по компенсации реактивной мощности до нормированных значений [2]. Для тяговых подстанций 110 кВ нормированное значение характеризуется коэффициентом реактивной мощности $\text{tg}\varphi = 0,5$.

3. Включение КУ позволяет снизить потери мощности и электроэнергии. В частности, в тяговой сети потери мощности от протекания реактивных токов составляют 20...30% от суммарных потерь.

Спецификой тяговой нагрузки является ее неравномерность. Поэтому в связи с постоянно изменяющейся тяговой нагрузкой включение нерегулируемой КУ приводит к повышению напряжения, когда нагрузка уменьшается и становится близкой к нулю. Чтобы не допустить повышения напряжения, мощность КУ в этом случае должна быть снижена. Таким образом, в системе тягового электроснабжения источник реактивной мощности должен быть регулируемым, чтобы генерируемая КУ реактивная мощность была пропорциональна тяговой нагрузке.

Анализ состояния имеющихся технических решений показывает, что в настоящее время и в ближайшей перспективе реально выполнить регулирующую КУ ступенчатой с небольшим числом ступеней [1, 4].

Схема двухступенчатой КУ показана на рис. 1. Обе ступени подключены к шинам 27,5 кВ. Первая ступень настроена на фильтрацию третьей гармоники, а вторая – на фильтрацию пятой гармоники. Для компенсации реактивной мощности сначала всегда включается первая ступень и при повышении тяговой нагрузки к ней подключается вторая. При снижении нагрузки отключается сначала вторая ступень, а затем при необходимости и первая ступень. Порядок включения первой ступени следующий: включается вакуумный выключатель В11 (27,5 кВ), затем включается вакуумный выключатель В12 (10 кВ), шунтирующий демпфирующий резистор R1. Отключение первой ступени происходит в обратном порядке. Вторая ступень, так же как и первая, включается с помощью вакуумного выключателя В21 сначала через демпфирующий резистор R2, который затем шунтируется выключателем В22.

Как показали исследования, проведенные авторами, при включении второй ступени

КУ выключателем В21 и при шунтировании демпфирующего резистора R2 при работе первой ступени в штатном режиме образуется колебательный контур, содержащий последовательно включенные конденсаторы C1 и C2, а также реакторы L1 и L2. Токи реакторов и напряжения на конденсаторах в момент коммутации не равны друг другу. Поэтому в контуре возникает колебательный переходный процесс, причем колебания увеличивают напряжение не только на конденсаторе C2 вводимой в работу второй ступени, но и на конденсаторе C1 первой ступени, работающей в штатном режиме (рис. 2 и рис. 3).

Осциллограммы включения второй ступени КУ (рис. 2 и рис. 3) свидетельствует о перенапряжениях в переходном процессе длительностью до 8 периодов и более. Токи и напряжения i_1, u_{c1} и i_2, u_{c2} относятся соответственно к первой и второй ступеням КУ. Напряжения и токи даны в относительных единицах. За единицу напряжения принято номинальное напряжение контактной сети 27,5 кВ. Напряжение на конденсаторе первой ступени в номинальном режиме составляет 1,146 $U_{ном}$, а на конденсаторе второй ступени - 1,045 $U_{ном}$. За единицу тока принят номинальный суммарный ток КУ при включенной 1-й и 2-й ступенях.

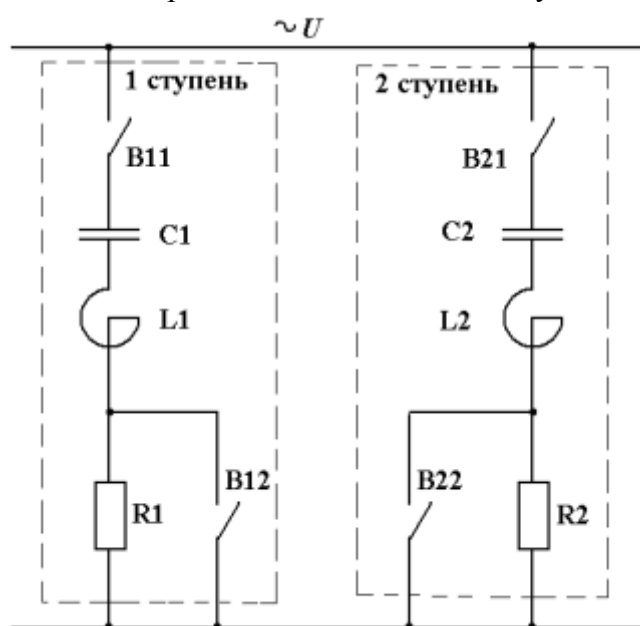


Рис. 1. Схема двухступенчатой КУ

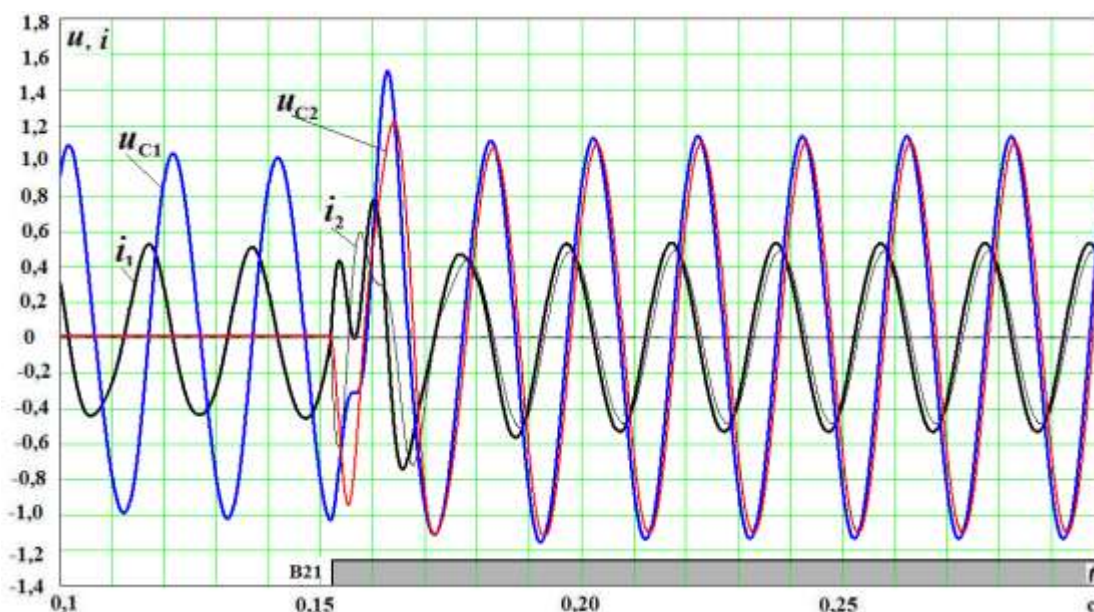


Рис. 2. Переходный процесс при включении второй ступени двухступенчатой КУ и включенной в штатном режиме первой ступени

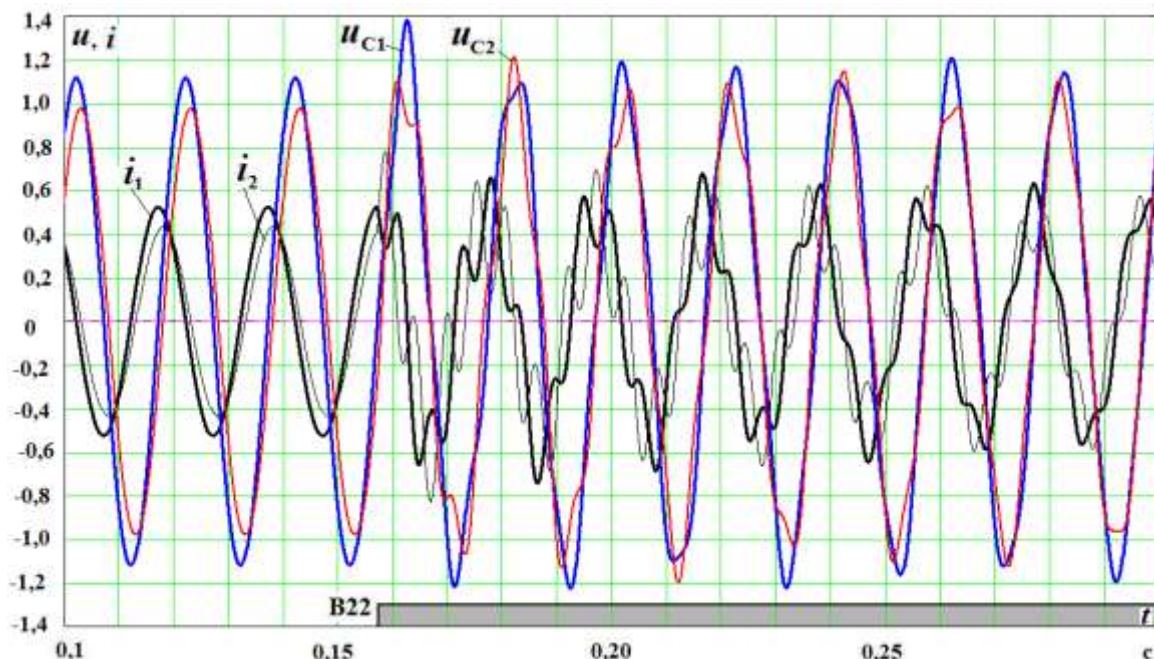


Рис. 3. Переходный процесс при шунтировании демпфирующего резистора второй ступени двухступенчатой КУ и включенной в штатном режиме первой ступени

Как видно из осциллограмм, пиковые значения перенапряжений достигали 1,3 $U_{ном}$ в первой и несколько ниже во второй ступени. Так как переключений КУ в течение года будет не меньше 1000 раз, то возникающие перенапряжения приведут к ускоренному старению конденсаторных батарей и выходу их из строя. На основании действующих нормативных документов и, учитывая опыт эксплуатации КУ на сети железных дорог, необходимо обеспечить значения перенапряжений на конденсаторах в переходном периоде при подключении второй ступени КУ – на уровне не более чем 1,1 $U_{ном}$.

Расчет переходного процесса при включении второй ступени КУ

$$\psi := \frac{60 \cdot \pi}{180} \quad u(t) := \sqrt{2} \cdot 29000 \cdot \sin(314 \cdot t + \psi)$$

$$R0 := 8 \quad L0 := 0.075 \quad R1(t) := \text{if}(t < 0.133, 70, 0.2) \quad R2(t) := \text{if}(t < 0.1927, 65, 0.15)$$

$$C1 := 13.6 \cdot 10^{-6} \quad XC1 := \frac{1}{314C1} \quad XC1 = 234.17 \quad L1 := 0.095 \quad XL1 := 314L1 \quad XL1 = 29.83 \quad x := \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$C2 := 12.89 \cdot 10^{-6} \quad XC2 := \frac{1}{314C2} \quad XC2 = 247.069 \quad L2 := 0.034 \quad XL2 := 314L2 \quad XL2 = 10.676$$

$$D(t, x) := \begin{bmatrix} \frac{[u(t) - x_2 - (R1(t) \cdot x_0) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0 + L2) - [u(t) - x_3 - (R2(t) \cdot x_1) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0)}{(L0 + L1) \cdot (L0 + L2) - L0^2} \\ \frac{[u(t) - x_2 - (R1(t) \cdot x_0) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (-L0) - [u(t) - x_3 - (R2(t) \cdot x_1) - R0 \cdot (x_0 + x_1)] \cdot (L0 + L1) \cdot (-1)}{(L0 + L1) \cdot (L0 + L2) - L0^2} \\ \frac{x_0}{C1} \\ \frac{x_1}{C2} \end{bmatrix}$$

$$Z := \text{rkfixed}(x, 0, 0.6, 6000, D) \quad n := 0..6000 \quad i1_n := Z_{n,1} \quad i2_n := Z_{n,2} \quad u1_n := Z_{n,3} \quad u2_n := Z_{n,4}$$

Рис. 4. Программа расчета переходного процесса при включении второй ступени КУ в интегрированном пакете MATCAD

Чтобы ответить на вопрос, можно ли обеспечить такой гарантированно низкий уровень перенапряжений на конденсаторах, авторами были проведено моделирование процессов в двухступенчатой КУ.

На рис. 4 приведена программа расчета переходного процесса при включении второй ступени КУ в интегрированном пакете MATCAD численным методом Рунге-Кутты четвертого порядка. При моделировании исследованы переходные процессы в КУ без учета внешней нагрузки. Для решения системы дифференциальных уравнений, записанных в форме Коши, использована функция **rkfixed**, интегрирующая дифференциальные уравнения с постоянным шагом. При решении введены следующие компьютерные переменные x_0 и x_1 – токи i_1 и i_2 первой и второй ступеней, x_2 и x_3 – напряжения u_{C1} и u_{C2} на конденсаторах первой и второй ступеней. Начальные условия задаются вектором x , а производные функций – вектором $D(t,x)$. Для моделирования процесса шунтирования демпфирующего резистора R2 использована функция с условием **if** (условие, выражение 1, выражение 2). Если условие, записанное в скобках выполняется, то функция принимает значение, равное выражению 1. В противном случае она принимает значение выражения 2.

Реактивная мощность первой ступени КУ равна $3,7 M_{вар}$ ($C1=13,6$ мкФ, $L1=0,095$ Гн, активное сопротивление $0,20$ м), а второй ступени – $3,2 M_{вар}$ ($C1=12,89$ мкФ, $L1=0,034$ Гн, активное сопротивление $0,150$ м). Напряжение питающей системы, приведенное к напряжению тяговой сети, взято равным 29 кВ. Приведенные параметры питающей системы и тяговой сети до места установки КУ $R0=8$ Ом, $L0=0,075$ Гн. Эти параметры соответствуют случаю, когда КУ установлена в конце участка при одностороннем питании.

На рис. 5 приведены результаты расчета переходных процессов в двухступенчатой КУ при разных параметрах демпфирующего резистора R2 и разных фазах его шунтирования. Коэффициенты $k_{U1BKЛ}$ и $k_{U2BKЛ}$ показывает кратность перенапряжения на конденсаторах C1 и C2 первой и второй ступенях при подключении второй ступени с демпфирующим резистором R2. Цифрой 1 для кривых $k_{U1BKЛ}$ и $k_{U2BKЛ}$ обозначен режим, когда первая ступень работает в штатном режиме, то есть без демпфирующего резистора. Цифрой 2 для этих же кривых кл обозначен режим, когда в первой ступени включен демпфирующий резистор.

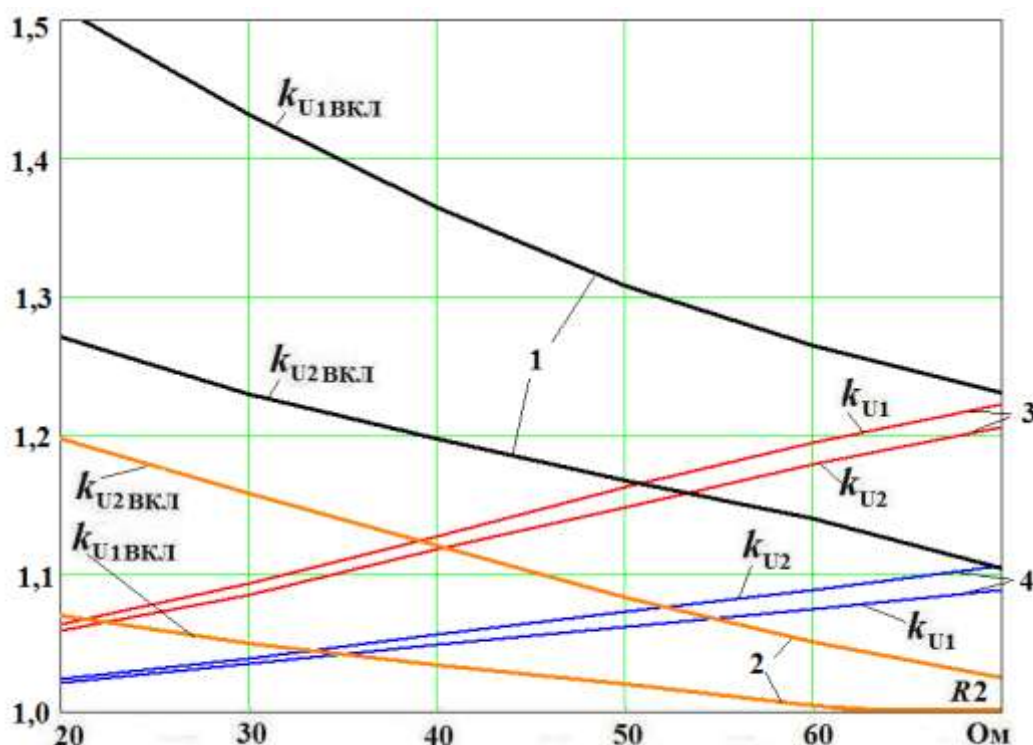


Рис. 5. Кратности перенапряжений на конденсаторах первой и второй ступеней при включении второй ступени

Из рис. 5 видно, что чем больше значение демпфирующего резистора, тем меньше кратность перенапряжения. При исследовании считаем, что выключатель В21 несинхронизированный и включение его происходит в максимум напряжения, что вызывает максимальные перенапряжения. Коэффициенты k_{U1} k_{U2} показывают кратность перенапряжения на конденсаторах С1 первой и С2 второй ступеней при шунтировании демпфирующего резистора в максимум тока (кривые 1) и в нуль тока (кривые 11). Из рис. 5 видно, что если взять значение демпфирующего резистора равным 65 Ом и шунтировать его при нуле тока, то перенапряжения на конденсаторе второй ступени не превысят значение $1,1 U_{ном}$. Напряжение на конденсаторе первой ступени будет ниже.

Для включения В12 в нуль тока выключатель должен быть синхронизированным, что выполняется, например, тиристорным выключателем [5] или гибридным выключателем [6]. Кроме того, для повышения эффективности снижения перенапряжений предлагается ещё одно техническое решение. Перед включением второй ступени следует ввести в работу демпфирующий резистор первой ступени, т. е. расшунтировать R1, отключив В12. Указанные мероприятия позволяют снизить перенапряжения на конденсаторах при включении второй ступени КУ до $1,1 U_{ном}$, что обеспечивает высокую эксплуатационную надежность регулируемых КУ.

Библиографический список

1. **Бородулин, Б.М.** Конденсаторные установки электрифицированных железных дорог / Б.М. Бородулин, Л.А. Герман, Г.А. Николаев. – М.: Транспорт, 1983.
2. Инструкции о порядке выбора параметров и мест размещения установок продольной и поперечной емкостной компенсации в системах тягового электроснабжения переменного тока. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «РЖД». Утверждена 20 октября 2010 г.
3. Приказ Минпромэнерго №49 от 22 февраля 2007г «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности ...»
4. **Герман, Л.А.** Регулируемая установка поперечной емкостной компенсации для тяговых сетей переменного тока / Л.А. Герман, А.С. Серебряков // ЭЛЕКТРО. 2009. № 6. С. 29–35.
5. **Серебряков, А.С.** Современная схема установки поперечной емкостной компенсации / А.С. Серебряков, Л.А. Герман, И.А. Балуева // Электроника и электрооборудование транспорта. 2009. №2–3. С. 17–22.
6. **Герман, Л.А.** Синхронизированные выключатели для регулирования поперечной емкостной компенсации в тяговой сети / Л.А. Герман [и др.] // Локомотив. 2011. № 1.

Дата поступления
в редакцию 18.10.2011

L.A. German, A.S. Serebryakov, D.E. Dulepov

THE RESEARCH OF INITIATION TRANSIENTS OF TWO-STAGE CROSSOVER CAPACITIVE COMPENSATION FACILITY IN RAILWAY POWER SUPPLY SYSTEM

There were explored initiation transients of second stage of two-stage crossover capacitive compensation facility (CF) in railway electric-traction network. There were proposed technical solutions to improve the reliability of CF.

Key words: Crossover capacitive compensation, two-stage controllable facility, excess voltages, commutation, transient process.

УДК 621.314.2

А.С. Плехов¹, В.Г. Титов², К.А. Бинда²**УЧЕТ МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ ПРИ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕМ
УПРАВЛЕНИИ ЭЛЕКТРОПРИВОДАМИ**ООО «Энергосбережение»¹,Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

В целях вычисления углов управления группами вентиляей компенсационного преобразователя в звене постоянного тока двухзвенного преобразователя частоты обсуждаются подходы к синтезу алгоритмов управления энергосберегающим электроприводом переменного тока. Предложены и апробированы алгоритмы, позволяющие определить резерв предельной генерируемой в сеть реактивной мощности при проектировании системы управления или ограничения при эксплуатации предложенных авторами схем преобразователей частоты с компенсационными выпрямителями.

Ключевые слова: компенсация реактивной мощности, энергосберегающее управление электроприводами, мощность искажений.

Большинство электроприводов в промышленности и в коммунальном хозяйстве используют асинхронные двигатели с короткозамкнутым ротором. 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 при плавном автоматическом регулировании ее уровня [3]. Возможность уменьшения потребляемой мощности индуктивного характера и генерации в питающую сеть реактивной мощности емкостного характера присущи и другим техническим решениям. Например, матричный преобразователь частоты, используемый в частотно-регулируемом электроприводе для регулирования трехфазного напряжения и частоты на обмотках двигателя, обеспечивает высокое качество регулирования в нижней части диапазона с возможностью установки любых значений коэффициента сдвига тока на сетевом входе. Такие же возможности предоставляют и корректоры коэффициента мощности на основе повышающего импульсного регулятора. Обеспечивая активную коррекцию коэффициента мощности, они предотвращают отбор несинусоидального тока из питающей сети.

Не переходя к дискуссии о преимуществах и недостатках различных схем преобразователей частоты в целях настоящей статьи о расчете и оптимизации управляющих воздействий - общих проблемах применения всех упомянутых технических решений, рассмотрим из этого перечня наиболее мощные и практически применяемые электроприводы с двухзвенными преобразователями частоты (ДПЧ).

Значения одинаковых углов управления вентилями анодной и катодной групп активного компенсационного выпрямителя (КВ) 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 в эту сеть, о чем свидетельствует изменение мгновенного значения напряжения в сети.

Авторами предложены два способа решения этой проблемы [3, 5]:

- использовать раздельное управление углами α_c и α_n вентиляей групп, работающих соответственно при естественной и принудительной коммутации;
- применять наряду с фазовым регулированием выпрямленного напряжения на выходе

посредством изменения угла управления $\alpha_{и}$ КВ также и регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора тока посредством широтно-импульсной модуляции (ШИМ), изменяя степень регулирования $\gamma_{шим}$.

Такие подходы позволяют решать и технологическую задачу, обеспечивая заданные момент и скорость вращения двигателя, и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности в сети. Изменением управления – в координатах α_e и $\alpha_{и}$ в допустимой для них области можно обеспечить обоснованное значение циркулирующей в сети реактивной мощности в определенных границах, которые зависят от технологической загрузки двигателя и установленной мощности компенсационного выпрямителя.

Однако при таком управлении преобразователем проявляется отрицательный фактор – гармоники тока в сети, в том числе и четные. Применение активного фильтра гармоник позволяет улучшить качество электрической энергии [1]. Кроме того, фаза гармоник у нескольких параллельно подключенных компенсационных выпрямителей изменяется при изменении угла управления и они могут взаимно компенсироваться. Если же применять в качестве преобразователей частоты автономные инверторы напряжения, питаемые от неуправляемых выпрямителей, обеспечивающих $\cos \varphi = 1$ во всем диапазоне регулирования скорости, то фазы гармоник подключенных параллельно преобразователей останутся постоянными, гармоники от разных преобразователей будут суммироваться, усугубляя ситуацию.

Другая использованная авторами возможность – регулирование тока двигателя на выходе автономного инвертора посредством изменения степени ШИМ $\gamma_{шим}$ независимо от напряжения на входе инвертора, то есть независимо от напряжения на выходе КВ, изменяемого углом управления $\alpha_{и}$, - позволяет обеспечить как заданные момент и скорость вращения двигателя, так и регулирование величины компенсируемой реактивной мощности.

Задача управления рассматриваемыми системами электроприводов - найти оптимальное соотношение между значениями углов управления α_e и $\alpha_{и}$, в первом случае, и угла управления $\alpha_{и}$ вентилями компенсационного выпрямителя и степенью широтно-импульсной модуляции тока инвертора $\gamma_{шим}$, во втором случае, доставляющие

$$\min(\operatorname{tg} \varphi_{сети}) = \min_{\alpha_e, \alpha_{и}} \left(\frac{Q_{сети} - Q_{КВ}}{P_{КВ}} \right), \quad \min(\operatorname{tg} \varphi_{сети}) = \min_{\alpha_{и}, \gamma_{шим}} \left(\frac{Q_{сети} - Q_{КВ}}{P_{КВ}} \right), \quad (1)$$

где $Q_{КВ}$ и $P_{КВ}$ – реактивная и активная мощность компенсационного выпрямителя. Под управлением устройства оптимизации обеспечивается достижение указанных целевых функций.

Компенсация реактивной мощности является одной из форм влияния рассматриваемых преобразователей на сеть. Это влияние зависит от степени регулирования выпрямленного напряжения на выходе звена постоянного тока.

С другой стороны от углов α_e и $\alpha_{и}$ зависит и величина потребляемой активной и реактивной мощности, мощность искажения.

Так, без учета потерь в автономном инверторе ДПЧ и в двигателе, полезная потребляемая приводом активная мощность

$$P_{(1)} = mU I_{1(1)} \cos \varphi_{(1)}, \quad (2)$$

где m – число фаз преобразователя; $\varphi_{(1)}$ – сдвиг по фазе между основными гармониками первичного напряжения и первичного тока.

Реактивная мощность, потребляемая из сети,

$$Q_{(1)} = mU I_{1(1)} \sin \varphi_{(1)}. \quad (3)$$

Мощность искажений определяется высшими гармоническими составляющими тока, должна быть учтена при нахождении допустимых величин активной и реактивной мощностей, потребляемых из сети, которые равны соответствующим мощностям на входе КВ.

В схеме КВ с искусственной коммутацией обеих групп вентилях сетевой ток может содержать существенные по величине 5-ю, 7-ю, 11-ю, 13-ю и 17-ю гармоники. Многие авторы, в том числе [2], отмечают, что мощность искажения есть всегда и мало зависит от угла управления преобразователем. Зависимости для коэффициента искажения тока как преобразователей с естественной, так и преобразователей с искусственной коммутацией вентилях известны, например, [2]. Однако следует принять во внимание, что высшие гармонические составляющие трудно учитывать, они более подвержены влиянию случайных факторов из-за колебаний напряжения сети и нагрузки. Точное описание искажения тока регулярными функциями не имеет смысла и практически невозможно. Для характеристики качества преобразования тока достаточно грубых регрессионных оценок.

По данным моделирования зависимости $THD_{o,e}$ от углов управления разными группами вентилях α_e и α_δ были определены уравнения регрессии при соотношении индуктивности нагрузки к индуктивности питающей сети

$$\frac{L_{\text{нагрузки}}}{L_{\text{фазы}}} = 1 \cdot 10^3.$$

Представим данные моделирования и соответствующие коэффициенты в матричной форме.

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} \\ 1 & x_{21} & x_{22} \\ \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_1 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix}.$$

Здесь Y – вектор-столбец размерности n наблюдений зависимой переменной $THD_{o,e}$; X – матрица размерности $n \times (m+1)$; B – вектор столбец параметров уравнения регрессии размерностью $(m+1)$. В нашем случае $m=2$, столбец $X_{i1} = \alpha_e$, а столбец $X_{i2} = \alpha_\delta$, единица соответствует переменной при свободном члене b_0 . Аналитическое представление наблюдений будем искать в виде:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + e, \tag{4}$$

где e – вектор-столбец размерности n отклонений реальных значений y_i - составляющих вектора зависимой переменной Y от значений \tilde{y}_i , получаемых по уравнению регрессии

$$\tilde{y}_i = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2. \tag{5}$$

Нетрудно заметить, что функция $Q = \sum_{i=1}^n e_i^2$ в матричной форме представима как произведение вектор-строки $e^T = (e_1, e_2, \dots, e_n)$ на вектор-столбец e . Вектор-столбец, в свою очередь, можно представить в следующем виде:

$$e = Y - XB \tag{6}$$

Отсюда

$$\begin{aligned} Q &= e^T e = (Y - XB)^T \cdot (Y - XB) = Y^T Y - B^T X^T Y - Y^T X B + B^T X^T X B = \\ &= Y^T Y - 2B^T X^T Y + B^T X^T X B. \end{aligned} \tag{7}$$

Здесь e^T, B^T, X^T, Y^T - векторы и матрицы, транспонированные к e, B, X, Y соответственно. При выводе формулы мы воспользовались соотношения линейной алгебры [4]:

$$(Y - XB)^T = Y^T - (XB)^T; \quad (XB)^T = B^T X^T; \quad B^T X^T Y = Y^T X B. \tag{8}$$

Необходимым условием экстремума функции Q является равенство нулю ее частных производных $\frac{\partial Q}{\partial b_j}$ по всем параметрам $b_j, j=0,1 \dots m$. Покажем, что вектор-столбец $\frac{\partial Q}{\partial b_j}$ частных производных в матричном виде имеет следующий вид:

$$\frac{\partial Q}{\partial B} = -2X^T Y + 2(X^T X)B. \tag{9}$$

Для упрощения обозначим матрицу $X^T X$ размерности $(m+1) \times (m+1)$ через Z . Тогда

$$\begin{aligned} S = B^T Z B &= \left((b_0, b_1, \dots, b_m) \cdot \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1m+1} \\ Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2m+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ Z_{m+11} & Z_{m+12} & Z_{11} & Z_{m+1m+1} \end{bmatrix} \right) \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} = \\ &= \left(\sum_{i=0}^m b_i Z_{i+11}, \sum_{i=0}^m b_i Z_{i+12}, \dots, \sum_{i=0}^m b_i Z_{i+1m+1} \right) \cdot \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{bmatrix} = \\ &= \sum_{j=0}^m b_j \cdot \sum_{i=0}^m b_i Z_{i+1j+1} = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^m b_j b_i Z_{i+1j+1}. \end{aligned}$$

Следовательно, частная производная $\frac{\partial S}{\partial b_j} = 2 \sum_{i=0}^m b_i Z_{i+1j+1}$.

В результате имеем $\frac{\partial S}{\partial b_j} = 2(X^T X)B$.

Обозначим вектор-столбец $X^T Y$ размерности $(m+1)$ через R . Тогда $B^T X^T Y = B^T R = \sum_{j=0}^m a_j r_{j+1}$,

где r_{j+1} – соответствующий элемент вектора R .

Поэтому $\frac{\partial (B^T R)}{\partial B} = R = X^T Y$.

$Y^T Y$ от B не зависит, и значит $\frac{\partial (Y^T Y)}{\partial B} = 0$.

Следовательно, формула (9) справедлива. Приравняв $\frac{\partial Q}{\partial B}$ нулю, получим общую формулу

(11) вычисления коэффициентов множественной линейной регрессии:

$$-2X^T Y + 2(X^T X)B = 0 \Rightarrow$$

$$X^T Y = (X^T X)B \Rightarrow \tag{10}$$

$$B = (X^T X)^{-1} X^T Y. \tag{11}$$

С целью увеличения точности аппроксимации перейдем от линейного уравнения к уравнению типа

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_1 X_2 + b_4 X_1^2 + b_5 X_2^2 + e. \tag{12}$$

Для того что бы формула (11) была справедлива и для этого уравнения, представим данные в матричной форме

$$Y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \dots \\ y_n \end{pmatrix}, \quad X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & x_{13} & x_{14} & x_{15} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & x_{23} & x_{24} & x_{25} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & x_{n3} & x_{n4} & x_{n5} \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \dots \\ b_m \end{pmatrix}, \quad e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_1 \\ \dots \\ e_n \end{pmatrix},$$

где X – матрица размерности $n \times (m+1)$, в которой столбец $X_{i1} = \alpha_e, X_{i2} = \alpha_{\xi}, X_{i3} = \alpha_e \cdot \alpha_{\xi}, X_{i4} = \alpha_e^2, X_{i5} = \alpha_{\xi}^2$, единица соответствует переменной при свободном члене b_0 . Зависимости $THD_{0,e}$ от углов управления разными группами вентилей α_e, α_{ξ} и результат линейной регрессии, построенной по формуле (12), представлены на рис.1.

$$THD_{0,e} = 7.8958 + 0.1897 \cdot X_1 + 0.1847 \cdot X_2 - 0.0042 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0.0009 \cdot X_1^2 + 0.001 \cdot X_2^2 + e, \quad (13)$$

где X_1 – это α_e , а X_2 – соответствует α_{ξ} .

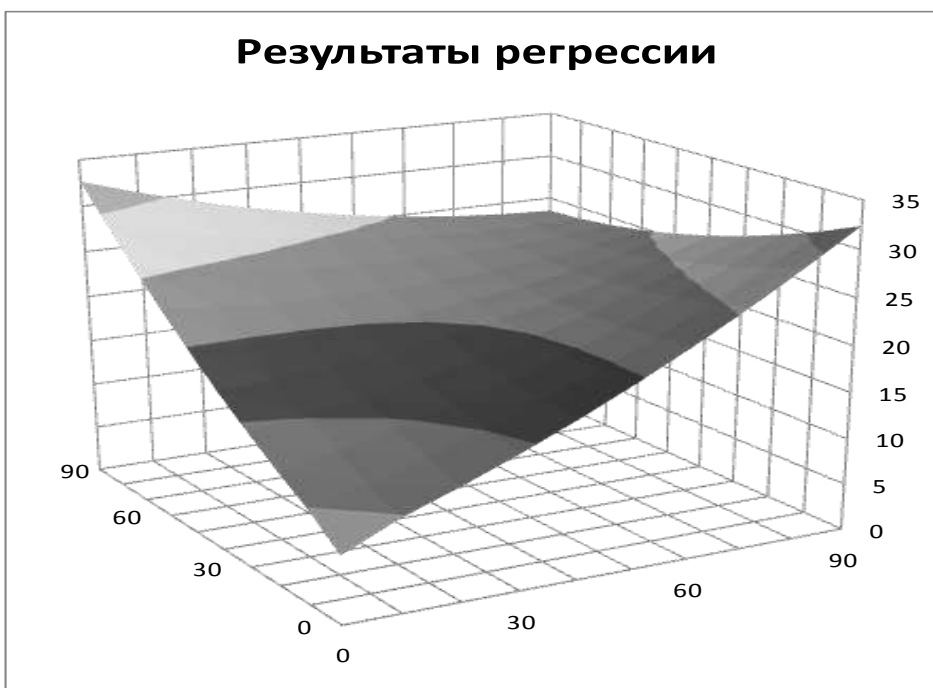
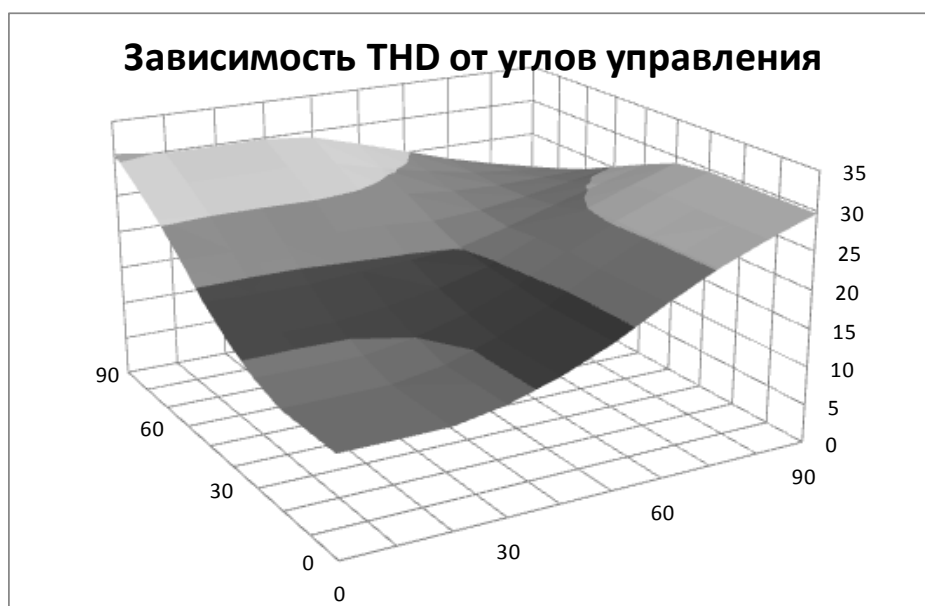


Рис. 1. Зависимости $THD_{0,e}$ от углов управления разными группами вентилей α_e и α_{ξ}

Значения $THD_{o,e}$, полученные по выражению (13), практически совпадают с результатами моделирования и в рабочем диапазоне значения отклонения полученных данных от результатов моделирования не превышают 5%. На рис. 2 представлены зависимости $THD_{o,e}$ и ее регрессии от углов управления α_e вентилями компенсационного выпрямителя, равных для обеих групп вентиляей.

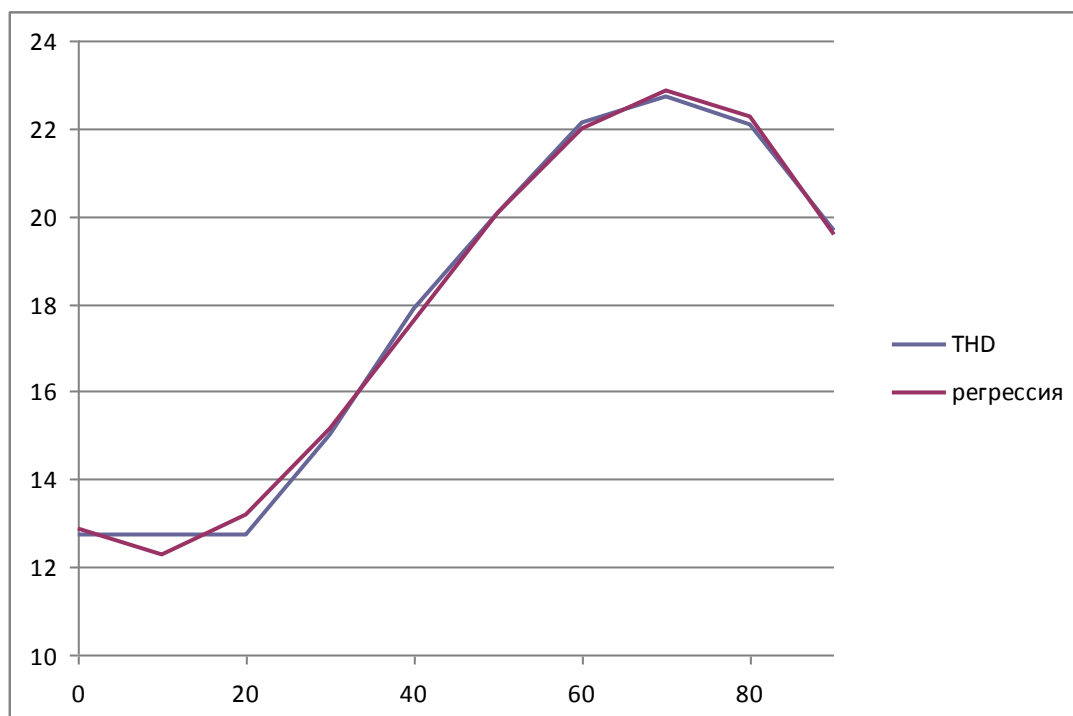


Рис. 2. Зависимости $THD_{o,e}$ от углов управления α_e для обеих групп вентиляей

Вычисление значения $THD_{o,e}$ предлагается производить на основе уравнения

$$THD_{o,e} = 12.85703 - 0.151206 \cdot X_1 + 0.010149 \cdot X_1^2 - 0.000084 \cdot X_1^3, \quad (14)$$

где X_1 — значение углов управления α_e . Значения отклонений реальных величин $THD_{o,e}$ от полученных по выражению (14) малы и ими можно пренебречь.

Авторы используют в алгоритмах микропроцессорного управления соотношениями α_a , α_e и α_n , $\gamma_{шмм}$ опорную таблицу значений $THD_{i,a}$ в зависимости от углов управления разными группами вентиляей α_e и α_n или от переменных α_e , $\gamma_{шмм}$, соответственно структуре преобразователя частоты, с последующей интерполяцией для вычисления мощности искажений при определении ограничений на величины переменных управления.

При допущении малости угла перекрытия $\gamma/2 \cong 0$, можно считать, что $\varphi_{(1)} = \alpha$. Тогда реактивная мощность, генерируемая (потребляемая) КВ будет:

$$Q_{\dot{E}\dot{A}} = mU I_{1(1)} (\sin \alpha_a + \sin \alpha_e), \quad (15)$$

где $\alpha_n < 0$.

В этом случае требуется вычислить такие значения углов управления группами вентиляей α_e и α_n , которые обеспечат как необходимое значение выпрямленного напряжения U_d , так и желаемую величину потребляемой или генерируемой в сеть реактивной мощности. В этом случае $THD_{o,e}$ будет функцией двух углов управления согласно (13).

Результаты вычислений $THD_{o.e}$ для второй схемы ДПЧ с компенсационным преобразователем [5], все вентили которого принудительно коммутируются с углом управления $\alpha_{и}$, были аппроксимированы полиномиальным выражением (14). Поскольку АИТ с ШИМ не влияет на потребляемую из сети мощность искажения, то значения $THD_{o.e}$, полученные из аппроксимирующего выражения являются опорными для вычисления мощности искажений, потребляемой компенсационным преобразователем при текущем угле управления $\alpha_{и}$.

Таким образом, решена задача определения резерва при проектировании или ограничений при эксплуатации предложенных схем ДПЧ с компенсационными преобразователями в разрезе предельной генерируемой в сеть реактивной мощности.

Для первой схемы предельная реактивная мощность может быть вычислена согласно зависимости [6]:

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{уст}^2 - P_{(1)}^2 - (S_{уст} * THD_{o.e}(\alpha_{и}, \alpha_{е}))^2}. \quad (16)$$

Для второй схемы с компенсационным преобразователем и АИТ с ШИМ:

$$Q_{(1)} = \sqrt{S_{уст}^2 - P_{(1)}^2 - (S_{уст} * THD_{o.e}(\alpha_{и}))^2}. \quad (17)$$

Выводы

1. Частотно регулируемый электропривод переменного тока с компенсационным выпрямителем в звене постоянного тока преобразователя частоты является новым средством компенсации реактивной мощности, устанавливаемым непосредственно у потребителя. При вычислении углов управления вентилями компенсационного выпрямителя и степенью модуляции тока на выходе автономного инвертора необходимо исходить из резервов установленной мощности электрооборудования привода, принимая во внимание мощность искажения, зависящую от величины U_d при заданной технологической мощности на валу двигателя.

2. Вычисление углов управления вентилями компенсационного преобразователя и степени модуляции ШИМ автономного инвертора тока необходимо производить по критерию максимально допустимой генерируемой в сеть реактивной мощности, которая определяется с учетом мощности искажений, потребляемой компенсационным выпрямителем.

3. Авторами найдены математические зависимости для решения задачи вычисления параметров управляющих сигналов - определены дескриптивные регрессионные уравнения для оценки мощности искажений во всем диапазоне регулирования выходного напряжения преобразователей двух предложенных структур.

Библиографический список

1. **Вагин, Г.Я.** Компенсация реактивной мощности в электрических сетях с нелинейными нагрузками / Г.Я. Вагин, А.А. Севостьянов, С.Н. Юртаев // Актуальные проблемы электроэнергетики. – Нижний Новгород, 2010. С. 93–97.
2. **Тихомиров, В.А.** Технические и экономические аспекты применения регулируемых приводов постоянного и переменного тока / В.А. Тихомиров, В.Г. Титов, С.В. Хватов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2010. № 4(83). С. 190–204.
3. **Плехов, А.С.** Технология энергосбережения в электроприводе / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Труды ГНТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 1(86). С. 193–203.
4. **Львовский, Е.Н.** Статистические методы построения эмпирических формул / Е.Н. Львовский. – М.: Высшая школа, 1988.
5. **Бинда, К.А.** Преобразователь частоты на основе автономного инвертора тока с широтно-импульсной модуляцией / К.А. Бинда, А.С. Плехов // Будущее технической науки: сб. материалов X междунар. молодеж. научно-техн. конф.; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. С. 436.

6. **Плехов, А.С.** Задачи идентификации и оптимизации при энергосберегающем управлении электроприводами и алгоритмы их решения / А.С. Плехов, М.Н. Охотников, В.Г. Титов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. № 3(90). С. 215–225.

*Дата поступления
в редакцию 11.10.2011*

A.S. Plehov, V.G. Titov, K.A. Binda

**ACCOUNTING FOR POWER DISTORTION AT POWER SAVING
CONTROL OF ELECTRIC DRIVES**

In purpose of the calculation corners management group valves of the compensation converter in section of the direct current two-element converter of the frequency are discussed approaches to syntheses algorithm management saving energy electric drives of alternating current. They Are Offered and approved algorithms, allowing define the reserve limiting generated in network of the reactive power when managerial system or restriction designing at usages offered author of the schemes of the converters of the frequency with compensation rectifier.

Key words: compensation to reactive power; saving energy management electric drives; the power of the distortion.

УДК 621.316.3

Б.В. Папков, М.В. Шарыгин

**АНАЛИЗ СИСТЕМ ВЗАИМООТНОШЕНИЙ СУБЪЕКТОВ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ
С ЦЕЛЬЮ УПРАВЛЕНИЯ УРОВНЕМ НАДЕЖНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Наблюдающаяся тенденция снижения уровня надежности электроснабжения при одновременном увеличении ущербов потребителей и росте тарифов на электроэнергию приводит к необходимости изменения механизма управления надежностью. В работе анализируются различные системы взаимоотношений субъектов электроэнергетики с целью выработки рекомендаций по управлению уровнем надежности электроснабжения потребителей.

Ключевые слова: электроэнергетика, взаимоотношения субъектов рынка электроэнергии, надежность электроснабжения, анализ, управление.

Введение

Проблема организации управления уровнем надёжности электроснабжения возникает в основном по экономическим причинам: затраты на поддержание или увеличение надежности (усиление и модернизация электрической сети, строительство и ввод новых мощностей) несет энергокомпания, а ущерб от отказов элементов электроэнергетической системы (ЭЭС) главным образом возникает у конечного потребителя вследствие нарушения электроснабжения технологического процесса производства. При этом потребитель и энергокомпания жестко связаны электрической сетью, что на современной стадии развития ЭЭС практически не позволяет смену поставщика услуги. Ущерб от нарушения электроснабжения обратнозависим от затрат на надежность и в значительной степени ими определяется.

В настоящее время отношения между потребителем и энергокомпанией таковы, что у энергокомпании отсутствует мотивация к увеличению затрат на надежность, а потребитель практически не может на них влиять. В этой связи задачу оптимизации уровня надежности можно представить в виде нескольких подзадач:

- 1) какой уровень надежности необходимо обеспечить;
- 2) за счет каких мероприятий можно обеспечить требуемый потребителю уровень надежности;
- 3) кто оплачивает мероприятия по обеспечению надежности;
- 4) кто несет ответственность за нарушения электроснабжения вследствие несоблюдения договорных условий.

Сегодня существует острый дефицит решений первой, третьей, четвертой задач и, одновременно множество предложений по решению второй задачи. Её достаточно хорошая проработка создаёт иллюзию простоты решения проблемы надежности. Полагают, что достаточно реализовать несколько технических мероприятий и будет получен уровень надежности с заданным значением R . Однако любые мероприятия невозможно реализовать до тех пор, пока не будут определены четкие варианты решений трех других задач.

Указанным перекосом можно объяснить длительное существование самой проблемы надежности и ее существенное обострение при переходе к рыночной электроэнергетике. Мощный, хорошо развитый и известный математический аппарат теории направлен на техническое обеспечение структурной и элементной надежности ЭЭС и системы электроснабжения. По этой причине большинство предлагаемых решений нацелены на обеспечение существующего и (или) договорного уровня надежности в чисто техническом плане, без должной комплексной организационной и экономической проработки.

1. «Нормативные» (административные) системы взаимоотношений

В настоящее время одним из основных подходов к решению проблемы надежности считается «нормативный» [2] (рис. 1).

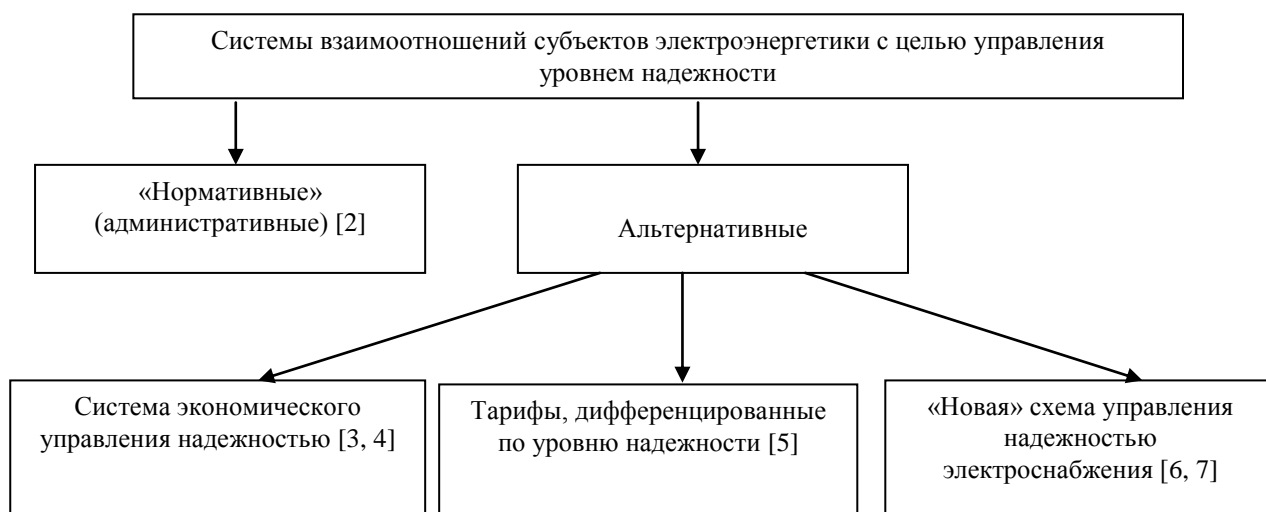


Рис. 1

Его основными признаками являются:

- признание необходимости внешних органов регулирования и надзора за отраслью (как правило, со стороны государства);
- строгая регламентация прав, обязанностей, нормативов, затрат, продолжительности и других параметров деятельности для всех субъектов электроэнергетики.

Считается [2], что потребителю «необходим» определенный уровень надежности, который должна обеспечить энергокомпания. Поэтому ведется контроль и оценка надежности для наложения штрафов в случае снижения надежности, а потребитель должен оплатить надежность по цене, которую ему предлагает энергокомпания. Фактически этот подход означает, что потребитель замещается определенными требованиями к уровню надежности, что не является эквивалентной заменой.

Внедрение такого подхода наталкивается на ряд взаимосвязанных и до сих пор нерешенных вопросов.

1) выявление и обоснование границы ответственности за надежность, которая определяется двумя показателями:

- значением параметров надежности, в пределах которых данная энергокомпания не несет ответственности (даже в случае факта аварии), поскольку надежность технических систем не может быть абсолютной по объективным причинам;
- зоной ответственности энергокомпаний за результирующую надежность, т.е. степенью «виновности» энергокомпаний в факте аварии или ее каскадного развития. Эта часть проблемы наиболее остро стала ощущаться в период разделения отрасли и тоже пока не решена;

2) определение истинной цены надежности и возможности ее справедливого распределения по субъектам электроэнергетического рынка. При этом занижение цены может привести к банкротству энергокомпаний, а завышение (в пределе) – к банкротству потребителей;

3) оценка объективной величины ущерба потребителей от нарушений электроснабжения. Занижение его может привести к банкротству потребителей, а завышение – к росту цены надежности.

Глобальность и размерность этих задач, сложность их решения приводит к необходимости государственного контроля за отраслью, «ручного управления» процессами, расчета

усредненных тарифов, использование удельных показателей ущербов, различных корректирующих коэффициентов и прочих временных решений. В таких условиях попытки управлять уровнем надежности не могут решить проблему в целом и лишь замедляют снижение уровня надёжности и рост цены на неё.

В целом, нормативный подход потенциально имеет следующие взаимосвязанные недостатки:

- отсутствие гибкости, невозможность удовлетворить множество различных индивидуальных запросов субъектов рынка по надежности их электроснабжения, в том числе и динамику таких запросов;
- неоптимальное перераспределение ресурсов внутри отрасли из-за усредненности требований, в существующих нормах и правилах, следствием чего является нарушение принципа взаимовыгодности функционирования субъектов рынка электроэнергетики;
- мотивация энергокомпаний к увеличению надежности может быть создана только под угрозой штрафов;
- отсутствие мер по созданию мотивации потребителей к вложению средств на надежность электроснабжения.

Поскольку недостатки нормативного подхода очевидны, всегда признавалась необходимость создания более эффективных альтернативных систем взаимоотношений для управления уровнем надежности (рис. 1). Это положение было заявлено во многих профильных научных работах, выражено законодательно [1] и отмечено в программном документе РАО «ЕЭС России» – Концепции обеспечения надежности в электроэнергетике. Следует отметить, что нормативный подход до сих пор является единственной основой, на которой возможно объединение усилий независимых хозяйствующих субъектов по обеспечению надежности технологического процесса производства и системы его электроснабжения, что в целом гарантирует надежность несмотря на различие экономических интересов субъектов рынка. Именно это свойство универсальности нормативного подхода является одним из его главных достоинств.

2. Альтернативные системы взаимоотношений

В качестве основы системы взаимоотношений рядом документов предусматриваются экономические рыночные принципы: «использование рыночных отношений и конкуренции в качестве одного из основных инструментов формирования устойчивой системы удовлетворения спроса на электрическую энергию при условии обеспечения надлежащего качества и минимизации стоимости электрической энергии» [1]. Основными направлениями реализации экономического управления надежностью электроснабжения потребителей являются:

- разработка системы дифференцированных по уровню надежности тарифов (цен) на электроэнергию как долговременного фактора, обеспечивающего «мягкое» регулирование показателей надежности электроснабжения на основе сбалансированности интересов субъектов хозяйствования;
- экономическая поддержка оперативных мероприятий по регулированию режима ЭЭС и потребителей в интересах обеспечения надежности;
- разработка механизма взаимной экономической ответственности энергоснабжающих организаций и потребителей электрической энергии за соблюдение договорных (нормативных) требований по обеспечению надежного электроснабжения;
- разработка и внедрение системы страхования ущербов потребителей, вызванных нерасчетными условиями функционирования ЭЭС;
- исследование возможностей управления спросом при внезапных и плановых возникновениях дефицитов мощности в ЭЭС;
- стимулирование инвестиций на повышение надежности.

Однако к настоящему времени практически все перечисленные направления развиты недостаточно полно.

В последние годы рядом научных коллективов были даны предложения по измене-

нию системы взаимоотношений субъектов электроэнергетики для реализации экономических принципов [3–7]. Основная идея этих предложений практически одинакова, однако в деталях имеются значительные расхождения. Смысл этих предложений заключается в следующем.

Если потребитель чувствителен к нарушениям своего электроснабжения, то он выплачивает денежные средства A энергокомпании, которая определяет надежность его электроснабжения (рис. 2). Получив эти средства энергокомпания обязуется выплачивать данному потребителю компенсации в размере B в случае нарушения его электроснабжения. Причем величина A пропорциональна величине B . Размер средств A потребитель определяет самостоятельно, зная, что чем он больше заплатит энергокомпании, тем большую компенсацию он сможет получить в случае внезапного нарушения электроснабжения.



Рис. 2

Эта идея содержит в себе множество потенциальных достоинств.

Общие достоинства:

- стимулирование повышения надежности электроснабжения производится рыночным методом, что взаимовыгодно для всех участников рынка, а значит можно ожидать реального роста надежности;
- вносится ясность в управление надежностью и конкретизируются цели этого управления; справедливо и взаимовыгодно распределяются права и ответственность вовлеченных в управление субъектов электроэнергетического рынка;
- снимается множество методических и организационных вопросов управления надежностью: не требуется создания множества контрольных и надзорных органов, не требуется разработки методик расчета стоимости надежности и ущербов;
- ожидается высокий экономический эффект не только у отдельных потребителей и энергокомпаний, но и в целом по отрасли, поскольку стимулируется снижение рисков нарушения электроснабжения и, следовательно, снижение непроизводительных затрат материальных и трудовых ресурсов.

Достоинства с точки зрения потребителей:

- потребитель получает экономическую защиту от нарушения электроснабжения, как

минимум – по причине гарантированной оплаты заявленного им ущерба, как максимум – из-за реального увеличения надежности своего электроснабжения;

- достигается адресность повышения надежности, поскольку каждый потребитель сможет иметь ту надежность, которая ему выгодна, и на индивидуальных условиях, учитывающих особенности процесса производства;
- от потребителей не требуется единовременных крупных вложений на капитальное строительство объектов ЭЭС.

Достоинства с точки зрения энергокомпаний:

- энергокомпании получают дополнительные денежные средства от потребителей без повышения основных ставок тарифа за электроэнергию;
- четко видна ответственность энергокомпаний за нарушения электроснабжения потребителей, благодаря чему появляется основа для конкретного планирования и внедрения мероприятий по изменению надежности и оптимизации питающей сети;
- естественным образом произойдет самопроизвольное и практически беззатратное выделение ответственных потребителей: появляется возможность управления нагрузкой и увеличения надежности ответственных потребителей за счет неответственных на договорной основе с минимальными экономическими потерями.

Вместе с тем, реализация экономических принципов управления надёжностью имеет и недостатки, основными из которых являются:

- дополнительные организационные механизмы для реализации предлагаемой системы взаимоотношений в условиях разделенной рыночными преобразованиями последних лет электроэнергетики;
- дополнительные механизмы для выхода на оптимальные уровни выплат (равновесие Нэша), когда отклонение от этих уровней невыгодно ни потребителям, ни энергокомпаниям-поставщикам;
- неясно, что именно необходимо выбрать в качестве опорного (базового) уровня надежности, относительно которого рассчитывается баланс денежных средств, циркулирующих между потребителем и энергокомпанией-поставщиком;
- неясна конкретная форма реализации идеи – техническая, организационная, методическая и др. В том числе и взаимоувязка с уже существующими отношениями в электроэнергетике;
- при реализации идеи потенциально может быть и снижение уровня надежности, если потребители не выразят желания вступать в эти отношения.

Общая характеристика предложений по построению системы взаимоотношений субъектов электроэнергетики [3–7] приведена далее.

1.1. В [3, 4] впервые было отмечено, что все функции по координации надежности и распределению средств возлагаются на системного оператора, как субъекта, ответственного за надежность. Это означает, что системный оператор вступает в договорные отношения со всеми остальными субъектами рынка, аккумулирует средства на надежность от потребителей и использует эти ресурсы для оптимизации уровней надежности и оплаты ущерба потребителям в случае нарушений электроснабжения.

Основной проблемой реализации описанной системы является отсутствие механизма справедливого и взаимовыгодного распределения средств по сетевым и генерирующим компаниям. Представляется невозможным создание такого механизма ввиду того, что он принципиально не создает условий для выявления истинной цены надежности и ее справедливого распределения по субъектам рынка. Системный оператор является сторонним субъектом по отношению к сетевым и генерирующим компаниям, а им, в данном случае, выгодно завышать цену своей надежности.

2.2. В работе [5] предложены принципы разработки дифференцированного по надежности тарифа на услуги по передаче электроэнергии в единой национальной электрической сети (ЕНЭС), приведены численные примеры расчетов ставок тарифа, что говорит о достаточно высокой степени завершенности предлагаемых методов управления надёжностью.

Однако детальный анализ предложений [5] выявил некоторые недостатки, суть которых заключается в следующем:

- компенсация потребителям рассчитывается только по одному параметру – недоотпуску электроэнергии со стороны ЭЭС. Остальные параметры нарушения электроснабжения (частота, длительность, изменение показателей качества) не учитываются. Это существенно снижает эффективность предложенной системы тарифов, поскольку реальный ущерб потребителей зависит также от: факта внезапности отключения, заблаговременности предупреждения об отключении и длительности отключения, глубины отключения, порядка отключения / включения электроприёмников потребителей и множества других факторов;
- предполагается установление ограниченного числа дискретных ставок тарифного меню, что существенно ухудшает гибкость системы взаимоотношений потребителя и энергокомпании, затрудняя выбор тарифа;
- предусматривается деление всех потребителей по надежности на три категории. Выплаты и компенсации каждому потребителю балансируются относительно уровня, определяемого его категорией. Стимулирование увеличения надежности производится главным образом для низших по её уровню потребителей 2 и 3 категории, поскольку для них увеличение надежности можно осуществить гораздо проще и менее затратно. Следовательно, разница между выплатами и компенсациями будет максимальной;
- долговременность действия соглашения о выбранном потребителем тарифном плане предусматривается в течение трёх-пяти лет. Однако затягивание срока действия до нескольких лет нежелательно, поскольку это препятствует установлению взаимовыгодных отношений между субъектами рынка из-за «старения» параметров этих отношений;
- не ясно, как формировать тарифное меню для территориальных сетевых организаций (ТСО) со стороны ЕНЭС с целью взаимовыгодного распределения средств, полученных от потребителей, между ТСО и ЕНЭС. Отсутствие баланса интересов ТСО и ЕНЭС может привести к ситуации, когда возмещение ущерба будет переложено на ТСО. Это, естественно, может привести к банкротству ТСО, появлению бесхозных сетей и дальнейшему снижению уровня надежности конечных потребителей электроэнергии.

2.3. В работах [6, 7] приведено описание общей идеи системы взаимоотношений, перечислены ее достоинства и недостатки, приведены примеры реализации предлагаемой системы. Основными отличиями предложенной в этих работах системы взаимоотношений являются:

- выделение элементарных самодостаточных пар субъектов типа «потребитель – энергокомпания (поставщик)», связанных между собой технологической связью. Субъекты внутри пары устанавливают между собой отношения по управлению надежностью, например: конечный потребитель электроэнергии – (ТСО), ТСО – ТСО, ТСО – межрегиональная распределительная сетевая компания (МРСК), МРСК – магистральные электрические сети (МЭС), генерирующая компания – МЭС и так далее. Тем самым в процесс управления надежностью вовлекаются все заинтересованные субъекты электроэнергетики; взаимовыгодно распределяются средства, полученные от конечного потребителя электроэнергии по всем субъектам электроэнергетики, от которых зависит надежность этого потребителя: от местных ТСО до МЭС и генерирующих компаний;
- предполагается использование единого базового уровня надежности для всех конечных потребителей. Равные исходные условия по надежности позволят выделить потребителей, действительно нуждающихся в повышенном уровне надежности и готовых за него платить вне зависимости от их фактической категории надежности;
- в качестве контролируемых параметров надежности могут быть приняты любые параметры, которые важны для конкретного потребителя (а не только недоотпуск), причем в любом сочетании и для любого количества точек питания потребителя;
- обеспечивается взаимовыгодная технико-экономическая стабильность потребителей и энергокомпаний по связи электроснабжения, а не достижение некоторого уровня надежности электроснабжения. Под технико-экономической стабильностью предприятия здесь понимается способность предприятия сколь угодно продолжительно функционировать с нормаль-

ными плановыми технико-экономическими характеристиками даже при возникновении заданных возмущений параметров функционирования.

Вместе и эта система имеет ряд недостатков:

- отсутствует полноценный анализ и исследование эффективности предложенной системы взаимоотношений;
- отсутствуют принципы выбора опорного уровня надежности, относительно которого рассчитывается баланс денежных средств, циркулирующих между потребителем и энергокомпанией-поставщиком;
- требуются дополнительные механизмы для выхода на оптимальные уровни выплат (анализ равновесия Нэша);
- неясна конкретная форма увязки предлагаемых мероприятий с уже существующими отношениями в электроэнергетике.

3. Зарубежные исследования системы взаимоотношений субъектов электроэнергетики для управления надёжностью

Отметим, что рыночные отношения в электроэнергетике ряда ведущих стран развивались на более длительном периоде и в условиях, существенно отличающихся от российских. Поэтому и подходы к решению поставленной проблемы далеко не всегда могут быть применимы к электроэнергетике России. Вместе с тем очевидно, что рынки электроэнергии Западной Европы и США также, как и в России, не вписываются в стандартную экономическую теорию по двум причинам: 1) сторона спроса (потребитель) не принимает активного участия в рынке и 2) некоторые особенности стоимостных характеристик производства электроэнергии не соответствуют допущениям, принимаемым в теории конкурентных рынков.

По мнению зарубежных экспертов, серия крупных системных аварий последнего времени произошла из-за несоответствия действующей системы обеспечения надёжности в крупных энергообъединениях новым рыночным условиям. В выводах и заключениях по системным авариям в США и Западной Европе отмечается, что энергообъединениям необходимо разработать эффективные регулирующие и законодательные механизмы для упорядочения рыночных операций по сделкам на поставки электроэнергии.

Ответственность поставщиков электроэнергии перед потребителями определяется в основном соблюдением нормативных показателей надёжности, условиями и размером компенсации недопоставок электроэнергии и мощности, гарантиями оперативного уведомления о плановых ограничениях электропотребления.

В ряде фундаментальных работ, цитируемых в [8], отмечается, что основой политики обеспечения надёжности электроснабжения является величина и продолжительность ценовых пиков, а также инвестиции – важнейшие индикаторы успешного функционирования рынка электроэнергии. Для надёжного функционирования ЭЭС рекомендуется регулировать спрос на некоторый пакет услуг, включающий выработку балансирующей электроэнергии в реальном времени, предоставление оперативных резервов генерации и транспорта, поддержание баланса генерации и спроса. Причём этот спрос должен быть подкреплён соответствующей политикой регулирования цен. Без разработки политики обеспечения надёжности, определяющей спрос на такие услуги, инвестиции в генерирующие мощности и связи будут ниже требуемой величины из-за органических недостатков рынка со стороны спроса.

В качестве рекомендаций по оптимизации взаимоотношений субъектов рынка предлагается проведение системным оператором специальной политики формирования цен, которая исключает недофинансирование строительства новых генерирующих мощностей и снижение надёжности электроснабжения потребителей. В ряде работ предлагаются различные системы управления нагрузкой потребителей при отказах элементов питающей сети и (или) возникновении дефицитов мощности. Однако механизмы подобных предложений не раскрываются, что приводит к необходимости проведения глубоких научных исследований поведения энергокомпаний и потребителей в условиях формирования и развития российского электроэнергетического рынка.

Выводы

Проблема поддержания необходимого потребителям уровня надежности электроснабжения является одной из основных и с каждым годом становится все острее. Критический анализ системы взаимоотношений субъектов электроэнергетики, проведенный с целью поиска возможностей повышения эффективности управления надежностью при их эксплуатации показал, что имеются предложения по введению нормативной (административной) и альтернативных систем взаимоотношений, основанных на рыночных принципах. Анализ достоинств и недостатков рассмотренных систем позволяет более объективно подойти к принятию решений, обеспечивающих надёжное и эффективное электроснабжение потребителей. Предлагаемый подход, основой которого являются реализация требуемого потребителям уровня надежности электроснабжения на будущий период и обеспечение ответственности энергокомпаний в случае нарушения электроснабжения позволит решить указанные проблемы наиболее простыми и эффективными методами. Правильно спроектированный рынок электроэнергии позволяет учесть специфику электроэнергетической отрасли, не представляет угрозы для надёжности и управляемости энергосистем и создаёт правильные ценовые сигналы для оптимального резервирования агрегатов электростанций и сетевого оборудования, а также привлечения необходимых инвестиций.

Библиографический список

1. Федеральный закон № 35-ФЗ «Об электроэнергетике»
2. **Беляев, Л.С.** Необходимость возобновления государственного регулирования в электроэнергетике России / Л.С. Беляев, И.Э. Большаков // Энергетик. 2011. №7
3. **Китушин, В.Г.** Проблема надежности электроснабжения: анализ причин и подход к решению // Энерго Рынок. №9. 2005.
4. **Кучеров, Ю.Н.** Реформирование и надежность электроснабжения / Ю.Н. Кучеров, В.Г. Китушин // Энерго Рынок. №1. 2005.
5. **Фраер, И.В.** Формирование и пути внедрения дифференцированного по надежности тарифа на услуги по передаче электроэнергии в ЕНЭС / И.В. Фраер, В.И. Эдельман // Энергетик. 2009. №9.
6. **Папков, Б.В.** Схема стимулирования повышения надежности электроснабжения потребителей / Б.В. Папков, М.В. Шарьгин // Электромеханика: Известия высших учебных заведений. ЮРГТУ (НПИ). – Новочеркасск, 2009. Спец. выпуск. С. 56–58.
7. **Папков, Б.В.** Предложения по практической реализации схемы управления надежностью электроснабжения / Б.В. Папков, М.В. Шарьгин // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 61. Проблемы исследования и обеспечения надежности либерализованных систем энергетики. – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2011. С. 338–344.
8. **Стофт, С.** Экономика энергосистем. Введение в проектирование рынков электроэнергии / С. Стофт. – М.: Мир, 2006. – 623 с.

*Дата поступления
в редакцию 25.10.2011*

B.V. Papkov, M.V. Sharygin

REVIEW OF RELATIONS OF ELECTRICITY MARKET PARTICIPANTS FOR CONTROL OF RELIABILITY OF ENERGY SUPPLY

Degradation in the level of reliability of energy supply, increase in tariffs indicates the need for change of reliability control mechanism. In this paper makes review of different systems of relationship between electricity market participants for control of reliability of energy supply.

Key words: electric power system, relations of electricity market participants, reliability of energy supply, analysis, control.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621.742.4

В.В. Юрасов, Т.Ш. Сильченко, Н.А. Кидалов

ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ СВОЙСТВ ИЗГОТОВЛЕННОГО ИЗ НАНОРАЗМЕРНЫХ КРЕМНЕЗЕМСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ЖИДКОСТЕКЛЬНОГО СВЯЗУЮЩЕГО НА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ СМЕСЕЙ ЛИТЕЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Волгоградский государственный технический университет

В работе представлены результаты экспериментального исследования основных физико-химических свойств нового жидкостеклового связующего формовочных смесей, изготавливаемого безавтоклавным растворением щелочного силиката натрия предварительно нанодиспергированного ударно-волновой обработкой; выявлен механизм повышения прочностных показателей жидкостеклового связующего; обоснована возможность сокращения работы выбивки жидкостекловых смесей путем снижения содержания в последних разработанного связующего.

Ключевые слова: жидкостекловое связующее, угол смачивания, предел когезионной прочности, коллоидный кремнезем, формовочная смесь, работа выбивки.

Проблема затрудненной выбиваемости смесей на жидкостекловом связующем, несмотря на накопленный богатый теоретический и экспериментальный материал, до настоящего времени не является окончательно решенной [1 ... 7 и др.]. Операция выбивки стержней, особенно крупных и сложных отливок, является одной из наиболее тяжелых, значимо увеличивая трудоемкость изготовления продукции литейного производства. При этом, затраты на выбивку жидкостекловых смесей остаются более высокими по сравнению с песчано-глинистыми смесями и смесями с органическими связующими. Известные технологические приемы и рекомендации по улучшению выбиваемости не всегда эффективны [1 ... 5], а в качестве специализированных добавок используются целевые дорогостоящие материалы [6, 7], значительно увеличивающие стоимость литья и, в ряде случаев, значительно снижающие рентабельность производства.

Очевидно, что среди известных на сегодняшний день, подробно описанных в работах [1, 2, 5 ... 13 и др.] направлений улучшения выбиваемости наиболее предпочтительным представляется снижение содержания жидкостеклового связующего в составах смесей. Так, согласно [1, 2, 12 и др.] понижение с 6 до 4% массовой доли содержания связующего в составе жидкостекловой смеси способно значимо сократить работу выбивки. Однако на практике серьезным препятствием широкому практическому применению этого технологического приема является неизбежное ухудшение прочностных свойств смесей.

В предыдущих работах [14 ... 16] авторами было решено создать для литейного производства жидкостекловое связующее, обеспечивающее улучшение выбиваемости вследствие возможности снижения своего содержания в смесях без понижения прочностных свойств последних. При этом в качестве наиболее рационального принципиально нового подхода к решению поставленной задачи в [14] предлагалось изготавливать жидкостекловое связующее безавтоклавным растворением наноразмерных порошков сырьевых растворя-

емых материалов (поскольку практически все свойства наноматериалов значительно отличаются от свойств крупнозернистых аналогов), а сами же порошки получать посредством ударно-волновой обработки (УВО) при помощи энергии бризантных взрывчатых веществ. Результаты экспериментального определения основных технологических свойств приготовленных на разработанном жидкостекольном связующем смесей показали, что последние характеризуются более высокими прочностными свойствами по отношению к аналогичным смесям на традиционном жидком стекле [16], предоставляя тем самым реальную возможность сокращения работы выбивки за счет снижения массовой доли содержания связующего. Вместе с тем нельзя оставлять без внимания то обстоятельство, что исследования, направленные на раскрытие механизма повышения прочности жидкостекольных смесей на связующем, произведенном из нанодиспергированного УВО щелочного силиката натрия, до настоящего времени не проводились.

Целью настоящей работы явились экспериментальные исследования разработанного и традиционного жидкостекольных связующих, направленные на выявление отличий основных физико-химических свойств, оказывающих влияние на процессы, происходящие на разных стадиях формирования прочности формовочных и стержневых смесей.

На первом этапе работы производили исследование изменений смачивания кварцевого песка разработанным жидким стеклом.

Степень смачивания жидкостью твердого тела определяется величиной краевого угла θ (рис. 1). За меру смачивания обычно принимают косинус краевого угла смачивания [17, 18]

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{13} - \sigma_{23}}{\sigma_{12}}, \quad (1)$$

где σ_{13} – поверхностная энергия твердого тела на границе с газом; σ_{23} – межфазное натяжение на границе раздела жидкой и твердой фазы; σ_{12} – поверхностное натяжение жидкости на границе с газом.

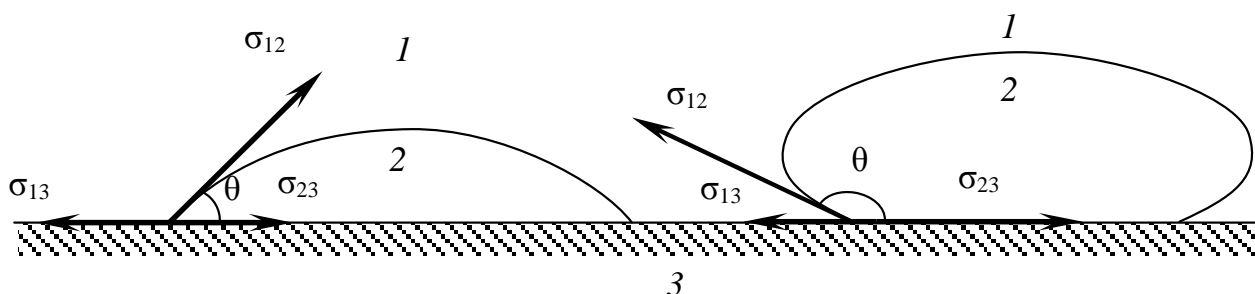


Рис. 1. Краевой угол смачивания твердого тела жидкостью [18]:

1 – газ; 2 – жидкость; 3 – твердое тело

Исследование смачиваемости жидким стеклом кварцевых подложек производили методом «лежащей капли» [19]. Измерения осуществляли на цифровых фотоснимках, получаемых фотоаппаратом Canon Power Shot A620 при помощи модифицированного биологического микроскопа МБС-9 [20]. Для получения результата исследовали не менее трех капель каждого из образцов жидкостекольного связующего.

На рис. 2 представлены две типичные фотографии, из которых отчетливо просматривается различие форм капель жидкого стекла на подложке кварцита. При этом даже не выполняя вычислений, можно сразу отметить, что разработанное жидкостекольное связующее обладает в сравнении с традиционным меньшей величиной краевого угла смачивания.

Результаты серии сравнительных экспериментов по определению краевого угла и меры смачивания кварцевой подложки жидким стеклом, изготовлены различными способами, приведены в табл. 1.

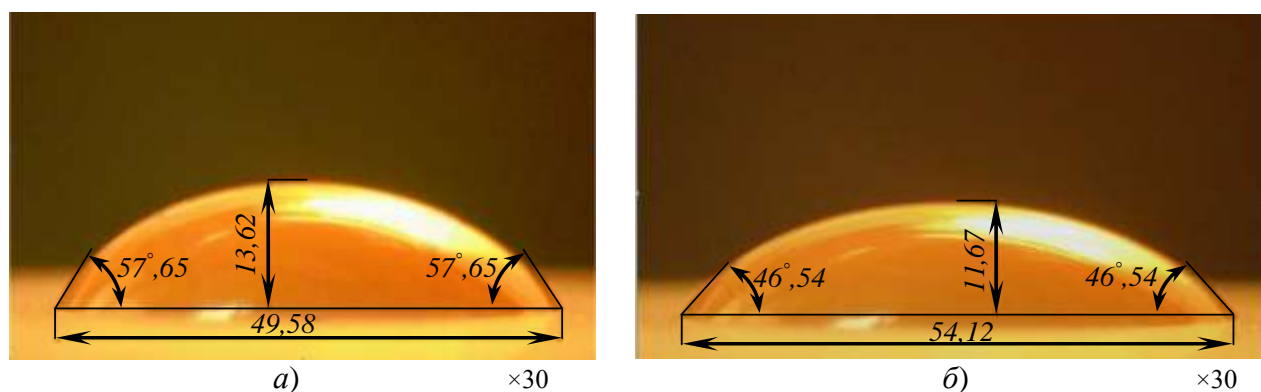


Рис. 2. Формы капель жидкого стекла ($M=2,6$, $\rho=1,48$ г/см³) на подложке кварцита при температуре 20 °С:

a – жидкое стекло, полученное автоклавным растворением силикат-глыбы;

б – жидкое стекло, полученное растворением наноразмерного щелочного силиката натрия (линейные размеры выражены условными единицами, определенными при обработке фотографий)

Таблица 1

Краевой угол и мера смачивания кварцитовой подложки традиционным и разработанным жидкостекольными связующими

Модуль связующего M	Плотность связующего ρ	Краевой угол смачивания кварцитовой подложки θ связующим		Мера смачивания кварцитовой подложки $\cos\theta$ связующим	
		обычным	разработанным	обычным	разработанным
—	г/см ³	град		—	
2,28	1,48	56,98	46,08	0,545	0,694
2,60		57,65	46,54	0,535	0,688
2,96		57,12	46,37	0,543	0,680
—		52,00*	—	0,615	—

* Данные А.М. Лясса [21]

Анализ результатов проведенных экспериментов позволяет сделать однозначный вывод о том, что разработанное жидкостекольное связующее характеризуется по отношению к традиционному улучшением смачивания кварцита, за счет снижения (в среднем на 10°) величины краевого угла смачивания. Данное обстоятельство будет способствовать при приготовлении смеси более равномерному распределению жидкого стекла по поверхности огнеупорного наполнителя, предоставляя возможность сокращения содержания связующего в смеси, улучшая, тем самым, выбиваемость последней.

Однако, как уже неоднократно отмечалось ранее, снижение количества связующего неразрывно связано с падением прочности смеси. Поэтому задачей дальнейших исследований явилось экспериментальное и расчетное определение свойств разработанного жидкого стекла, являющихся частью механизма формирования прочности смесей.

Второй этап работы включал в себя экспериментальное определение величины поверхностного натяжения разработанного жидкого стекла, расчет работы адгезии последнего к кварциту и оценку работы когезии жидкостекольного связующего.

Еще в 1933 г. П. П. Берг высказал предположение о зависимости прочности сырых смесей от величины поверхностного натяжения связующих материалов. Действительно, при разрыве столба жидкости возникают две новые поверхности, суммарная площадь которых

вдвое больше поперечного сечения первоначального столба жидкости [18]. Удельная работа когезии, необходимая для образования этих двух новых поверхностей, составит

$$A_{\text{ког}} = 2\sigma_{12}. \quad (2)$$

Следовательно, работа, затрачиваемая на разрыв жидких пленок связующих материалов, будет непосредственно зависеть от величины их поверхностного натяжения на границе с воздухом.

Помимо этого, экспериментально определенное значение поверхностного натяжения связующего σ_{12} (при известной величине краевого угла смачивания) позволяет вычислить величину работы адгезии связующего к твердому телу по уравнению Дюпре-Юнга [18, 22]

$$A_{\text{адг}} = \sigma_{12}(1 + \cos \theta). \quad (3)$$

Таким образом, адгезия между твердым телом и связующим зависит от многих факторов, основными из которых являются [22]:

1. Молекулярные силы, действующие между твердым телом и связующим (силы Ван-дер-Ваальса).
2. Адсорбция связующего на поверхности твердого тела (создание «молекулярного припоя» из поверхностно-активных веществ на подложке).
3. Химические реакции между связующим и подложкой и образование химической связи.
4. Двойной электрический слой, образующийся на границе раздела фаз «связующее – твердое тело».

В отличие же от адгезии когезия зависит только от поверхностного натяжения жидкости на границе с газовой фазой.

Определение величин поверхностных натяжений связующих материалов производили методом П.А. Ребиндера [23], основанном на известном принципе наибольшего давления в газовом пузырьке. Результаты экспериментального определения величины поверхностного натяжения жидкого стекла, изготовленного различными способами, а также расчетов работы когезии и адгезии жидких связующих сведены в табл. 2.

Таблица 2

Поверхностное натяжение, работа когезии, а также работа адгезии к кварциту традиционного и разработанного жидкостекольных связующих

Модуль связующего M	Плотность связующего ρ	Поверхностное натяжение σ_{12} связующего		Работа когезии $A_{\text{ког}}$ жидкого связующего		Работа адгезии к кварциту $A_{\text{адг}}$ жидкого связующего	
		обычного	разработанного	обычного	разработанного	обычного	разработанного
—	г/см ³	×10 ⁻³ н/м		×10 ⁻³ Дж/м ²			
2,28	1,48	67,99	72,11	135,98	144,22	105,04	122,15
2,60		68,13	72,87	136,26	145,74	104,58	123,00
2,96		68,55	72,79	137,10	145,58	105,77	122,29
—		71,90*	—	143,80	—	116,12	—

* Данные А.М. Лясса [21]

Сравнительное экспериментальное определение поверхностного натяжения изготовленных различными способами жидких стекол, согласно данным табл. 2, не выявило ка-

ких-либо значимых изменений этой характеристики. Вместе с тем, по отношению к обычному жидкому стеклу работа адгезии к кварциту предлагаемого связующего повысилась на 15 ... 17%.

Данное обстоятельство, с учетом соотношения [17]

$$\cos \theta = \frac{2A_{\text{адг}} - A_{\text{ког}}}{A_{\text{ког}}}, \quad (4)$$

позволяет сделать вывод о том, что улучшение смачиваемости разработанного жидкого стекла достигается за счет возрастания адгезии последнего к кварцу.

На следующем этапе работы определяли предел прочности при растяжении высушенных пленок жидкостекольных связующих в соответствии с методикой, разработанной А.М. Ляссом [21].

Образцы пленок жидкостекольных связующих имели форму, показанную на рис. 3, и испытывались после нанесения на подкладку – папиросную бумагу толщиной 25 мк.

В первую очередь, образцы, вырезанные из бумаги, обезжиривали и наклеивали на специальные рамки, установленные под углом 45°. Затем на них наливали связующее до полного покрытия всей поверхности, после чего полученные пленки высушивали при комнатной температуре. Перед испытаниями определяли предел прочности бумаги. Полученную величину впоследствии вычитали из показателя прочности образца.

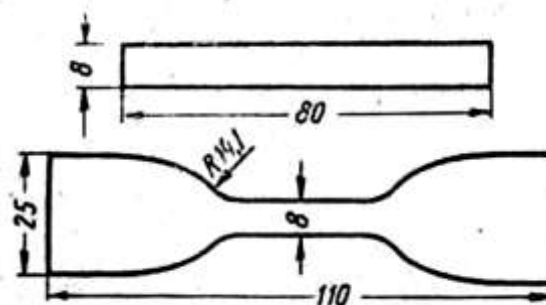


Рис. 3. Образец пленок связующих для испытания на растяжение [21]

Для оценки толщины пленок использовали вертикальный оптиметр ИКВ-02, позволяющий производить измерения с точностью до 0,0002 мм. Предел прочности при растяжении определяли на разрывной машине LRuTS. Для определения предела прочности пленки каждого из исследуемых связующих проводили испытания шести образцов.

Таблица 3

Предел прочности при растяжении высушенных пленок традиционного и разработанного жидкостекольных связующих

Модуль связующего M	Плотность жидкого связующего ρ г/см ³	Предел прочности при растяжении высушенной пленки связующего	
		обычного	разработанного
—	—	МПа	
2,28	1,48	85,6	118,1
2,60		84,1	116,5
2,96		83,4	109,8
—		87,0*	—

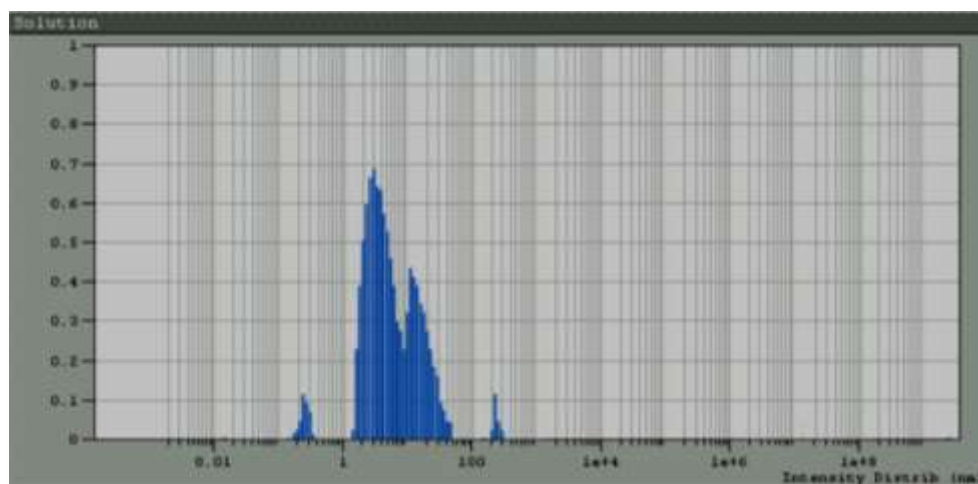
* Данные А.М. Лясса [21]

Результаты испытаний (табл. 3) свидетельствуют о существенном повышении прочности высушенных пленок разработанного жидкостекольного связующего. Очевидно, что

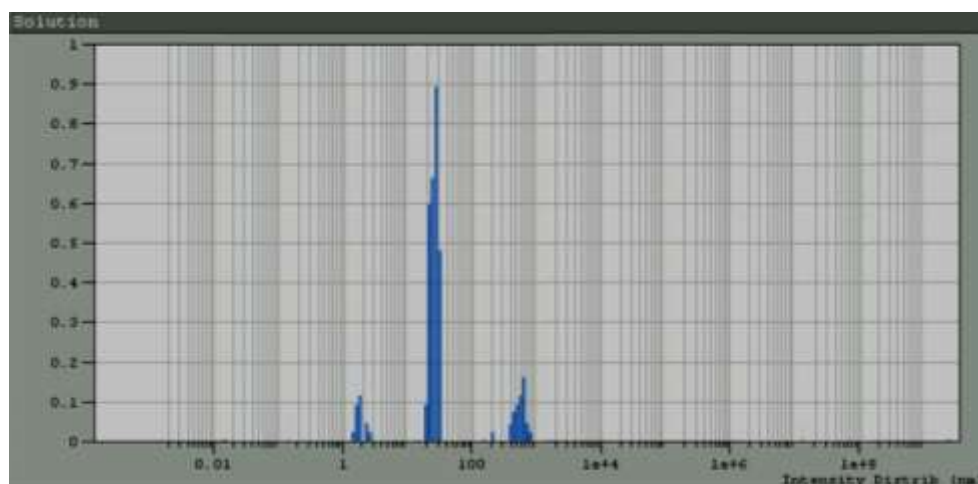
такое отличие когезионной прочности высушенных пленок разработанного и обычного связующих при практически одинаковом уровне прочности жидких пленок последних является следствием особенностей химического строения жидкого стекла – водного раствора щелочного силиката натрия, предварительно нанодиспергированного УВО.

Заключительным этапом работы явилась экспериментальная оценка размеров коллоидных частиц, присутствующих в водных растворах щелочного силиката натрия.

В работах [24, 25] отмечается, что на прочность пленок жидкого стекла может наиболее значимо влиять однородность размеров коллоидных частиц кремнезема. Наличие однородных частиц при высыхании связующего пленки приводит к формированию непрочной пленки, за счет невысокого относительного объема, занимаемого кремнеземом. Вместе с тем неоднородные коллоидные частицы кремнезема способны образовывать при высыхании жидкого стекла более плотные прочные пленки, поскольку промежутки между частицами большего размера заполняются частицами меньшего размера. Размеры же коллоидных частиц кремнезема могут быть существенно отличными в растворах одного и того же состава в зависимости от способа получения [1, 24, 25].



а)



б)

Рис. 4. Функциональные экраны программного комплекса DynaLS, отображающие распределение по размерам коллоидных частиц в жидком стекле ($M=2,6$), полученном из наноразмерного щелочного силиката натрия (а) и автоклавным растворением силикат-глыбы (б)

При помощи метода фотонной корреляционной спектроскопии [26, 27] была проведена серия экспериментов, целью которых являлось сравнительное определение величин частиц кремнезема в жидком стекле, полученном как обычным автоклавным способом, так и безавтоклавным растворением нанодиспергированной УВО силикат-глыбы.

Для исследования были взяты пять проб, три из которых представляли собой изготовленное в результате экспериментов безавтоклавным растворением нанодиспергированной УВО силикат-глыбы жидкое стекло с величиной силикатного модуля 2,28; 2,6 и 2,96. Две другие пробы – полученное традиционным автоклавным способом жидкое стекло, с модулем 2,6 и 2,96. Плотность жидкого стекла во всех пробах составляла 1,51 г/см³.

Перед измерениями все пробы очищали от нерастворившихся частиц фильтрованием через мембранные фильтры «Millipore» с диаметром пор 1,2 мкм.

В качестве источника света использовали He-Ne лазер ($\lambda=633$ нм, мощность 15 мВт). Угол рассеяния во всех экспериментах составлял 90°, температура в измерительной ячейке поддерживалась с точностью $\pm 0,1^\circ\text{C}$. Значения интенсивности статического светорассеяния усредняли по 60 измерениям, проводимым с интервалом 1 с.

На рис. 4, а представлена фотография функционального экрана программного комплекса DynaLS, отображающего типичные результаты распределения по размерам коллоидных частиц кремнезема в полученном из наноразмерного силиката натрия жидком стекле с величиной модуля 2,6. Обработка результатов всей серии экспериментов позволяет сделать заключение, что независимо от модуля пробы средний размер наибольшего (превалирующего) количества коллоидных частиц кремнезема в полученном из нанодиспергированного УВО щелочного силиката натрия жидком стекле колеблется в пределах 2 ... 30 нм.

В результате проведенной серии экспериментов с пробами жидкого стекла, изготовленного традиционным автоклавным растворением силикат-глыбы, было установлено, что также независимо от модуля пробы коллоидные частицы кремнезема характеризуются большей однородностью по размерам, укладываемым в интервал 20 ... 30 нм (рис. 4, б).

Выводы

1. Показано, что вследствие возрастания адгезии разработанного жидкого стекла к кварцу краевой угол смачивания последнего сокращается по отношению к обычному связующему на 18 ... 20%.

2. Экспериментально установлено, что большая размерная неоднородность частиц коллоидного кремнезема в разработанном связующем по сравнению с обычным жидким стеклом – 2 ... 30 нм и 20 ... 30 нм соответственно, при высушивании способствует формированию более плотных и компактных упаковок кремнезема, приводя к возрастанию когезионной прочности пленок связующего на 27 ... 34 %.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

Библиографический список

1. **Корнеев, В. И.** Растворимое и жидкое стекло / И. В. Корнеев, В. В. Данилов. – СПб.: Стройиздат, 1996. – 215 с.
2. Формовочные материалы и технология литейной формы / под. общ. ред. С. С. Жуковского. – М.: Машиностроение, 1993. – 432 с.
3. **Голотенков, О. Н.** Исследование механизма разрушения стержней на вибрационных выбивных машинах / О. Н. Голотенков, А. К. Лифанов, А. И. Антонов // Литейщик России. 2007. № 10. С. 34–37.

4. Технология литейного производства специальные виды литья / под ред. В. А. Рыбкина. – М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 352 с.
5. **Евстигнеев, А. И.** Жидкостекольные смеси с улучшенными технологическими свойствами / А. И. Евстигнеев, В. В. Петров, Э. А. Дмитриев // Литейное производство. 2008. № 12. С. 20–27.
6. **Кидалов, Н. А.** Выбор технологических добавок в составы жидкостекольных смесей // Литейщик России. 2006. № 7. С. 34–41.
7. **Петров, В. В.** Химическая активация наполнителя стержневых смесей и исследование физико-механических свойств стержней / В. В. Петров, Э. А. Дмитриев, Н. В. Захаров // Литейное производство. 2006. № 2. С. 7–8.
8. **Илларионов, И.Е.** Формовочные материалы и смеси Ч. 2. / И.Е. Илларионов, Ю.П. Васин. – Чебоксары: Изд-во при Чуваш. ун-те, 1995. – 288 с.
9. **Алиев, Д. О.** Исследование механизма формирования прочности жидкостекольных смесей и разработка состава жидкостекольной смеси улучшенной выбиваемости: дисс. ... канд. техн. наук / Д. О. Алиев. – Волгоград, 2004. – 168 с.
10. **Дмитриев, Э. А.** Улучшение свойств жидко-стекольных смесей армированием / Э. А. Дмитриев, В. В. Петров, Е. А. Тюрина // Литейное производство. 2006. № 7. С. 13–16.
11. **Johnson, J. A.** Transition metal ions in ternary sodium silicate glasses: a mossbauer and neutron study / J. A. Johnson, C. E. Johnson // Journal of Non-Crystalline Solids. 1999. V. 246.No. 1-2. P. 104–114.
12. **Бречко, А. А.** Формовочные и стержневые смеси с заданными свойствами / А. А. Бречко, Г.Ф. Великанов. – Л.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
13. **Васин, Ю. П.** Жидкостекольные формовочные смеси с улучшенными свойствами / Ю. П. Васин [и др.] // Литейное производство. 1986. № 4. С. 11–12.
14. Исследование возможности повышения производительности процесса получения жидкого стекла за счёт ударно-волновой обработки растворяемого твёрдого компонента / В.В. Юрасов, [и др.] // Изв. ВолгГТУ. Серия «Сварка взрывом и свойства сварных соединений»: межвуз. сб. науч. ст. / ВолгГТУ. Волгоград, 2008. Вып. 3. № 3. С. 123–130.
15. **Юрасов, В.В.** Исследование растворения силикат-глыбы активированной ударно-волновой обработкой / В.В. Юрасов [и др.] // Литейщик России. 2008. № 10. С. 33–35.
16. **Юрасов, В.В.** Разработка жидкостекольного связующего для смесей литейного производства из нанодиспергированных ударно-волновой обработкой щелочных силикатов натрия / В.В. Юрасов, Т.Ш. Сильченко, Н.А. Кидалов // Литейщик России. 2011. № 2. С. 42–46.
17. **Сумм, Б. А.** Физико-химические основы смачивания и растекания / Б. А. Сумм, Ю. В. Горюнов. – М.: Химия, 1976. – 232 с.
18. **Сивухин, Д. В.** Общий курс физики: т. II. Термодинамика и молекулярная физика / Д. В. Сивухин. – М.: Наука, 1975. – 552 с.
19. **Зимон, А. Д.** Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
20. **Закутаев, В.А.** Разработка ресурсосберегающих составов песчано-глинистых смесей и разделительных покрытий для получения отливок из железоуглеродистых сплавов: дисс. ... канд. техн. наук / В.А. Закутаев. – Волгоград, 2011. – 201 с.
21. **Лясс, А. М.** Быстротвердеющие формовочные смеси / А. М. Лясс. – М.: Машиностроение, 1965. – 332 с.
22. **Баландин, Г. Ф.** Физико-химические основы литейного производства / Г. Ф. Баландин, В. А. Васильев. – М.: Машиностроение, 1971. – 176 с.
23. **Ребиндер, П. А.** Поверхностные явления в дисперсных системах. Физико-химическая механика / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
24. **Айлер, А. К.** Химия кремнезема. Ч. 1: [пер. с англ. Л. Т. Журавлева] / А. К. Айлер; под ред. В. П. Прянишникова. – М.: Мир, 1982. – 1106 с.
25. **Григорьев, П. Н.** Растворимое стекло / П. Н. Григорьев, М. А. Матвеев. – М.: Промстройиздат, 1956. – 444 с.
26. Спектроскопия оптического смешения и корреляция фотонов / под ред. Г. Камминса, Э. Пайка. – М.: Мир, 1978. – 583 с.

27. Штокман, М.И. Спектроскопия рассеянного света в биологии и биофизике / М.И. Штокман // Автометрия. 1980. №1. С. 85–98.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

V.V. Yurasov, T.S. Silchenko, N.A. Kidalov

THE INVESTIGATION OF COMPLEX INFLUENCE OF PROPERTIES OF SODIUM SILICATE BINDER, MANUFACTURED FROM NANOSISED SILICA CONTAINING MATERIALS, ON TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF FOUNDRY MIXTURES

In this article the results of an experimental investigation of main physicochemical properties of new binder from liquid glass for molding mixes manufactured by nonautoclave mode of production from alkaline sodium silicate, which was previously nanodispersed by the shock-wave treatment, are presented; The mechanism of increasing strength characteristics of developed binder from liquid glass for molding mixtures is revealed; the possibility of reducing of knockout operation of mixes with liquid glass by means of reducing the content of elaborated binder.

Key words: binder from liquid glass, contact angle, limit of the cohesive strength, colloidal silica, molding mixture, knockout operation.

УДК 669.74

**Ю.А. Зиновьев, А.А. Колпаков, И.О. Леушин, В.Д. Швецов,
Г.И. Белявский, А.М. Тимофеев**

УВЕЛИЧЕНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ЖАРОПРОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ ТЕРМИЧЕСКИХ АГРЕГАТОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ОАО «ГАЗ»

В работе приведены результаты исследования нового жаропрочного сплава для термических агрегатов. Длительная прочность звеньев цепей увеличилась более чем в четыре раза.

Ключевые слова: жаропрочный сплав, длительная прочность, звенья цепи, термические агрегаты.

Жаропрочность – это способность стали и сплавов длительно противостоять при высоких температурах действию внешних механических нагрузок, вызывающих пластическую деформацию и разрушение. Естественно, что жаропрочные стали и сплавы будут отвечать своему назначению только в том случае, если они будут обладать одновременно высокими характеристиками прочности и пластичности при высоких температурах, а также высокой окалинотойкостью (жаростойкостью).

Условия эксплуатации жаропрочных сталей могут резко различаться по длительности сроков службы, по величине и сложности напряженного состояния и по рабочим температурам [1]. Так, в прямоточных котлах и паровых турбинах параметры пара могут достигать до 300 с лишним ат/см² при 600–650°С. Требуемая длительность службы деталей установок исчисляется десятками тысяч часов.

В газовых турбинах и реактивных двигателях лопатки, диски, трубы и другие детали работают при температурах около 700–1000°С в сложно нагруженном состоянии, но более короткое время, исчисляемое несколькими сотнями часов.

В зависимости от назначения и условий эксплуатации к сталям и сплавам предъявляются весьма различные требования. Основным требованием к стали для котлотурбинных установок является высокое сопротивление ползучести, т.е. сопротивление к накоплению пластической ползучести материала во времени под действием постоянного напряжения. Детали турбореактивных двигателей должны иметь высокую длительную прочность, т.е. противостоять разрушению под влиянием постоянно действующей механической нагрузки, а также высокое сопротивление коррозионному разрушению. К техническим требованиям, предъявляемым к жаропрочным сталям и сплавам, относятся также и хорошие технологические свойства (хорошая свариваемость, деформируемость, отсутствие склонности к трещинообразованию, хорошие литейные свойства и пр.).

Удовлетворение всех этих сложных и разнообразных требований возможно только при комплексном легировании стали и создании сложнотермических сплавов, в которые вводят большие количества никеля и хрома. Кроме того, в такие стали и сплавы вводят титан, алюминий, вольфрам и молибден.

Высокую окалинотойкость сталям и сплавам придают хром, алюминий, никель и кремний. Под воздействием кислорода воздуха в поверхностных слоях нержавеющей стали и сплавов, легированных хромом, возникает оксидная труднопроницаемая защитная пленка, обогащенная хромом, вследствие чего и создается высокая окалинотойкость хромистой стали и сплавов.

Для надежной защиты металла от дальнейшего окисления, особенно при высоких

температурах, образуемая элементами окисная пленка должна быть прочной, плотной, непроницаемой для кислорода атмосферы. Именно такую пленку на железных сплавах и образует хром, окислы которого имеют плотность и молекулярный вес, близкие к окислам железа. При циклических нагревах и охлаждениях таких сталей и сплавов не происходит ни растрескивания, ни отслаивания оксидной пленки.

Никель в жаропрочных сталях и сплавах повышает окалиностойкость и способствует образованию однофазной стабильной аустенитной структуры.

Стабильность структуры и свойств жаропрочных сталей и сплавов при высоких температурах обеспечивают легированием элементами, образующими очень стойкие против коагуляции при высоких температурах карбиды и интерметаллические соединения. К таким элементам относятся титан, ниобий, молибден, вольфрам и др.

Высокие жаропрочные свойства создаются при последующей термической обработке. Задача термической обработки жаропрочных сталей и сплавов заключается в получении вначале обогащенного легирующими элементами аустенита, а затем – в выделении из этого аустенита дисперсных частиц упрочняющих фаз: карбидов и интерметаллидов. Это осуществляется закалкой с высоких температур и высоким отпуском, при котором происходит дисперсионное твердение стали и сплавов.

Большой стабильностью структуры и более высокими механическими свойствами при высоких температурах обладают жаропрочные сплавы на нежелезной основе, например, на никелевой.

Основным недостатком жаропрочной литейной стали типа 08X17H34B5T3Ю2РЛ [2], применяемой для изделий, работающих под нагрузкой при температуре 800-900°C, является слабое сопротивление межкристаллитной коррозии и ползучести ввиду диффузии хрома из пограничных районов зерна в границу зерна с образованием карбида хрома $(Cr, Fe)_{23}C_6$, дисперсные частицы которого располагаются по границам зерен. Данная фаза является упрочняющей и препятствует движению дислокаций, однако в интервале температур 620–670°C сложный карбид хрома $(Cr, Fe)_{23}C_6$ коагулирует с образованием крупных частиц, которые уже слабо препятствуют высокотемпературной ползучести и, кроме того, уже сами становятся концентраторами напряжения с последующим превращением их в микротрещины и дальнейшим разрушением изделия. Раскисление алюминием и ввод титана сопровождается падением ударной вязкости из-за неблагоприятного распределения неметаллических включений в виде плен и остроугольных нитей и увеличению усадочной пористости. Ввод бора приводит к образованию хрупкой фазы по границам зерен.

Поэтому необходимо было провести дополнительное легирование с целью предотвращения диффузии хрома из приграничной области зерна аустенита в границы зерен, поскольку тем самым снижается вероятность межкристаллитной коррозии. Для этого ввели новые легирующие элементы Nb, Ce и Ca, которые, образуя тугоплавкие карбиды, препятствуют высокотемпературной ползучести при температурах 800-900°C. При высокотемпературной эксплуатации атомы вольфрама частично диффундируют из раствора внедрения в границу зерна с образованием фазы Лавеса, что также является упрочняющей фазой, противостоящей высокотемпературной коррозии.

Содержание W и Nb ограничивается соответственно 2,5-3,2 W и 0,7-1,0 Nb, т.к. при превышении этих норм возрастает опасность образования феррита и снижения пластичности материала ввиду образования значительного количества карбидной фазы.

Длительная прочность жаропрочных изделий – звеньев цепи при 800°C термических агрегатов из стали 08X17H34B5T3Ю2РЛ составляет 2 месяца, и их заменяют на новые ввиду их большого износа и образования трещин.

Другим недостатком этой стали было низкое содержание углерода, что приводило к малой жидкотекучести и плохой заполняемости тонких стенок звеньев цепей, и как следствие, к появлению дефектов: спай, недолив, неслитина, усадочная пористость, что также уменьшало ресурс работы звеньев цепей.

Задачей данной работы было увеличение долговечности звеньев цепей и других изделий для термических агрегатов.

Технический результат достигается тем, что сталь [3], содержащая углерод, хром, никель, кремний, марганец, вольфрам, дополнительно содержит ниобий, РЗМ, кальций и цирконий, при следующем соотношении компонентов, масс, %:

Углерод	0,15-0,28
Хром	16,0-20,0
Никель	28,0-32,0
Кремний	1,8-2,2
Марганец	0,4-0,9
Вольфрам	2,5-3,2
Ниобий	0,7-1,0
РЗМ	0,005-0,2
Кальций	0,005-0,2
Цирконий	0,04-0,06
Сера	$\leq 0,02$
Фосфор	$\leq 0,03$
Железо	остальное

Так как W и Nb обладают большей активностью по отношению к углероду, чем хром, то они оттягивают на себя значительное количество углерода и предотвращают диффузию хрома из приграничной области зерна аустенита в границу зерна, тем самым снижая вероятность межкристаллитной коррозии. Кроме этого, образуя тугоплавкие карбиды (коагуляция этих карбидов происходит при температурах 800-900°C), препятствуют высокотемпературной ползучести при более высоких температурах.

Высокие концентрации хрома (16-20%) и никеля (28-32%) обеспечивают наилучшие сочетания длительной прочности и стойкости против окисления.

Повышенное содержание углерода (0,15-0,28% против до 0,08%) улучшает жидкотекучесть, достаточную для получения бездефектных, без спаев и микропор, тонких стенок (3-4 мм) жаропрочных изделий. Увеличивать содержание углерода более 0,28% нельзя, так как уменьшается жаропрочность сплава.

Кремний в приведенных пределах повышает стойкость против окисления, увеличивая стабильность окисной пленки. Верхний предел по кремнию ограничен (2,2%) из-за опасности ферритообразования и ускорения образования дельта-фазы, которая снижает ударную вязкость и пластичность при высоких температурах.

Верхний предел по марганцу ограничен из-за роста зерна при высокой температуре (800°C) и сопровождается повышением концентрации вредных примесей, приводящим к снижению механических свойств. Кроме того, повышение содержания марганца может инициировать образование дельта-фазы, которая снижает предел текучести стали и приводит к возникновению микротрещин.

Ниобий тормозит диффузионный обмен при высоких температурах (800°C), затрудняя коагуляцию дисперсных фаз и вызывая тем самым повышение предела текучести. Превышение содержания ниобия выше 1,0% приводит к неоднородному распределению соединений ниобия при повышенных температурах, что может вызвать появление разностенности и развитие микротрещин в междендритном пространстве.

Наименьшее пленообразование достигнуто при вводе 0,12% силикокальция (Са=0,01%) и РЗМ ($\Sigma=0,15\%$). При такой обработке устраняются дефекты отливок по пленам, спаю и горячим трещинам. Кроме того, эти добавки устраняют локальные скопления оксидных включений, способствуя их глобуляризации, что приводит к повышению пластичности, ударной вязкости при высоких температурах.

Цирконий, обладая большим сродством к кислороду, сере и азоту, образует с ними интерметаллиды глобулярной формы, кроме очистки границ зерен, замедляет рост зерна при

нагреве, увеличивая прочность сцепления эвтектических фаз, препятствуя межкристаллитному разрушению.

На ГАЗе*, в условиях литейного цеха, были проведены сравнительные плавки стали с известным и предложенным химсоставом, с заливкой звеньев цепи термического агрегата. Сталь выплавляли в индукционной печи ИСТ-016 с кислой футеровкой. В качестве шихты использовали: сталь 10, отходы жаропрочной стали, FtCr, FeW, FeNb, FeSi, FeMn. Раскисляли SiCa и ФС 30РЗМ30 с добавлением FeZr. Химсостав приведен в табл. 1.

Таблица 1

Химсостав плавок стали

Сплав	Химический состав													Наличие термообработки
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	
1	С	Si	Mn	Cr	Ni	W	Ti	B	Al	Nb	Ce	Ca	Zr	15
Предлагаемый 1	0,18	1,7	0,3	15,0	27,0	2,3	-	-	-	0,6	0,05	0,02	0,03	без т/о
2	0,20	1,8	0,4	16,0	28,0	2,5	-	-	-	0,7	0,06	0,03	0,04	без т/о
3	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	0,05	без т/о
4	0,28	2,2	0,9	20,0	32,0	3,2	-	-	-	1,0	0,1	0,06	0,06	без т/о
5	0,30	2,3	1,0	21,0	33,0	3,3	-	-	-	1,2	0,08	0,04	0,07	без т/о
6	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	-	0,04	0,05	без т/о
7	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	-	0,05	без т/о
8	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	-	без т/о
9	0,24	2,0	0,6	18,0	30,0	3,0	-	-	-	0,8	0,08	0,04	0,05	без т/о
Известный 10	0,06	0,2	0,3	15,0	32,0	4,5	2,6	0,03	1,7	-	-	-	-	с т/о
11	0,08	0,5	0,6	18,0	35,0	5,5	3,2	0,05	2,1	-	-	-	-	с т/о

Как видно из табл. 2, звенья цепи из известного сплава (табл. 2, сплавы № 10-11) имели большой брак по спаю, горячим трещинам и усадочной пористости. Звенья цепи, отлитые из известного сплава, разрушились в термическом агрегате через 2 месяца. Звенья цепи, отлитые из предлагаемого сплава (табл. 1, сплавы № 2-4), не имели названных дефектов и стоят в термическом агрегате 8 месяцев без разрушения (табл. 2, сплавы № 2-4).

Таблица 2

Дефекты отливок у известного и предлагаемого сплавов

Сплав №	Брак по спаю в стенке толщиной 3 мм, %	Брак по горячим трещинам, %	Усадочная пористость, %	Время до разрушения в термическом агрегате при T=800-900°C
1	3	4	6	не ставились
2-4	0	0	0	8 месяцев, не разрушились
5	0	0	0	8 месяцев, не разрушились
6	8	5	4	не ставились
7	12	6	5	не ставились
8	9	12	7	не ставились
9	0	0	0	не ставились
10-11	18-24	15-17	10-12	2 месяца

Сравнительный анализ признаков, отличающих данное предложение от известных в этой области технических решений, показал, что в данном сочетании проявляется новое свойство – исключение пористости при повышении долговечности.

Суммарное содержание составляет $Sa+Se+Zr=0,13-0,22\%$. При содержании менее $0,13\%$ увеличивается брак по спаю, горячим трещинам, усадочной пористости. При содержании более $0,225$ увеличивается количество неметаллических включений, и долговечность уменьшается.

Библиографический список

1. **Паисов, И.В.** Термическая обработка стали и чугуна / И.В. Паисов. – М.: Изд-во «Металлургия». 1970. – 264 с.
2. Жаропрочная сталь 08X17H34B5T3Ю2РЛ. ГОСТ 5632-72.
3. Пат. на изобретение № 2416669 С 22 С 38/50. Жаропрочная сталь / Зиновьев Ю.А. и др. Бюллетень № 11. 2011.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

**Yu.A. Zinoviev, A.A. Kolpakov, I.O. Leushin, V.D. Shvetsov,
G.I. Beliavsky, A.M. Timofeev**

INCREASING THE LONG-TERM STRENGTH OF HEAT-TREATING FURNACES HEATPROOF PRODUCTS

The article suggests results of research into a new heatproof alloy for heat-treating furnaces. The long-term strength of chains links has more than quadrupled.

Key words: heatproof alloy, long-term strength, chains links, heat-treating furnaces.

УДК 621.74

В.М. Сенопальников, В.Л. Сивков

О СВЯЗИ КОНВЕКЦИИ С РАЗВИТИЕМ НЕОДНОРОДНОСТИ В СЛИТКЕ СПОКОЙНОЙ СТАЛИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

На основании литературных данных и собственных исследований предложен механизм связывающий формирование структурных и ликвационных дефектов в слитке спокойной стали с конвективным движением затвердевающего расплава.

Ключевые слова: стальной слиток, конвекция, структурная неоднородность, ликвация, градиент скорости, изолированные кристаллы.

В классическом случае кристаллическое строение стального слитка предусматривает наличие трех зон – поверхностной мелких равноосных (замороженных, резкоохлажденных) кристаллов, столбчатых кристаллов (шестоватых) и разноориентированных (равноосных, глобулярных) кристаллов. В последней выделяются: мелкокристаллическая структура в придонных объемах – «конус кристаллов»; Λ -образная внеосевая сегрегация, «мост» – область плотного металла в подприбыльной части слитка, состоящая из крупных разноориентированных кристаллов, под которой располагается V-образная неоднородность; зоны положительной и отрицательной ликвации.

Рассмотрим возможный механизм формирования указанных видов неоднородности с учётом гетерогенного механизма зарождения кристаллов в переохлаждённом расплаве и результатов исследований [1] конвекции расплава при формировании слитка (рис. 1).

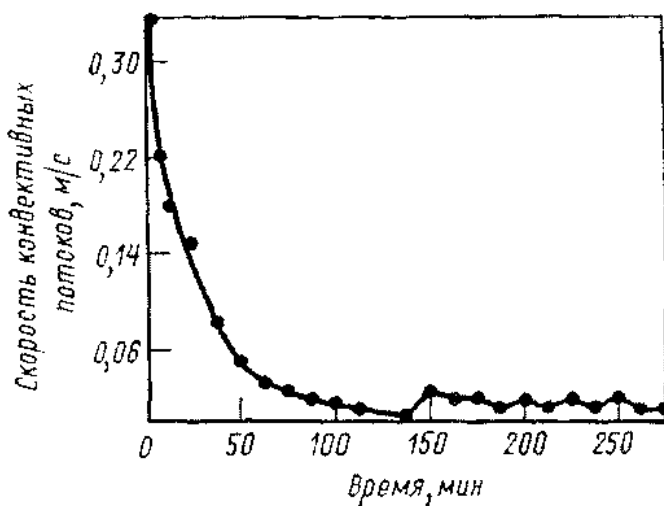


Рис. 1. Изменение скорости конвективных потоков в 40-тонном слитке в зависимости от продолжительности кристаллизации (через 50 мин после окончания заливки – 0,03 м/с; через 130 мин равна нулю) [1]

зародившихся кристаллов препятствует их росту, а металлостатическое давление – смыванию с последнего слоя.

Формирование зоны замороженных кристаллов происходит в условиях интенсивной конвекции. Отсюда следует, что зарождение первого слоя кристаллов этой зоны возможно только на поверхности изложницы – при отсутствии прочного сцепления с формой эти кристаллы неизбежно были бы смыты нисходящим потоком, скорость которого более 0,3 м/с (турбулентный режим течения). Часть кристаллов, зародившихся в переохлаждённом расплаве на некотором удалении от поверхности формы, уносится конвективным потоком и расплавляется в перегретом объеме стали. Но другая часть присоединяется к поверхности охлаждения за счёт усадочных перемещений расплава, возникающих при затвердевании первого слоя. При этом значительное количество зародившихся кристаллов препятствует их росту, а металлостатическое давление – смыванию с последнего слоя.

Сила, действующая на изолированные кристаллы со стороны жидкости, перемещающейся вследствие усадки, определяется как [2]:

$$F_{\text{ус.к}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{ус.к}} dV_{\text{к}}, \quad (1)$$

где $\text{grad } P_{\text{ус.к}} = \gamma v_x dv_x/dx$ – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объёма при фазовом переходе; γ – плотность жидкости; v_x – скорость усадочных перемещений жидкости к фронту затвердевания; $V_{\text{к}}$ – объёмы кристалла.

Исходя из сказанного, можно объяснить существенное расширение (в 3-5 раз, [3]) поверхностного слоя мелкозернистой структуры в объёмах слитка изолированных от естественной конвекции, – все зарождающиеся в переохлаждённом слое кристаллы присоединяются к вертикальному фронту затвердевания. Следует отметить, что при малом переохлаждении в пристенном слое (имеет место в случае интенсивной вынужденной конвекции за счёт электромагнитного перемешивания расплава при формировании слитков ВДП [4] или использовании предварительно разогретой футеровки прибыльной надставки при литье обычных слитков [5]) «замороженный» слой, как правило, не образуется.

Формирование столбчатой структуры. Вследствие нарастания теплового сопротивления затвердевшей корки и выделения теплоты кристаллизации величина термического переохлаждения перед фронтом затвердевания ($\Delta T_{\text{п}}$) становится недостаточной для зарождения изолированных кристаллов ($\Delta T_{\text{з.кр}}$), но достаточной для роста их осей ($\Delta T_{\text{р.к}}$):

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} < \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (2)$$

В этих условиях начинается преимущественный рост осей кристаллов «замороженного» слоя в сторону, обратную направлению градиента температуры в слитке, так как рост параллельно поверхности охлаждения невозможен из-за наличия соседних дендритов. Рост дендритов сопровождается образованием на их поверхности слоя, обогащенного ликвирующими примесями. Температура ликвидуса сплава в этом слое падает, соответственно снижается и величина термического переохлаждения. При наличии достаточно интенсивного турбулентного потока, нисходящего вдоль фронта затвердевания, обеспечивается интенсивная конвективная диффузия примесей с обращенной к расплаву поверхности столбчатых кристаллов, что стимулирует их рост в направлении обратном теплоотводу. В тоже время усадка при фазовом переходе препятствует выносу обогащенного примесями расплава из межосных пространств в жидкую сердцевину слитка, что тормозит кристаллизацию в этих пространствах. Развивается твердо-жидкая область. При её затвердевании получает развитие дендритная неоднородность, но отсутствует макроликвация. В результате химический состав транскристаллитной зоны слитков спокойной стали, определяемый по анализу стружки, соответствует ковшевой пробе (в кипящей стали интенсивное газовыделение способствует выносу ликватов в жидкую фазу и обеднению зоны столбчатых кристаллов углеродом и примесями [6]).

Развитие жидко-твёрдой области в формирующемся слитке. По мере снижения температурного градиента перед фронтом затвердевания (из-за увеличения теплового сопротивления затвердевающей корки стали, охлаждения внутренних объемов расплава и нагрева изложницы) скорости конвективных потоков в расплаве уменьшаются, турбулентное течение переходит в ламинарное. Интенсивность конвективной диффузии примесей от поверхности кристаллов в расплав в значительной мере снижается. Это приводит к возрастанию концентрации примеси в ликвационном слое и снижению температуры ликвидуса сплава. Соответственно непосредственно перед вершинами столбчатых кристаллов величина термического переохлаждения расплава становится меньше, чем на некотором удалении от него. Это явление А. Оно [7] назвал «концентрационной депрессией термического переохлаждения» ($\Delta T_{\text{кдтп}}$). Д.Д. Саратовкин полагает: «Область жидкой фазы оказывается изолированной от твердой фазы слоем повышенной концентрации примесей, и дальнейшая кристаллизация в

ней может происходить путём образования новых центров кристаллизации, возникающих благодаря местному переохлаждению на некотором расстоянии от конца дендритов зоны транскристаллизации» [8].

В ликвационном слое перед фронтом кристаллизации переохлаждение ($\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}}$) является достаточным для роста кристаллов, но недостаточным для зарождения новых:

$$\Delta T_{\text{р.к}} < \Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} < \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (3)$$

Непосредственно за зоной КДТП термическое переохлаждение расплава достигает величин, достаточных для зарождения кристаллов на имеющихся активных примесях:

$$\Delta T_{\text{п}} - \Delta T_{\text{КДТП}} > \Delta T_{\text{з.кр}}. \quad (4)$$

При затвердевании технически чистых металлов малая концентрация примесей в расплаве (и соответственно низкие значения $\Delta T_{\text{КДТП}}$ на фронте твердо-жидкой зоны) не препятствует росту столбчатых кристаллов даже при незначительной интенсивности конвекции в малых объёмах, но в реальных сплавах снижение $\Delta T_{\text{КДТП}}$ перед межфазной поверхностью достигается только в условиях турбулентного конвективного потока.

Повышенной длительностью интенсивной естественной конвекции жидкого металла можно объяснить факты увеличения протяженности столбчатой структуры при повышении перегрева расплава, разливаемого в изложницы, а также при возрастании массы слитка [9].

Массоперенос при формировании зоны разноориентированных кристаллов. Рассмотрим силы, действующие на зародившиеся за зоной КДТП изолированные кристаллы.

1. Силы давления со стороны потока расплава, направленного на компенсацию усадки в твёрдо-жидкой зоне, определяются выражением (1) и обеспечивают перенос кристаллов к фронту затвердевания.

2. Силы гравитации – повышенная плотность (~ на 4%) твёрдых частиц по сравнению с расплавом приводят к их погружению в последний.

3. Силы давления со стороны нисходящего конвективного ламинарного потока возникают в связи с наличием градиента скорости в поперечном сечении этого потока. Направление этих сил определяется из следующих соображений. Непосредственно за зоной КДТП переохлаждение расплава и его плотность максимальны. Соответственно максимум скорости нисходящего ламинарного конвективного потока ($v_{\text{п}} = \max$, рис. 2, а) располагается на некотором расстоянии от границы твёрдо-жидкой и жидко-твёрдой зон, определяемом шероховатостью первой и вязкостью расплава. Далее скорость движения жидкости падает до нуля на границе с восходящим потоком. Изолированные кристаллы погружаются в жидкости ($v_{\text{к}} > v_{\text{п}}$), причем скорость погружения увеличивается по мере удаления от фронта кристаллизации, так как менее переохлажденная жидкость имеет пониженную вязкость (рис. 2, б). Профиль величин скорости движения кристаллов относительно перемещающегося расплава $v_{\text{к}}$, имеет максимумы на линиях нулевых скоростей конвекции и минимум по линии максимальной скорости потока (рис. 2, в).

Максимальное давление имеет место в зоне минимальной скорости и по сечению двухфазного потока возникают разнонаправленные градиенты давления и силы, перемещающие кристаллы (рис. 2, в):

$$F_{\text{к}} = - \int_0^v \text{grad } P_{\text{к}} dV,$$

где $\text{grad } P_{\text{к}} = \gamma v'_{\text{к}} dv'_{\text{к}}/dx$; $P_{\text{к}}$ – давление на изолированный кристалл со стороны нисходящего потока расплава; $v'_{\text{к}}$ – скорость движения изолированных кристаллов относительно перемещающегося расплава, ($v'_{\text{к}} = v_{\text{к}} - v_{\text{п}}$).

Таким образом, в нисходящем конвективном потоке возникают силы, способствующие концентрации изолированных кристаллов вдоль оси максимальной скорости этого потока и препятствующие их переносу к фронту твердо-жидкой зоны усадочными перемещениями.

Исключением является узкая пристенная область двухфазного потока (скорость потока на границе раздела фаз равна нулю). Здесь силы, действующие на кристаллы $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$, однонаправлены. Это препятствует отрыву присоединившихся к фронту твердой фазы изолированных кристаллов.

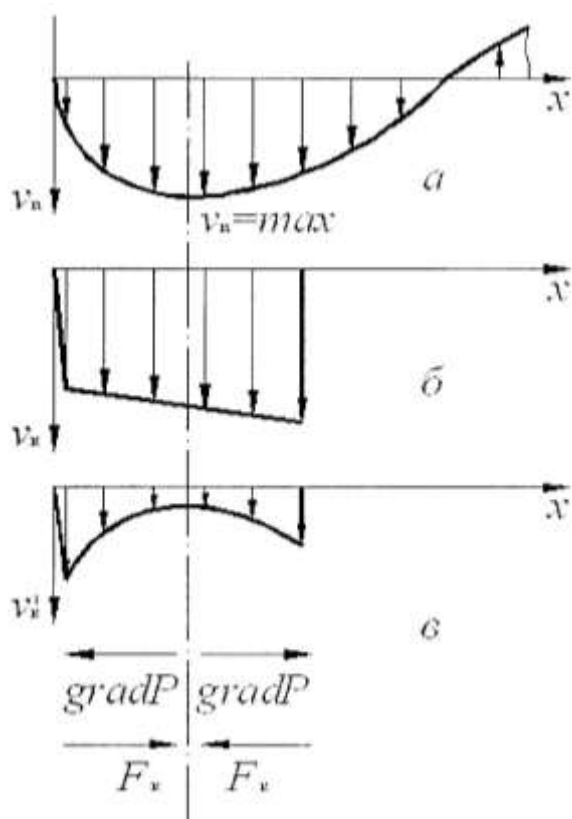


Рис. 2. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на изолированные кристаллы:

a – профиль скоростей конвективного потока;
б – профиль скоростей погружения кристаллов в расплаве;
в – профиль скоростей движения кристаллов относительно жидкости

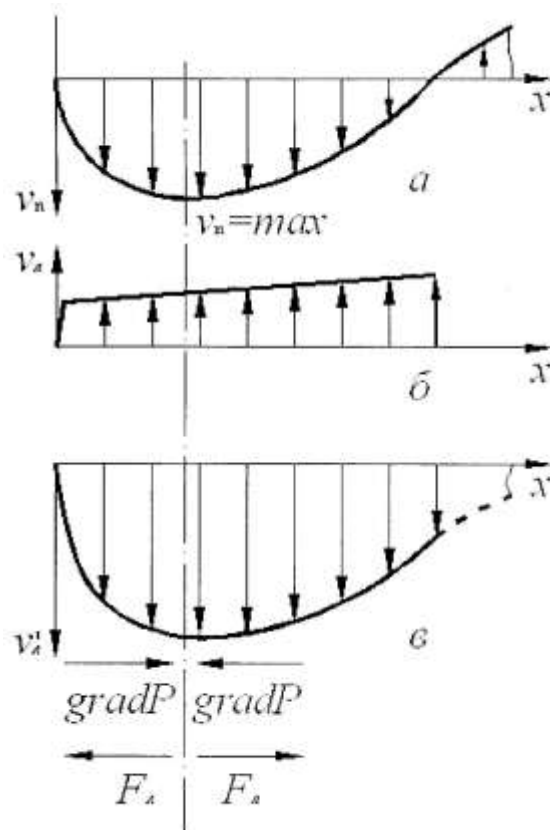


Рис. 3. Схема возникновения сил давления в нисходящем потоке расплава на ликваты:

a – профиль скоростей конвективного потока;
б – профиль скоростей всплывания ликватов в расплаве;
в – профиль скоростей движения ликватов относительно жидкости

Наличие переохлаждения в расплаве обеспечивает рост изолированных кристаллов и, как следствие, обогащение поверхности их осей примесями. Часть ликватов выносятся из межосных пространств в окружающий расплав вследствие газовыделения (при снижении растворимости газов при фазовом переходе), капиллярного и фильтрационного массопереноса [1]. Можно предположить, что, имея отличные от окружающего расплава поверхностное натяжение и вязкость, а также пониженные плотность и температуру затвердевания, ликваты могут какое-то время существовать в виде самостоятельных образований. На эти образования, так же, как на изолированные кристаллы, действуют силы давления, возникающие при усадочных перемещениях расплава $F_{\text{ус.л}}$ и вследствие наличия градиента скорости по сечению нисходящего потока $F_{\text{л}}$:

$$F_{\text{ус.л}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{ус.л}} dV_{\text{л}}, \quad F_{\text{л}} = - \int_0^V \text{grad } P_{\text{л}} dV_{\text{л}},$$

где $\text{grad } P_{\text{ус.л}} = \gamma v_x dv_x/dx$ – градиент давления в расплаве, обеспечивающий перемещение жидкости к фронту затвердевания вследствие изменения объема при фазовом перехо-

де; $V_{л}$ – объем ликвата; $\text{grad } P_{л} = \gamma v'_{л} dv'_{л}/dx$; $P_{л}$ – давление на ликват со стороны нисходящего потока жидкости; $v'_{л}$ – скорость движения ликвата относительно расплава в потоке ($v'_{л} = v_{л} - v_{л}$).

Ликваты всплывают в расплаве, причём скорость всплывания увеличивается по мере приближения к оси слитка в связи со снижением вязкости расплава (рис. 3, б). Профиль величин скорости движения ликватов относительного перемещающейся жидкости в нисходящем потоке ($v'_{л}$), имеет максимум по линии наибольшей скорости конвекции (рис. 3, в).

Силы давления со стороны расплава на ликваты ($F_{л}$) в сечении нисходящего потока в пристенной области направлены от линии наибольших скоростей к фронту твердо-жидкой зоны и однонаправлены с усадочными перемещениями расплава. За линией наибольших скоростей эти силы направлены к оси слитка. Градиент скорости по сечению и высоте потока способствует коалиценции ликватов. Частота их слияний резко возрастает с увеличением их размера и определяется зависимостью [2]:

$$M = \frac{4}{3} N \text{ grad } v (R_1 + R_2)^3,$$

где N – число частиц; $\text{grad } v$ – градиент скорости потока; R_1 и R_2 – радиусы частиц.

В ускоряющейся части нисходящего потока крупные объединения ликватов вытягиваются вдоль линий тока и одновременно переносятся к линиям наименьших скоростей этого потока (к фронту затвердевания и в обратный восходящий поток).

Формирование разноориентированной структуры. Как пишет Д.Д. Саратовкин: «Следует иметь ввиду, что образование центров кристаллизации во второй¹ двухфазной области начинается не тогда, когда кристаллизация в первой² зоне уже полностью закончена. В некоторый период времени происходит одновременно и медленный рост транскристаллов от стенок и образование этих новых центров в этой второй двухфазной области» [8].

Можно предположить, что формирование смешанной структуры (участки столбчатой структуры по высоте слитка сменяются участками разноориентированной) связано с переходным режимом от турбулентного к ламинарному потоку, нисходящему вдоль фронта затвердевания – в зонах турбулентных пульсаций обеспечивается более интенсивная диффузия примесей в объём жидкой фазы, чем в ламинарной области. Поэтому в некоторый период времени на соседних участках фронта затвердевания создаются преимущественные условия для образования той или иной формы дендритов.

Появление перед твердо-жидкой областью изолированных кристаллов и их рост изменяет характер усадочных перемещений расплава. Компенсация усадки происходит как в неподвижной, так и в подвижной зонах двухфазной области. Соответственно поток расплава в направлении поверхности охлаждения ослабевает, скорость перемещения жидкой фазы и силы, транспортирующие изолированные кристаллы к вертикальной поверхности твердой фазы, уменьшаются. По мере снижения температурного градиента в расплаве расширяется подвижная часть двухфазной области. Часть кристаллов, не достигая вертикального фронта затвердевания, оседает в придонный объём слитка.

Отвод теплоты кристаллизации от зарождающихся и растущих изолированных кристаллов к твердой фазе происходит теперь через пристенный слой расплава, повышая градиент температуры в нем. Развитие жидко-твердой зоны начинается с более охлажденных придонных объемов, постепенно распространяясь вверх. Движение изолированных кристаллов и ликватов у вертикального фронта затвердевания определяется векторной суммой скоростей вдоль оси слитка и нормально ей.

В поперечном сечении нисходящего вдоль вертикального фронта затвердевания потока в пристенной области (до линии максимальных скоростей потока) силы $F_{ус.к}$ и F_k имеют

¹ Жидко-твердой по принятой в настоящее время терминологии.

² Твердо-жидкой области по принятой в настоящее время терминологии.

противоположное направление и скорость переноса изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой области определяется их соотношением.

Фиксация изолированных кристаллов на дендритном каркасе твердой фазы происходит за счет разности давлений: со стороны неподвижного фронта двухфазной зоны имеет место разрежение в межосных пространствах, вызванное усадкой, а со стороны оси слитка – металлостатическое давление, что исключает их смещение вдоль фронта твердо-жидкой фазы. При их встрече с неподвижным дендритным каркасом разрушается ликвационный слой на поверхности осей в зоне касания, что способствует диффузионным процессам при их срастании. Закрепившиеся на границе твердо-жидкой зоны кристаллы продолжают укрупняться (теплоотвод идет через твердую фазу), причем рост осей предпочтителен вдоль изотерм. Это сглаживает границу раздела подвижной и неподвижной областей двухфазной зоны.

Скорость продвижения фронта твердо-жидкой зоны, наряду с теплоотводом, определяется частотой присоединения изолированных кристаллов, их размером и интенсивностью роста после присоединения.

По мере затвердевания слитка снижается теплоотвод от его поверхности. Это приводит к уменьшению скорости продвижения границы твердо-жидкой зоны, усадочных перемещений расплава и величин соответствующих сил $F_{ус.к}$ и $F_{ус.л}$. В то же время интенсивность движения двухфазного (суспензионного) потока определяется в основном содержанием в нем кристаллов и изменяется незначительно (рис.1.). Поскольку в расплаве имеет место градиент температуры по высоте слитка, то доля твердой фазы в нисходящем потоке возрастает сверху вниз. Соответственно скорости двухфазного потока и величины сил давления на изолированные кристаллы и ликваты по его сечению ($F_{дк}$ и $F_{л}$) будет возрастать сверху вниз, снижаясь в придонной области перед поворотом.

Формирование зоны разноориентированной структуры можно условно разделить на три периода.

1. Начальный период продолжается в интервале времени от прекращения роста столбчатых до начала осаждения изолированных кристаллов и характеризуется интенсивным теплоотводом от слитка и соответственно значительными усадочными перемещениями расплава ($F_{ус.к} > F_{к}$). Все кристаллы из жидко-твердой зоны переносятся к фронту затвердевания. Их перемещение вдоль границы твердо-жидкой области и влияние на скорость нисходящего конвективного потока незначительны. Малое время пребывания изолированных кристаллов в объеме расплава перед вертикальным фронтом затвердевания предотвращает выделение по их межосным пространствам ликватов.

Наличие области наиболее охлажденного расплава (вследствие градиента температуры по высоте) и низкая интенсивность конвекции в донной части слитка приводят к тому, что $\Delta T_{КДП}$ и, соответственно, изолированные кристаллы в объеме расплава над зоной столбчатых кристаллов горизонтального фронта затвердевания появляются раньше, чем перед вертикальным. Присоединение изолированных кристаллов, зарождающихся непосредственно перед донным (горизонтальным) фронтом кристаллизации, происходит под действием гравитации с минимальным пробегом. Контакт слитка с массивным поддоном обеспечивает усиленный теплоотвод. Эти факторы в данный период обеспечивают опережающее продвижение горизонтального фронта твердо-жидкой зоны по сравнению с вертикальным. Следствием этого является меньшая, чем на боковых гранях слитка, протяженность зоны столбчатых дендритов.

Большое число зародившихся кристаллов ограничивает возможности их роста вдоль изотерм, поэтому главные оси этих дендритов ориентированы в направлении градиента температуры. Отвод теплоты кристаллизации происходит как в поддон, так и с восходящим, обратным двухфазному, потоком расплава, создавая благоприятные условия для зарождения и роста изолированных кристаллов и одновременно для удаления выделяющихся из межосных пространств ликватов. Следствием последнего процесса, является обеднение придонных объемов углеродом, серой и фосфором. При этом понижение содержания ликвирующих эле-

ментов в объеме «конуса» особенно значительно на некотором удалении от границы столбчатой зоны, где происходит снижение интенсивности теплоотвода и увеличение продолжительности роста изолированных кристаллов. Поскольку зарождение последних происходит на активных примесях, то мелкокристаллическое строение придонной структуры характеризуется повышенным содержанием первичных неметаллических включений на единицу объема.

С течением времени жидко–твердая область распространяется в пристенном слое на всю высоту слитка.

В области теплового влияния прибыли поступающий сверху расплав с повышенной температурой обеспечивает максимальный по высоте тела слитка градиент температуры перед фронтом твердо-жидкой фазы. Ширина зоны термически переохлажденного расплава здесь мала. Незначительный объем зарождающихся изолированных кристаллов, несмотря на высокую скорость их переноса, приводит к низкой интенсивности продвижения границы твердо-жидкой области. Малая частота присоединения кристаллов не препятствует их росту на фронте раздела двухфазной зоны, вследствие чего формируется крупнокристаллическая разноориентированная структура.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли усадочные перемещения расплав переносит все зарождающиеся кристаллы к фронту твердо-жидкой зоны с минимальным пробегом вдоль него. В результате формируется мелкокристаллическая (глобулярная) структура. На всей длине этого участка протяженность зон «замороженных» и столбчатых кристаллов по высоте слитка и тепловое сопротивление их слоя различаются незначительно, а скорость нисходящего потока увеличивается до максимума на некотором удалении от донного фронта, снижаясь перед поворотом.

В связи с тем, что распространение жидко-твердой зоны происходит снизу вверх, толщина слоя присоединенных к вертикальной границе твердой фазы изолированных кристаллов увеличивается в том же направлении. Развивается обратная конусность бокового фронта затвердевания.

Таким образом, в рассмотренный период затвердевания продвижение фронта твердой фазы происходит последовательно, не смотря на зарождение кристаллов в объеме расплава, и, весьма вероятно, по параболическому закону (по данным Б.Б.Гуляева, формула $\xi = k\sqrt{\tau}$ даёт удовлетворительное совпадение с фактическими данными в пределах первых $\frac{3}{4}$ радиуса слитка массой до 8т [10]).

2. В этот период и в дальнейшем теплоотвод от слитка к изложнице определяется в основном тепловым сопротивлением затвердевшего слоя сплава. Интенсивность усадочных перемещений расплава и соответственно скорость продвижения границы твердо-жидкой области уменьшаются. Соотношение сил в сечении нисходящего конвективного потока изменяется – $F_{\text{в.к}}$ становится соизмеримо $F_{\text{к}}$, что тормозит перенос изолированных кристаллов к фронту твердой фазы.

При увеличении временного интервала нахождения в переохлажденном расплаве кристаллы укрупняются, выделяя теплоту кристаллизации. Их рост в объеме жидкой фазы энергетически предпочтителен зарождению новых. Эти факторы препятствует развитию широкой жидко-твердой области, а также приводит к огрублению структуры. Одновременно в связи с увеличением плотности суспензии по сравнению с расплавом в осевой части слитка, скорость течения образующегося двухфазного потока возрастает (рис.1, $\tau=150$ мин).

Преимущественный рост осей изолированных кристаллов в направлении теплоотвода нарушает симметрию последних и вызывает их вращение при погружении в расплаве. В результате, после присоединения к фронту твердой фазы, их главные оси, несмотря на наличие температурного градиента в радиальном направлении формирующегося слитка, не имеют четкой направленности («разноориентированы»).

Ниже зоны теплового влияния прибыли, в расширяющейся области переохлажденного расплава, идет активное зарождение изолированных кристаллов. По мере удаления от прибыльной части слитка скорость двухфазного потока возрастает, траектория перемещения

кристаллов к границе твердо-жидкой зоны становится всё более пологой, продолжительность пребывания и роста кристаллов в двухфазном потоке возрастает.

В нижней части этого участка значительная часть изолированных кристаллов не достигает вертикальной границы твердо-жидкой области и оседает в придонные объемы. Значительная продолжительность пребывания этих кристаллов в объеме жидкой фазы способствует отделению от них ликватов.

Рост частиц твердой фазы, погружающихся в потоке расплава, сопровождается выделением теплоты кристаллизации и уменьшением переохлаждения расплава перед вертикальным фронтом затвердевания. В результате тормозится зарождение новых и рост присоединившихся к затвердевшей корке кристаллов, а на участке наибольших скоростей нисходящего потока продвижение фронта твердо-жидкой зоны замедляется. Толщина затвердевшего от стенки изложницы слоя по высоте слитка (ниже зоны теплового влияния прибыли) сначала выравнивается, а затем граница раздела фаз верхним краем постепенно наклоняется к оси слитка и в продольном сечении при малой обратной конусности изложницы (~2–6%) принимает форму, близкую к усеченному конусу (Λ-образную). Наличие прямой конусности границы твердой фазы при затвердевании слитков четко зафиксировано путем выливания жидкой фазы [11] и при исследовании с помощью радиоактивных изотопов [12].

В ускоряющемся двухфазном потоке, из выделяющихся по межосным пространствам кристаллов ликватов, формируются крупные образования, которые сносятся по его течению и вытягиваются в струи («жидкие шнуры») вдоль границы твердо-жидкой области, фиксируясь на ней усадочными перемещениями расплава. Присоединяющиеся к дендритному каркасу поверх этих образований ликваты увеличивают их объем, а кристаллы погружаются в них и, срастаясь с соседними, замыкают «жидкие шнуры» со стороны оси слитка. Эти образования в момент своего присоединения приблизительно очерчивают фронт твердо-жидкой области и после полного затвердевания слитка проявляются как шнуры внеосевой неоднородности. Периодичность расположения шнуров в поперечном сечении слитка зависит от радиуса зоны коагуляции ликватов и их общего объема. Протяженность этих образований увеличивается с возрастанием содержания ликватов в расплаве и уменьшением интенсивности присоединения изолированных кристаллов к границе твердо-жидкой зоны. По мере продвижения вертикального и донного фронтов твердо-жидкой зоны, область протяженных ликвационных образований смещается к оси и верхним горизонтам слитка. В слитках малой высоты и массы, где скорости двухфазного потока не достигают больших величин, эти процессы или не имеют развития, или развиваются только в нижних и прибыльных объемах, а в крупных слитках «усы» возникают по всей высоте.

Подтверждением начала формирования внеосевой неоднородности в подвижной части двухфазной зоны служат результаты экспериментов по МГД – воздействию на затвердевание в результате которых путём изменения характера естественной конвекции были достигнуты как поворот шнуров в вертикальной и горизонтальной плоскостях, так и их полное подавление [13].

«Сброс» ликватов в шнуры приводит к обеднению примесями соседних объемов затвердевшего металла в теле слитка. Последнему также способствует вынос части ликватов в восходящий осевой конвективный поток. Снижение содержания примесей в основном металле области проявления внеосевой неоднородности зафиксировано в ряде исследований.

В донной части происходит торможение и поворот двухфазного потока, что приводит к осаждению содержащейся в нем твердой фазы и возрастанию скорости вертикального затвердевания слитка.

На стыке вертикального и горизонтального фронтов кристаллизации имеет место наиболее сильный теплоотвод. В тоже время сюда с конвективным потоком поступает расплав с повышенной температурой. Совокупность этих факторов создают условия для роста первых присоединившихся к фронту столбчатой структуры изолированных кристаллов и

препятствуют зарождению новых. По внешнему периметру мелкокристаллической зона формируется крупнокристаллическая, наличие которой отмечается в работе[5].

С началом осаждения изолированных кристаллов вдоль вертикального фронта происходит образование «вала» по внешнему контуру горизонтального фронта твердо-жидкой фазы. Внутри образовавшегося «кратера осаждения»[14] продолжается процесс зарождения и присоединения к фронту твердо-жидкой фазы изолированных кристаллов. В формировании «внутренней зоны» принимают участие также наиболее мелкие кристаллы из нисходящего двухфазного потока, выносимые с расплавом в осевую часть придонного объема.

На участке торможения двухфазного потока, скорость продвижения вертикальной границы твердо-жидкой зоны за счет присоединения оседающих кристаллов больше, чем в вышележащей области. Постепенно образующийся выступ отклоняет двухфазный поток к оси слитка. Зона осаждения изолированных кристаллов также смещается в этом направлении, перекрывая продвигающийся горизонтальный фронт твердо-жидкой фазы. В результате внутри структуры, образованной кристаллами, зародившимися перед вертикальным фронтом твердо-жидкой фазы и укрупнившимися по ходу осаждения, остается «внутренняя зона» более мелких кристаллов, зародившихся перед горизонтальным фронтом. Этот объем обеднен ликвирующими примесями и обогащен первичными неметаллическими включениями. В то же время осаждающиеся изолированные кристаллы, вследствие достаточно длительного пребывания в объеме расплава также обедняются элементами с малым коэффициентом распределения, что особенно характерно для крупных слитков. Поэтому зона отрицательной ликвации может по объёму значительно превышать «конус» мелких кристаллов. В крупных слитках «внутренняя зона» отрицательной ликвации может существенно отличаться по химическому составу от «внешней». Это четко выявлено при исследовании слитков 51 т и 52 т [15].

Далее граница жидко-твёрдой фазы в нижней части затвердевающего слитка приобретает в сечении форму, напоминающую параболу, обращенную вершиной вниз (или обратный конус в мелких слитках), и продвигается вверх в основном за счет присоединения оседающих изолированных кристаллов.

Часть выделившихся в жидко–твёрдой зоне ликватов выносятся в восходящий поток и, растворяясь в расплаве, обогащает его ликвирующими элементами с малым коэффициентом распределения. Вследствие конвекции этот процесс распространяется на весь незатвердевший объём слитка. Таким образом, концентрационный градиент между маточным расплавом и межосными пространствами вновь зарождающихся изолированных кристаллов уменьшается, что приводит к росту концентрации примесей в этих пространствах. Присоединение к вертикальному фронту затвердевания этих кристаллов приводит к развитию положительной ликвации в радиальном направлении формирующегося слитка, а осаждение – к постепенному переходу от отрицательной сегрегации к положительной по высоте.

3. Этот период характеризуется минимальными перегревом жидкой фазы, теплоотводом от слитка к изложнице и шириной зоны переохлаждения. Скорость продвижения границы твердо-жидкой области и соответственно интенсивность усадочных перемещений расплава низки. Сохраняются условия для медленного роста зафиксированных на фронте твердо-жидкой области кристаллов. Сплав еще больше обогащается примесями. Сечение и глубина жидкоподвижной области уменьшаются, её границы со стороны вертикального фронта примерно соответствуют положению ближайших к оси слитка шнуров внеосевой неоднородности, выявляемых на серных отпечатках с продольных темплетов. Скорость двухфазного потока снижается в результате уменьшения градиента температуры в расплаве и увеличения его вязкости. Величины сил $F_{\text{ус.к}}$ и $F_{\text{к}}$ соизмеримы, и их соотношение изменяется по высоте затвердевающей области. Вследствие общей усадки сплава уровень расплава в прибыли снижается, тепловой центр слитка смещается в подприбыльную часть. При крайне низких скоростях зарождения и роста изолированных кристаллов сокращается объем выделяющихся в расплав ликватов. Это, наряду с повышением вязкости жидкости и снижением ско-

рости двухфазного потока, приводит к прекращению образование шнуров внеосевой неоднородности и одновременно развитию положительной ликвации.

На участке ниже зоны теплового влияния прибыли при малых скоростях двухфазного потока продолжается опережающее продвижение фронта твердо-жидкой области с образованием выступа. Двухфазный и обратный потоки разделяются на две замкнутые циркуляции – одна в прибыли и зоне её теплового влияния, другая в узком канале осевой зоны тела слитка. В застойной зоне между ними ($F_k \rightarrow 0$) происходит быстрое смыкание вертикального фронта – формируется «первичный» мост.

Толщина его увеличивается за счет осаждения кристаллов из объема головной части слитка. Одновременно в связи с незначительной скоростью опускания мениска металла в прибыли, под твердой коркой на поверхности расплава зарождаются изолированные кристаллы, которые, погружаясь по всему его сечению жидкой фазы, нарушают установившееся движение двухфазного потока. Размеры оседающих на мост кристаллов мельче, чем на периферии подприбыльной области, так как погружение их происходит через расплав с повышенной температурой (через тепловой центр), что затрудняет их рост. Выделяющиеся в объем расплава ликваты не распределяются по границе твердо-жидкой области, а всплывают. В результате порции сплава, затвердевающие последними, сильно обогащаются ликвирующими элементами.

Под мостом в замкнутом протяженном объеме продолжается затвердевание расплава и опускание его поверхности вследствие усадки. На мениске расплава и вблизи его (скорости жидкости в вертикальном направлении равны нулю и минимальны) создаются наиболее благоприятные условия для присоединения изолированных кристаллов к фронту твердо-жидкой фазы ($F_k = 0$). Начинается формирование «вторичного» моста. При этом одновременное опускание уровня расплава и продвижение твердо-жидкой области образуют конусообразную поверхность затвердевания – начинает формироваться усадочная раковина. «Вторичный» мост смыкается. Мениск расплава под ним опускается и процесс повторяется. Разрежение в усадочных пустотах вызывает приток в них обогащенного примесями расплава из прилежащих объемов твердо-жидкой области. Раковины частично заполняются ликватом, а вокруг них образуется рассредоточенная пористость. Эти процессы фиксируются в макроструктуре слитка как V-образный «рисунок». Образование «вторичных» мостов может неоднократно повторяться до полного затвердевания замкнутого объема расплава. Однако если мениск металла в незатвердевшей области опускается быстрее, чем происходит смыкание вертикального фронта, под «первичным мостом» образуется протяженная усадочная раковина (вторичная). Этот случай характерен для удлиненных слитков и непрерывнолитых заготовок. Толщина «вторичных» мостов в сравнении с «первичным» незначительна, поскольку в их образовании не участвуют оседающие кристаллы.

V-образная неоднородность располагается между «первичным мостом» и структурой, сформировавшейся за счет осаждения кристаллов и может быть предотвращена путем устранения прямой конусности фронта кристаллизации в теле слитка за счёт повышения конусности изложницы или экранирования последней в области ниже зоны теплового влияния прибыли [13].

Выводы

Предложенная описательная модель позволяет связать образование структурных и макроликвационных дефектов с интенсивность конвективного движения расплава при формировании слитка спокойной стали.

Библиографический список

1. **Ефимов, В.А.** Разливка и кристаллизация стали / В.А. Ефимов. – М.: Металлургия, 1976. – 552 с.
2. **Левич, В.Г.** Физико-химическая гидродинамика / В.Г. Левич. – М.: Физматгиз, 1959. – 669 с.
3. **Ефимов, В.А.** Влияние некоторых особенностей затвердевания на развитие химической и фи-

- зической неоднородности сплавов // Проблемы стального слитка: труды VI конференции по слитку. – М.: Metallurgia, 1976. С. 12–27.
4. **Сергеев, А.Б.** Вакуумный дуговой переплав конструкционной стали / А.Б. Сергеев, Ф.И. Швед, Н.А. Тулин. – М.: Metallurgia, 1974. – 192 с.
 5. **Пронов, А.П.** Кристаллизация стального слитка / А.П. Пронов. – М.: Изд-во АН СССР, 1960. – 150 с.
 6. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность стали / Б.Б. Гуляев. – М.: Metallurgizdat, 1950. – 228 с.
 7. **Оно, А.** Затвердевание металлов / А. Оно. – М.: Metallurgia, 1980. – 152 с.
 8. **Саратовкин, Д.Д.** Дендритная кристаллизация / Д.Д. Саратовкин. – М.: Metallurgizdat, 1957. – 126 с.
 9. **Колосов, М.И.** Качество слитка спокойной стали / М.И. Колосов [и др.]. – М.: Metallurgia, 1973. – 408 с.
 10. **Гуляев, Б.Б.** Затвердевание и неоднородность слитка спокойной стали / Б.Б. Гуляев // Стальной слиток: сб. трудов первой научно-технической сессии по стальному слитку. – М.: Metallurgizdat, 1952. С. 21–39.
 11. **Горелкина, А.Е.** Определение периода кристаллизации рельсовых слитков массой 7–8 т / А.Е. Горелкина // Физико-химические и теплофизические процессы кристаллизации стальных слитков: труды II конференции по слитку. – М.: Metallurgia, 1967. С. 82–93.
 12. **Скребцов, А.М.** Изучение закономерностей кристаллизации уширенного книзу слитка спокойной стали методом радиоиндикаторов / А.М. Скребцов, Н.П. Васильковская // Теплофизика стального слитка: сб. трудов. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1980. С. 122–124.
 13. **Сенопальников, В.М.** Управление процессами затвердевания слитка спокойной стали / В.М.Сенопальников, Г.А. Лубенец, В.Л. Сивков; Нижегород. гос.техн. ун-т. 2009. – 128 с.
 14. **Попов, А.А.** Фазовые превращения в металлических сплавах / А.А. Попов. – М.: ГНГИ литературы по черной и цветной металлургии, 1963. – 311 с.
 15. **Скобло, С.Я.** Получение крупных слитков повышенной однородности / С.Я. Скобло [и др.] // Разливка стали и формирование слитка: труды I конференции по слитку. – М.: Metallurgia, 1966. С. 112–129.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

V.M. Senopalnikov, V.L. Sivkov

CONVECTION RELATION WITH INHOMOGENEITY DEVELOPMENT IN KILLED STEEL INGOT

A mechanism connecting structural and liquation defects development in ingot of killed steel with convective movement of solidifying melt. Based on publications and personal research.

Key words: steel ingot, convection, structural inhomogeneity, liquation, velocity gradient, isolated crystals.

ХИМИЯ, ХИМИЧЕСКИЕ И БИОТЕХНОЛОГИИ

УДК 621.357

А.В. Исаев¹, М.Г. Михаленко², В.В. Исаев²

КИНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КАТОДНОГО ОСАЖДЕНИЯ НИКЕЛЯ ИЗ СУЛЬФАМАТНОГО ЭЛЕКТРОЛИТА НИКЕЛИРОВАНИЯ

Научно-исследовательский институт измерительных систем (НИИС) им. Е. Ю. Седакова¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р. Е. Алексеева²

Изучены кинетические особенности и механизм катодного осаждения никеля из сульфатного электролита никелирования. Показано, что при малой катодной поляризации ионы Ni^{+2} восстанавливаются на катодной поверхности с образованием Ni^{+1} , затрудненный отвод которых от поверхности катода приводит к их накоплению в прикатодном пространстве и далее к образованию коллоидной фазы $NiOH$. Образующаяся фаза обуславливает пассивацию катода, затрудняя восстановление ионов никеля. С началом выделения водорода на катоде происходит восстановление пассивирующих продуктов, что приводит к ускорению восстановления ионов никеля. С дальнейшим ростом катодной поляризации (более -1,2 В) возможно образование основных ионов никеля, ответственных за появление химической поляризации.

Ключевые слова: сульфатный электролит, коллоидная фаза, катодная поляризация, осаждение никеля, ионы никеля.

Сульфатные электролиты находят широкое применение в гальванопластике вследствие того, что в данном электролите можно проводить никелирование при высоких плотностях тока, получаемые гальванические осадки имеют небольшие внутренние напряжения, мелкозернистую структуру, и более светлые, чем осадки, полученные из других электролитов /1/. Стабильность работы гальванической ванны никелирования во многом определяется особенностями катодного осаждения никеля. Однако оно требует дальнейшего изучения.

Определение закономерностей катодного осаждения никеля проводилось на никелевых образцах в рабочем электролите основного состава (г/л): сульфат никеля – 400; борная кислота – 30; хлорид никеля – 15. Очистка электролита для удаления вредных примесей проводилась согласно [2]. Никелевые образцы марки Н-0 перед исследованиями предварительно обезжиривались оксидом магния и активировались в концентрированной соляной кислоте в течение минуты. Потенциалы электродов пересчитывались и даны по шкале нормального водородного электрода. Внутренние напряжения в никелевом осадке определялись методом гибкого катода [3].

Компромиссный потенциал никелевого электрода в сульфатных электролитах никелирования во многом определялся окислительно-восстановительным потенциалом кислотного электрода. Согласно /4/, стандартный потенциал никелевого электрода равен -0,25 В. Неустойчивость потенциала никелевого электрода вызвана чрезвычайно изкими токами обмена для никеля. В зависимости от условий они могут принимать значения от 10^{-11} до 10^{-8} А/см². С другой стороны, столь высокое отличие в величине токов обмена объясняется высокой поверхностной активностью никеля, его способностью сорбировать атомы кислорода, образовывать мономолекулярные слои как кислорода, так и молекул оксидов.

При смещении потенциала никелевого электрода в катодную сторону ток восстановления ионов никеля несколько возрастал, затем в области потенциалов от -0,15 до -0,30 В

достигал предельного значения и дальнейший рост тока наблюдался при потенциалах отрицательнее $-0,3$ В (рис. 1, крив. 1). Таким образом, на катодной поляризационной кривой наблюдалось два участка: первый — при малых катодных поляризациях (область предельного тока) и второй — при значительных поляризациях, где наблюдался рост катодного тока.

Появление небольшого по величине предельного тока может быть обусловлено не только электровосстановлением ионов никеля, но также токами восстановления растворенного в электролите кислорода и токами заряжения двойного электрического слоя. Для оценки этих токов получали фоновую катодную поляризационную кривую в электролите, не содержащем ионы никеля, состава (г/л): Na_2SO_4 - 71; H_3BO_3 - 30 (рис. 1, крив. 3). Сравнивая фоновые токи с катодными токами восстановления ионов никеля, можно показать, что суммарные токи восстановления кислорода и заряжения ДЭС в 15–20 раз меньше токов восстановления ионов никеля. Поэтому в дальнейшем токами восстановления кислорода и заряжения ДЭС пренебрегали. На величину предельного тока оказывало влияние перемешивание и повышение температуры электролита. При перемешивании электролита предельные токи возрастали (рис.1, крив. 2) Если при температуре 40°C предельный ток имел величину $0,10$ mA/cm^2 , то при 60°C - $0,17$ mA/cm^2 .

В электролите основного состава при задании токов выше предельного значения наблюдались периодические колебания потенциала катода во время электролиза (рис. 2). Такой процесс носит название «осцилляционного». Колебания потенциала можно было бы объяснить выделением газообразного водорода, который на некоторое время экранировал поверхность электрода, увеличивая тем самым его потенциал. Однако при выделении водорода в фоновом электролите такая пульсация потенциала отсутствовала. Следовательно, подобные пульсации не связаны с выделением водорода.

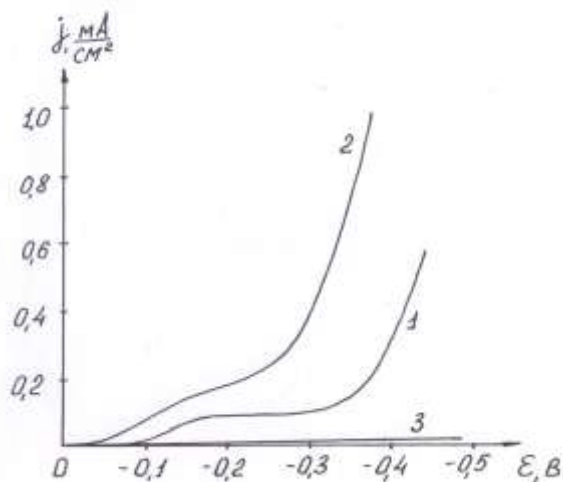


Рис. 1. Хроновольтамперометрические кривые восстановления ионов никеля в сульфатном электролите никелирования основного состава при t 40°C , $V_{\text{разв}}=40$ мВ/с:

1 – без перемешивания; 2 - с перемешиванием;
3 – фоновый раствор, (г/л): Na_2SO_4 – 71г; H_3BO_3 – 3

Колебание потенциала можно также объяснить периодическим образованием и растворением пассивирующих катод продуктов, чередованием у поверхности катода окислительно-восстановительных реакций, которые приводят к появлению автоколебаний. Как и всякий колебательный, «осцилляционный» процесс характеризуется частотой, амплитудой и периодом колебания электродного потенциала. В момент включения тока амплитуда колебаний потенциала принимала довольно высокие значения (около 100 мВ), затем постепенно снижалась и оставалась неизменной при электролизе. Так, спустя 10 с с момента включения тока, амплитуда снижалась до 10–12 мВ в зависимости от задаваемой плотности тока. Частота

та пульсаций не изменялась с увеличением плотности тока и составляла 28–30 пульсаций в минуту.

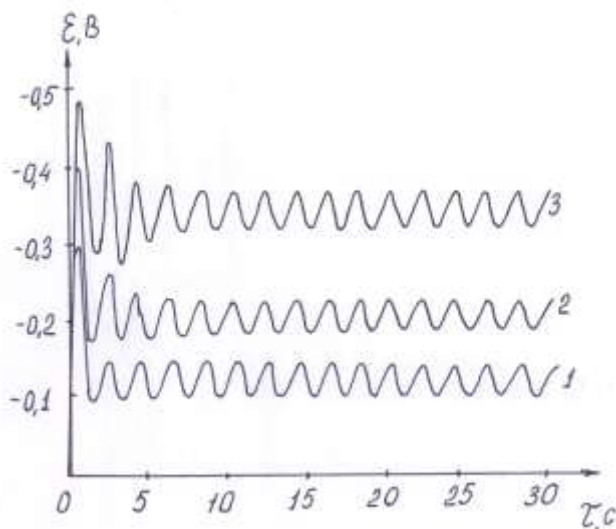


Рис. 2. Хронопотенциометрические кривые в сульфатном электролите никелирования основного состава при $t = 40^\circ\text{C}$; плотности тока, ($\text{мА}/\text{см}^2$):
1 – 0,1; 2 – 0,14; 3 – 0,4

При смещении потенциала никелевого катода отрицательнее $-0,4$ В пульсации потенциала наблюдались только в начальный промежуток времени, а затем они прекращались. С добавлением в электролит сульфаминовой кислоты (10 г/л) происходило снижение рН электролита с $3,2$ до $2,7$ и пульсации потенциала наблюдались только в начальный период времени, а затем они также прекращались.

Катодное осаждение никеля из сульфатного электролита подробно исследовалось импедансным методом.

Переменный ток, проходящий через электрохимическую систему, расходуется на следующие электрохимические процессы:

- 1) зарядка двойного электрического слоя;
- 2) окислительно – восстановительную реакцию: $\text{Ni} = \text{Ni}^{+2} + 2\text{e}$;
- 3) окислительно – восстановительную реакцию: $2\text{H}^{+1} + 2\text{e} = \text{H}_2$.

Поэтому при моделировании границы электрод – раствор в эквивалентной электрической схеме должно быть три параллельные ветви, так как $j_{\text{общ}} = j_{\text{ДЭС}} + j_{\text{Ni}^{+2}/\text{Ni}} + j_{\text{H}^{+1}/\text{H}_2}$.

Кроме этого, между исследуемым и вспомогательным электродами всегда имеется сопротивление электролита. Определив сопротивление электролита и емкость двойного электрического слоя по [5, 6], и исключив эти величины из общего импеданса исследуемого электрода, были вычислены активные и реактивные сопротивления, характеризующие электрохимическое осаждение никеля и выделение водорода. Эти зависимости близки к линейным, что указывает на наличие у электрохимического процесса диффузионных затруднений. Они не экстраполируются в начало координат. Это обусловлено тем, что в электрической эквивалентной схеме границы электрод – раствор имеются элементы $R_{\text{пер}}$ – сопротивление на стадии переноса электрона и $C_{\text{адс}}$ – емкость адсорбции заряженных частиц на поверхности электрода.

Подробная обработка импедансных измерений с нахождением эквивалентной электрической схемы границы электрод – раствор проводилась по программе, разработанной А.А. Москвичевым и В. В. Бенсоном [7]. Эта схема представлена на рис. 4. Значения импеданса Варбурга (W), оцениваемые тангенсом угла наклона зависимостей ($1/\omega C_{\text{ф}}$), $R_{\text{ф}} - 1/\sqrt{\omega}$

для никелевого катода, показывают, что он обусловлен затрудненным отводом ионов Ni^{+1} от поверхности катода. Импеданс Варбурга зависит также от температуры электролита и потенциала катода. С ростом температуры электролита (табл. 1) и смещением потенциала катода в более отрицательную сторону значения импеданса Варбурга снижались, что говорило об исчезновении диффузионных затруднений (рис. 5).

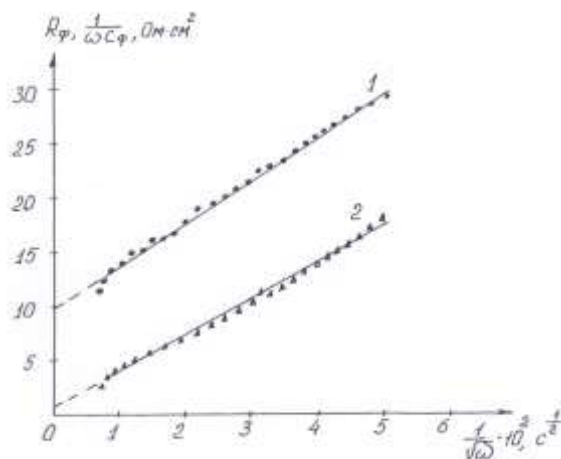


Рис. 3. Зависимости активной (R_ϕ) (2) и реактивной ($1/\omega C_\phi$) (1) составляющих фарадеевского импеданса никелевого электрода от $1/\sqrt{\omega}$ в сульфатном электролите никелирования основного состава при $t = 40^\circ\text{C}$, при потенциале $-0,4\text{ В}$

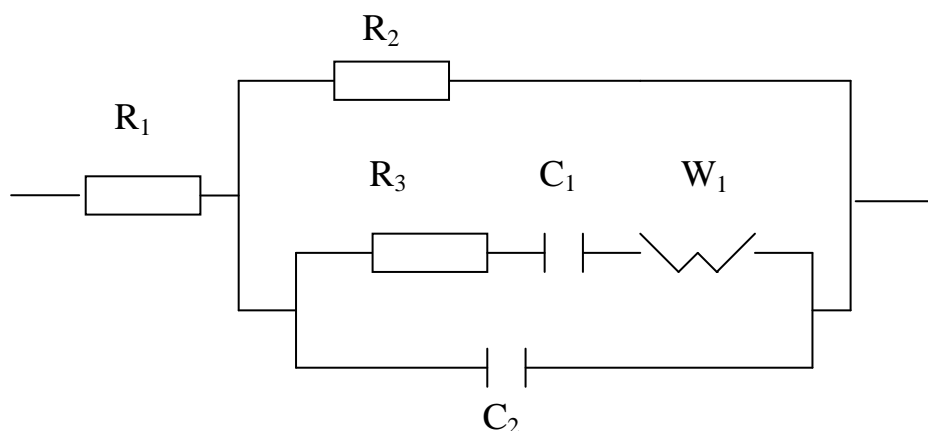


Рис. 4. Эквивалентная электрическая схема границы электрод-раствор.
 R_1 – сопротивление электролита; R_2 – сопротивление разряда ионов водорода;
 R_3 – сопротивление разряда ионов никеля; C_1 – емкость, характеризующая адсорбцию ионов никеля на поверхности электрода; C_2 – емкость ДЭС;
 W_1 – импеданс Варбурга для ионов никеля

Таблица 1
 Зависимость импеданса Варбурга от температуры электролита при потенциале $-0,4\text{ В}$

Температура электролита, $t^\circ\text{C}$	Значение импеданса Варбурга $W, \text{Ом}\cdot\text{см}^2\cdot\text{с}^{1/2}$
20	620
30	390
40	310

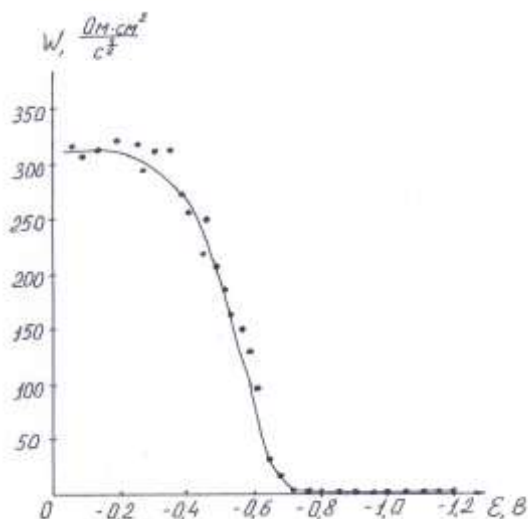
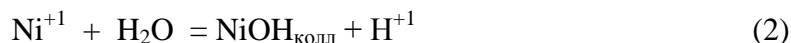


Рис. 5. Зависимость импеданса Варбурга (W) от потенциала никелевого катода в сульфатном электролите никелирования основного состава при $t=40^{\circ}\text{C}$

Проведенные исследования позволили высказать следующий механизм катодного восстановления ионов никеля. При малой поляризации катода ионы Ni^{2+} восстанавливаются на катодной поверхности с образованием ионов Ni^{+} по реакции:



Отвод образующихся ионов Ni^{+} от катодной поверхности затруднен. Это обусловлено тем, что они имеют положительный заряд и за счет электростатических сил удерживаются у отрицательно заряженной катодной поверхности (потенциал нулевого заряда никелевого электрода 0,0 В). Затрудненный отвод ионов Ni^{+} от катодной поверхности приводит к их накоплению в прикатодном пространстве. Эти ионы, подвергаясь гидролизу по реакции:



образуют в прикатодном слое электролита коллоидную фазу $\text{NiOH}_{\text{колл}}$, которая, осаждаясь на катоде, пассивирует его. Появившиеся коллоидные частицы могут включаться в гальванический никелевый осадок, делая его более неоднородным, что приводит к росту внутренних напряжений в нем (рис. 6). Особенно высоки внутренние напряжения при низких плотностях тока (до 2 А/дм^2). При подкислении электролита, например, с помощью сульфаминовой кислоты, происходит возрастание активности ионов водорода и рост катодного тока. При снижении pH электролита затруднено образование коллоидной фазы $\text{NiOH}_{\text{колл}}$, меньше пассивируется катодная поверхность, и это приводит к росту катодного тока.

Перемешивание электролита уменьшает толщину диффузионного слоя, способствует лучшему отводу продуктов восстановления от катодной поверхности и, следовательно, к возрастанию катодного тока (рис. 1, крив. 2).

Образующаяся на катоде коллоидная фаза ($\text{NiOH}_{\text{колл}}$) с одной стороны пассивирует катодную поверхность, что приводит к росту катодной поляризации, а её растворение депассивирует катод. Этими процессами и обусловлена пульсация потенциала катода (рис.2).

При никелировании вторым, побочным процессом является выделение водорода. Равновесный потенциал водородного электрода, рассчитанный по уравнению Нернста, при давлении 1 атмосфера и температуре 40°C с pH электролита 3,0–3,5 находится в интервале 0,19 - -0,22 В. Отрицательнее этих потенциалов на катоде возможно выделение водорода. Выделяющийся атомарный водород, являясь сильным восстановителем, может восстанавливать коллоидную фазу $\text{NiOH}_{\text{колл}}$ по реакции:



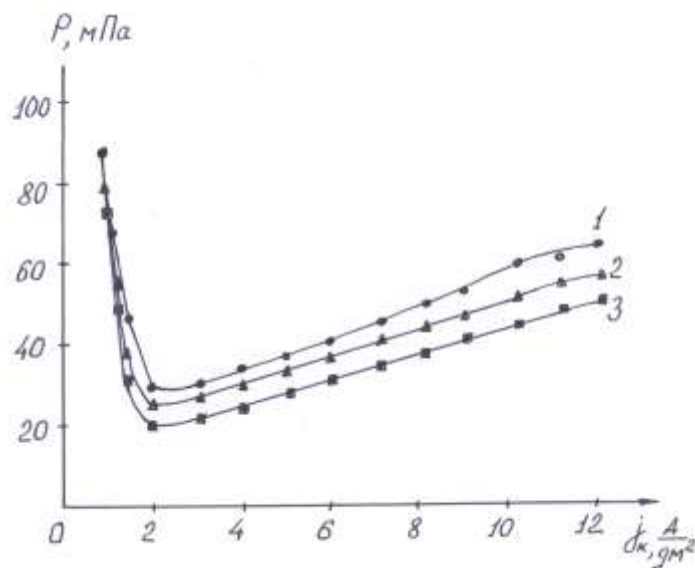


Рис. 6. Изменение внутренних напряжений с ростом катодной плотности тока; $t = 40^\circ\text{C}$. Толщина никелевого осадка, мкм: 1 — 10; 2 — 20; 3 — 100

При этом поверхность катода освобождается от пассивирующих продуктов. Перемешивание электролита за счет выделяющегося водорода приводит к снижению диффузионных затруднений. И как следствие этого, исчезают пульсации потенциала катода и снижаются значения импеданса Варбурга (рис. 5). Наблюдается значительный рост катодного тока. Меняется контролирующая стадия восстановления ионов никеля. Электрохимический процесс начинает контролироваться стадией переноса электрона. Внутренние напряжения в никелевом покрытии становятся минимальными (рис. 6).

Катодный процесс включает в себя две параллельно протекающие электрохимические реакции: основную — электроосаждение никеля и побочную — выделение водорода. Поэтому для изучения кинетических закономерностей катодного осаждения никеля необходимо определить токи, идущие на эти реакции. Для этого определяли выход по току никеля и водорода при различных потенциалах катода. В области потенциалов положительнее $-0,6 \text{ В}$ выход по току никеля не изменялся и составлял 98%.

На выход по току никеля оказывали влияние кислотность и температура электролита никелирования. С повышением кислотности электролита никелирования выход по току никеля заметно снижался. Если при потенциале $-0,6 \text{ В}$ и $\text{pH } 3,7$ выход по току никеля составлял 98%, то при $\text{pH } 2,5$ он снизился до 90%. Увеличение кислотности электролита приводило к значительному росту тока выделения водорода.

Повышение температуры электролита также приводило к некоторому снижению выхода по току никеля. Однако это снижение не столь значительно. При повышении температуры на 20°C (с 40°C до 60°C) при потенциале $-1,0 \text{ В}$ выход по току никеля снижался на 2–4%. Это обусловлено тем, что скорость выделения водорода возрастала несколько быстрее с ростом температуры, чем скорость осаждения никеля. С повышением температуры электролита происходило изменение и структуры никелевых осадков. При пониженных температурах электролита осадки матово-темные, слоистые и хрупкие. При увеличении температуры никелевые осадки становились более светлыми и пластичными. После определения выхода по току никеля были рассчитаны парциальные токи осаждения никеля. Построив парциальные кривые выделения водорода и электроосаждения никеля, можно определить эффективную энергию активации осаждения никеля. Эта энергия снижалась с ростом катодной поляризации. Если при потенциале $-0,4 \text{ В}$ энергия активации была $80 \text{ кДж}/\text{моль}$, то

при потенциале $-0,8$ В она снизилась до 20 кДж/моль, что подтверждало наличие у данного процесса перенапряжения переноса электрона через границу металл – раствор.

Сложность выявления кинетических закономерностей электроосаждения никеля обусловлена непрерывным изменением состояния реакционной поверхности катода. На этой же поверхности происходит второй процесс - выделение водорода.

Реакция разряда ионов никеля имеет гетерогенный характер и сопровождается образованием новой фазы, которая начинает выполнять функцию катода. Наиболее медленной стадией в данной области потенциалов является разряд ионов никеля. Кинетические исследования показали, что разряд ионов никеля, как поливалентного катиона, происходит ступенчато. Перестроив парциальные поляризационные кривые в характеристические зависимости $\varepsilon - \lg j$ (тафельские зависимости) были определены коэффициенты «b» в уравнении Тафеля в интервале потенциалов от $-0,4$ до $-0,8$ В. Коэффициент «b» в уравнении Тафеля находится в интервале от $-0,12$ до $-0,14$ В.

Расчетные и экспериментальные значения коэффициента «b» наиболее близки, когда лимитирующей стадией является присоединение первого электрона. Таким образом, в области потенциалов от $-0,4$ до $-0,8$ В (н.в.э) лимитирующей стадией восстановления ионов никеля является присоединение первого электрона.

При потенциалах отрицательнее $-0,8$ В, где выход по току для восстановления ионов никеля заметно снижается, происходит смена лимитирующей стадии катодного осаждения никеля. В прикатодном слое происходит повышение pH электролита, а это способствует образованию основных ионов и солей никеля по реакции:



Катодное осаждение никеля начинает проходить через стадию образования NiOH^{+} или $\text{Ni}(\text{OH})_2$, которые в дальнейшем восстанавливаются до никеля. О смене лимитирующей стадии процесса говорит и тот факт, что экспериментальные данные импедансных измерений, полученные при потенциале $-0,8$ В, существенно отличаются от полученных при менее отрицательных потенциалах, а характеристические зависимости активной R_ϕ и реактивной $1/\omega C_\phi$ составляющих фарадеевского импеданса от $1/\sqrt{\omega}$ подтверждают появление химической реакции (рис. 7).

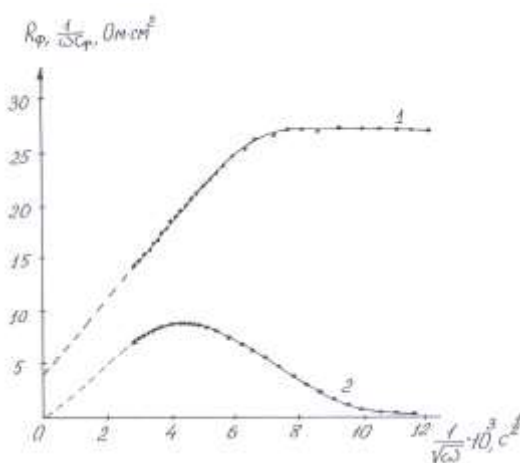


Рис. 7. Зависимость активной (R_ϕ) (1) и реактивной ($1/\omega C_\phi$) (2)

составляющих фарадеевского импеданса от $\frac{1}{\sqrt{\omega}}$ при $\varepsilon = -1,2$ В; $t = 40^\circ\text{C}$

Активная составляющая фарадеевского импеданса R_ϕ отсекает на оси абсцисс небольшой отрезок, характеризующий сопротивление переноса электрона и наличие электро-

химического перенапряжения. При низких частотах переменного тока активное сопротивление принимает постоянное значение, не зависящее от частоты переменного тока, что характерно для электрохимического процесса с перенапряжением химической реакции /8/. Реактивная составляющая ($1/\omega C_{\phi}$) с уменьшением частоты переменного тока сначала возрастает, проходит через максимум и затем снижается, что также подтверждает наличие перенапряжения химической реакции.

Появление основных ионов как у катодной поверхности, так и на самом катоде приводит к возможности их включения в никелевый катодный осадок, что вызывает рост внутренних напряжений в нем при повышенных плотностях тока (рис. 6).

Проведенные исследования позволили выбрать оптимальные плотности тока катодного осаждения никелевого покрытия с низкими внутренними напряжениями. Эти плотности тока находятся в пределах от 2 до 4 А/дм². При плотностях тока ниже 2 А/дм² в никелевый осадок может включаться гидроксид одновалентного никеля (NiOH), повышая внутренние напряжения в осадке. Если плотность тока превышает 4 А/дм², за счет обильного выделения водорода в прикатодном пространстве происходит заметное снижение концентрации ионов водорода, что приводит к образованию основных солей и гидроксидов двухвалентного никеля. Внутренние напряжения в никелевом покрытии снова начинают возрастать.

Библиографический список

1. Садаков, Г.А. Гальванопластика / Г. А. Садаков – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.
2. Левинзон, А. М. Электролитическое осаждение металлов подгруппы железа / А. М. Левинзон – Л.: Машиностроение, 1983. – 96 с.
3. Ваграмян, А. Т. Методы исследования электроосаждения металлов / А. Т. Ваграмян, З. А. Соловьева. – М.: Металлургия 1960. – 446 с.
4. Справочник химика. Т. 3. – М.– Л.: Госхимиздат, 1963. – 942 с.
5. Дамаскин, Б. Б. Принципы современных методов изучения электрохимических реакций / Б. Б. Дамаскин. – М.: МГУ, 1965. – 213 с.
6. R. de Levie. On impedance measurements the determination of the double capacitance in the presence of an electrode reaction // J. Electrochemical Acta. 1965. V. 10. P. 395–402.
7. Москвичев, А.Н. Химия и химическая технология / А. Н. Москвичев, В. В. Бенсон, В. Н. Москвичев // Известия вузов. 1994. Т. 37. Вып. 3. С. 119–125.
8. Феттер, К. Электрохимическая кинетика / К. Феттер. – М.: Химия, 1967. – 855 с.

*Дата поступления
в редакцию 04.10.2011*

A.V. Isaev, M.G. Mihalenko, V.V. Isaev

KINETIC FEATURES OF CATHODIC SEDIMENTATION OF NICKEL FROM SULFAMATE NICKELIRATION ELECTROLITS

Kinetic features and the mechanism of cathodic sedimentation of nickel from sulfamate nickeliration electrolits are studied. It is shown that at small cathodic polarization ions Ni⁺² are restored on a cathodic surface with formation Ni⁺¹, the complicated which tap from a cathode surface leads to their accumulation in cathodic space and further to formation of colloidal phase NiOH. The formed phase causes cathode passivation, complicating restoration of ions of nickel. To the beginning of allocation of hydrogen on the cathode there is a restoration of passivating products, that leads to acceleration of restoration of ions of nickel. With the further growth of cathodic polarization (more-1,2) formation of the basic ions of nickel responsible for occurrence of chemical polarization is possible.

Key words: sulfamate nickeliration electrolits, colloidal phase, cathodic polarization, sedimentation of nickel, of nickel's ions.

УДК: 541.12.011; 541.075

В.И. Наумов

ХИМИЧЕСКАЯ СВЯЗЬ В ПЕРЕХОДНЫХ МЕТАЛЛАХ IV–VI ПЕРИОДОВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Выявлены корреляции между температурами плавления, энергиями сублимации и энергиями связи двухатомных молекул Me-Me и электронным строением переходных металлов IV-VI периодов в сопоставлении с порядками связи двухатомных молекул. Установлено, что основной вклад в энергию кристаллической решетки *d*-металлов вносит энергия парных взаимодействий Me - Me (VI период) и $Me^{2+} - Me^{2+}$ (IV – период). В металлах V периода имеют место оба типа взаимодействий.

Ключевые слова: *d*-металлы, химическая связь, порядки связи, парные взаимодействия

Прочность и температуры плавления *d*-металлов определяется совокупностью многих факторов. Для того, чтобы выяснить какие из них являются определяющими, рассмотрим корреляции некоторых физических свойств металлов, например: температур плавления, энтальпий сублимации и энергий связи двухатомных молекул Me-Me в сопоставлении с порядками связи этих молекул и электронным строением металлов.

На рис. 1 представлены зависимости теплот сублимации (рис. 1, а) и температуры плавления (рис. 1, б) от номера группы в таблице элементов Д.И. Менделеева.

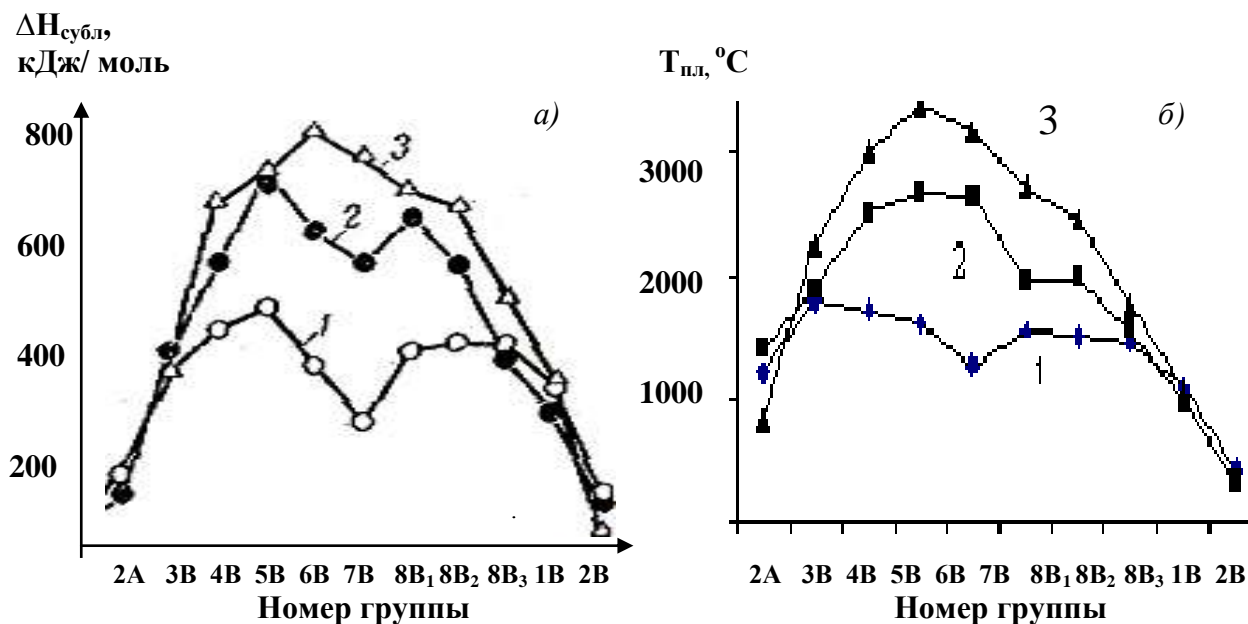


Рис. 1. Теплоты сублимации (А) и температуры плавления (Б) металлов IV (1), V (2) и VI (3) периодов [1,2]

Из рис. 1, а и 1, б следует, что энергии кристаллической решетки и температуры плавления переходных металлов IV, V и VI периодов меняются по-разному: для металлов VI периода зависимости имеют куполообразный вид с максимумом, приходящимся на середину периода; для металлов IV периода на кривых имеется два максимума, разделенных четко выраженным минимумом; зависимости для металлов пятого периода, видимо, носят промежуточный характер.

Попытки произвести расчеты энергий кристаллической решетки этих металлов на основе зонной теории не увенчались успехом [3]. Расчетные зависимости имели вид правильных парабол для металлов всех рассматриваемых периодов, что для металлов IV и V периодов не согласуется с экспериментальными данными по прочности, энтальпиям сублимации, температурам плавления и кипения. Это говорит о том, что описать механизмы образования связей в металлах IV и V периодов, используя представления только зонной теории, не представляется возможным.

Прежде чем перейти к рассмотрению металлов IV–VI периодов, используя метод МО ЛКАО, следует отметить одну очень важную общность, которая в литературе не обсуждалась и которая характерна для всех переходных металлов этих периодов.

Общность заключается в том, что между прочностью, температурами плавления, кипения и энергиями сублимации с одной стороны, и энергиями связи двухатомных молекул этих металлов [4] с другой, наблюдается достаточно хорошее соответствие (сравни данные рис. 2–4).

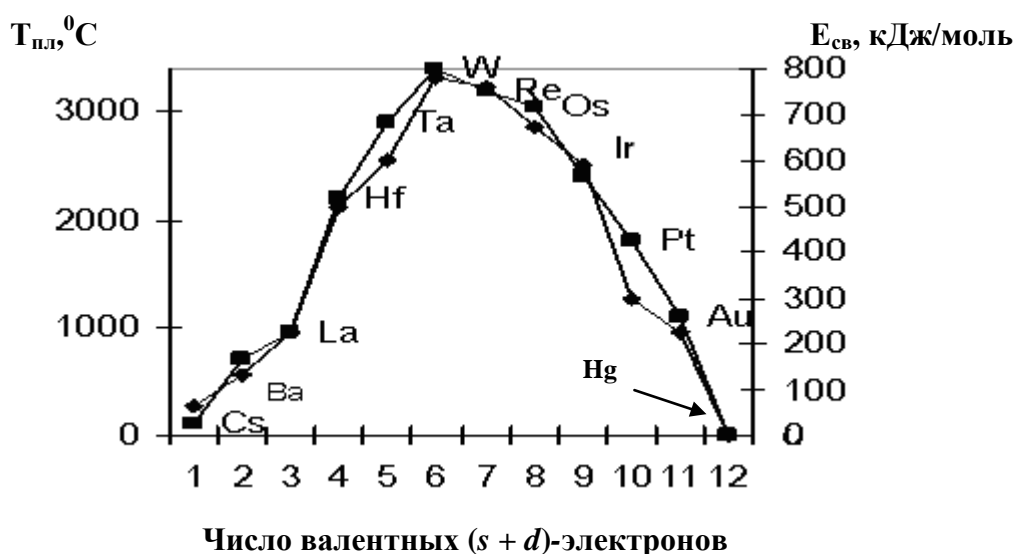


Рис. 2. Зависимости температур плавления (■) и энергии связей двухатомных молекул Me-Me (◆) от числа валентных электронов элементов VI периода

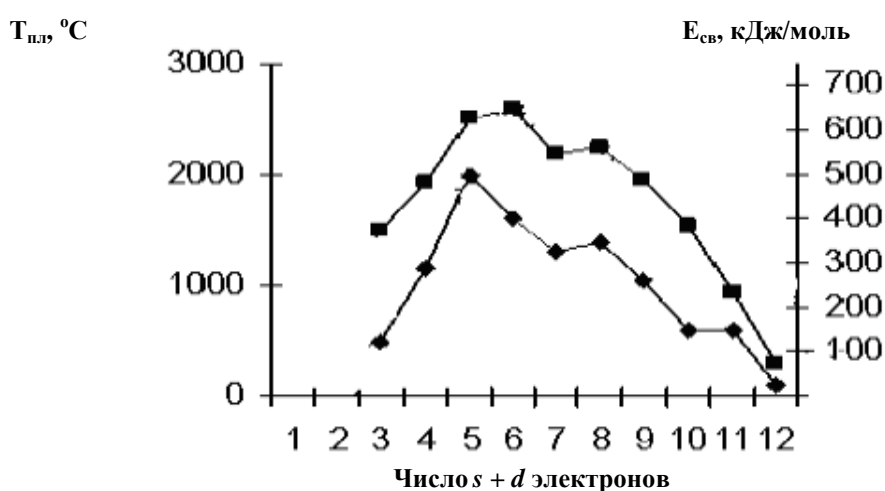


Рис. 3. $T_{пл}$ (■) и энергии связей Me-Me (◆) от числа валентных электронов для металлов V периода

Представленные на рис. 3–5 данные свидетельствуют о том, что достаточно большой вклад в энергию кристаллической решетки вносит энергия парных взаимодействий Me-Me, что подтверждается данными, представленными в табл. 1. Из данных таблицы следует, что

для щелочных и переходных металлов энергия связи двух соседних атомов Ме-Ме составляет ~ 60 % для щелочных металлов, 41% для d -металлов IV периода и 58–60% для d -металлов V и VI периодов от энергий решетки.

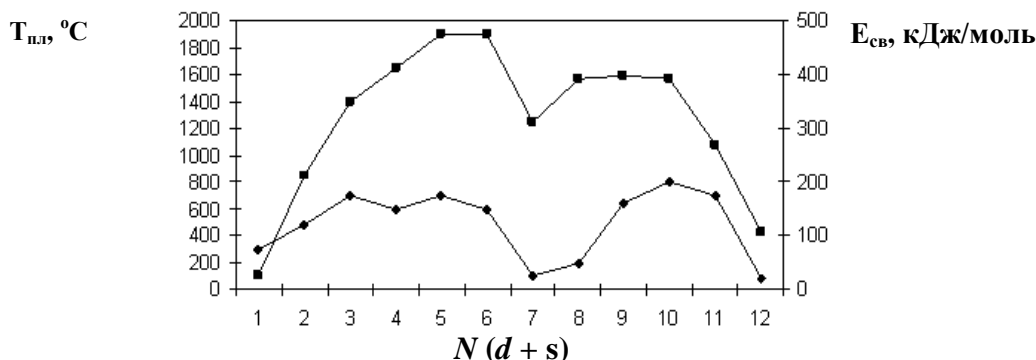


Рис. 4. Зависимости температур плавления (■) и энергий связей двухатомных молекул Ме-Ме (◆) от числа валентных электронов металлов IV периода

Очевидно, энергия парных взаимодействий соседних атомов в решетке играет огромную роль при формировании кристаллических решеток различных типов. Похоже, что и в металлических кристаллах, включая щелочные металлы, энергия решетки в основном также складывается из энергий связи молекулы Ме-Ме (41 - 60 %) (табл.1).

Таблица 1

Энергия разрыва химических связей двухатомных молекул Ме-Ме (E , кДж/моль) и энтальпии сублимации ($\Delta H_{\text{суб}}$, кДж/моль) этих веществ

Me	E ,	$\Delta H_{\text{суб}}$,	$E/\Delta H_{\text{суб}}$	Me	E ,	$\Delta H_{\text{суб}}$,	$E/\Delta H_{\text{суб}}$
Li	102	174	0,59	Ti	144	468	0,31
Na	73	109	0,67	V	269	515	0,52
K	54,6	90,4	0,60	Cr	143	368	0,39
Rb	49	82,1	0,60	Mn	100	280	0,36
Cs	44	78,5	0,56	Fe	92	402	0,23
				Co	192	431	0,45
				Ni	200	435	0,46
				Cu	173	339	0,51
				Zn	29	60	0,48
Средние значения для щелочных металлов ($E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{средн}} = 0,61$				Средние значения для d -металлов IV группы ($E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{средн}} = 0,41$			
Y	159± 21	-	-	Hf	-	480	-
Zr	298	450	0,66	Ta	443	781	0,58
Nb	510	742	0,69	W	513	837	0,61
Mo	406	669	0,61	Re	-	777	-
Tc	-	649	-	Os	437	670	0,65
Ru	500	600	0,83	Ir	414	669	0,62
Rh	285	630	0,45	Pt	307	565	0,54
Pd	115	400	0,29	Au	226	366,6	0,62
Ag	160	284	0,56				
Средние значения для d -металлов V группы ($E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{средн}} = 0,58$				Средние значения для d -металлов VI группы ($E/\Delta H_{\text{суб}})_{\text{средн}} = 0,60$			

Такие же большие вклады парных взаимодействий в энергию кристаллических решеток (~ 56 %) характерны и для ионных кристаллов, составленных из щелочных металлов и галогенов [5].

Например, энергия кристаллической решетки NaCl равна 774 кДж, а энергия связи в единичной молекуле NaCl равна 408 кДж, что составляет 53 % от энергии решетки. При образовании молекулы - димера $\text{NaCl} + \text{NaCl} = \text{Na}_2\text{Cl}_2$ дополнительно выделяется 192 кДж ($408 + 192 = 600$ кДж) (77,5 %), а при тримеризации (Na_3Cl_3) выделяется около 334 кДж и суммарная энергия приблизительно становится равной энергии решетки бесконечного кристалла NaCl.

Из рис. 3 следует, что наиболее прочными и тугоплавкими являются металлы VB и VIB подгрупп VI периода. У них заполняется электронами половина *d*-подуровня и реализуется максимально возможное число неспаренных электронов, а, следовательно, наибольшее число возможных ковалентных связей. Дальнейшее заполнение электронами атомных орбиталей (АО) приводит к спариванию электронов и падению величин энергий сублимации и температур плавления. Все это свидетельствует о том, что химическая связь, а не электронный газ, играет доминирующую роль, определяющую прочность и температуры плавления и кипения металлов и при этом достаточно большой вклад в энергию решетки металла вносят парные взаимодействия Me-Me, а тип решетки если и вносит вклад, то он крайне незначительный.

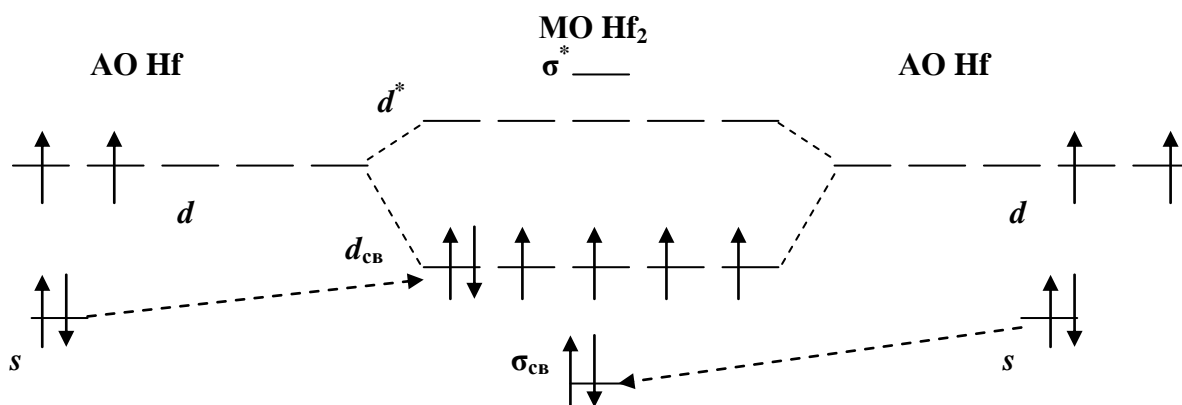
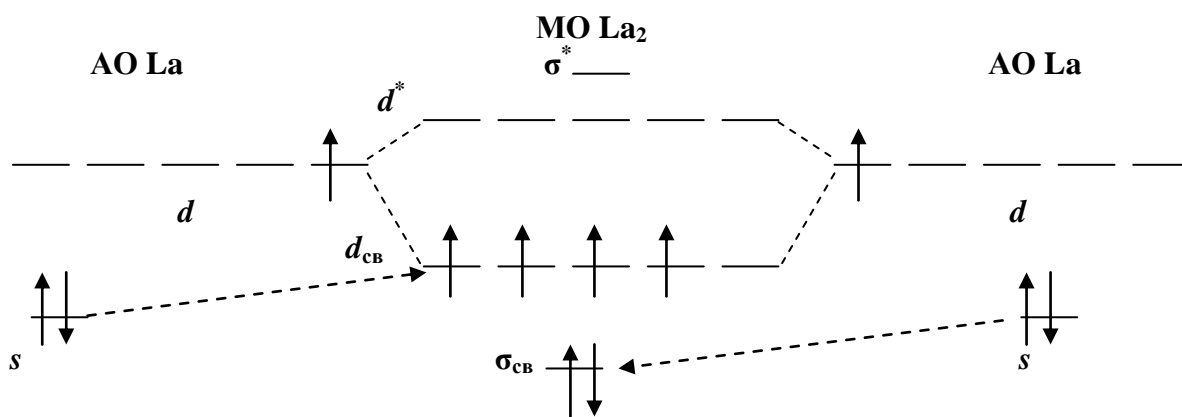
Рассмотрим и другие корреляции, которые позволяют объяснить прочностные свойства металлов в зависимости от их электронного строения. Для этого рассмотрим металлы IV - VI групп отдельно.

Связь в металлах VI периода. Из рис. 1 и рис. 2 следует, что максимальные $T_{\text{пл}}$ и прочность металлов VI периода соответствует конфигурации внешних электронов d^3s^2 , d^4s^2 , d^5s^2 (Ta, W, Re). На эти же электронные конфигурации приходятся и максимум энергии связи парных взаимодействий Me - Me (рис.2).

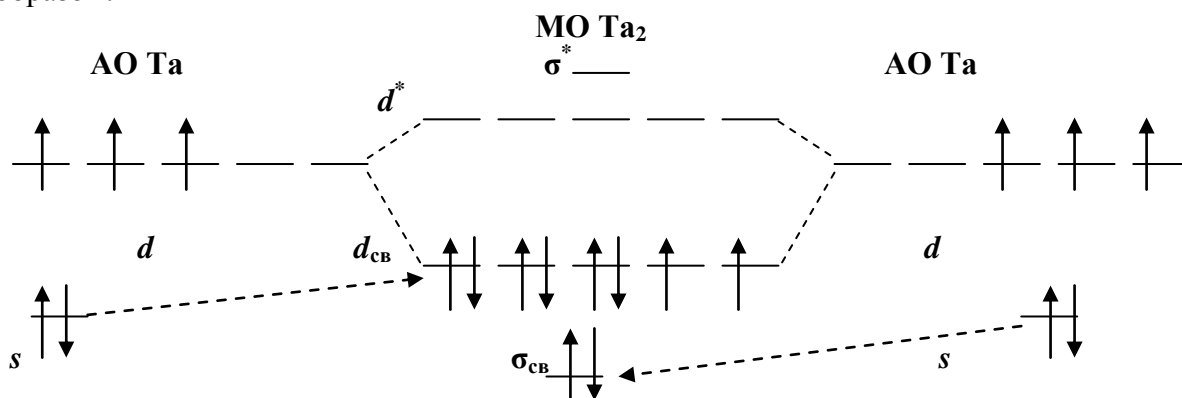
Очевидно, связь в переходных металлах VI периода можно рассматривать с позиций метода молекулярных орбиталей, в первом приближении, как связь двух соседних атомов. На этой основе можно оценить порядки связи в молекуле Me - Me в зависимости от электронного строения изолированного атома Me и ответить на вопрос, почему наиболее твердые металлы VI периода имеют электронную конфигурацию d^3s^2 , d^4s^2 или d^5s^2 . При этом следует иметь в виду, что для обсуждаемых периодов энергетические *d*- и *s*-зоны перекрываются и становятся возможными взаимные переходы электронов с *s*-подуровня на *d*-подуровень и обратно. Так, основное состояние никеля $3d^84s^2$ имеет почти такую же энергию, что и первое возбужденное состояние с конфигурацией $3d^94s^1$. Согласно экспериментальным данным, переход от состояния $3d^84s^2$ в состояние $3d^94s^1$ сопровождается повышением энергии всего на 6,7 кДж/моль [6]. В [6] сопоставлены степени заселенности зон некоторых переходных металлов в сравнении с электронными конфигурациями соответствующих изолированных атомов. Степени заселенности были получены на основе данных по магнитным моментам атомов и представляют собой дробные величины.

Дробное число электронов в коэффициенте заселенности зон может говорить о следующем: 1) электронные плотности *3d*-электронов соседних атомов металла перекрываются достаточно сильно, что сопровождается образованием *d*-зон, которые перекрываются с *4s*-зоной; 2) атомы в кристалле металла могут обладать различными электронными конфигурациями. Например, у изолированного атома никеля электронная конфигурация соответствует $3d^84s^2$, а заселенность зон в металле - $3d^{9,45}4s^{0,55}$. По мнению [6], у атомов никеля ввиду близости энергий *d* и *s* подуровней в металле реализуется несколько электронных состояний, которые находятся в равновесии $3d^84s^2 \leftrightarrow 3d^9s^1 \leftrightarrow 3d^{10}$ и вклад этих состояний для никеля примерно равен 55%, 35 % и 10 % соответственно.

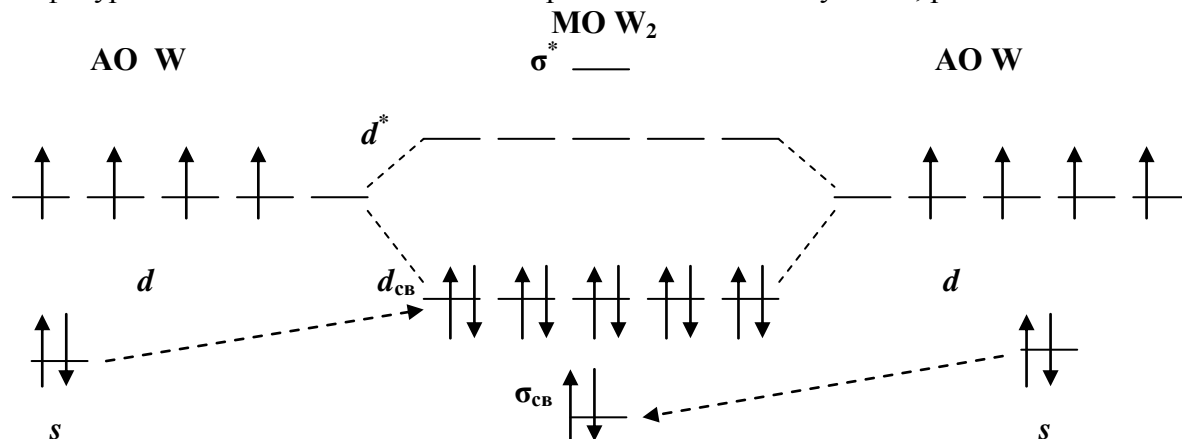
Далее выборочно представлены энергетические диаграммы для молекул La_2 ($5d^16s^2$) и Hf_2 ($5d^26s^2$). Из диаграмм видно, что порядки связи в этих молекулах равны 3 и 4 соответственно.



Для конфигурации d^3s^2 (Ta) энергетическая диаграмма MO Ta₂ выглядит следующим образом:

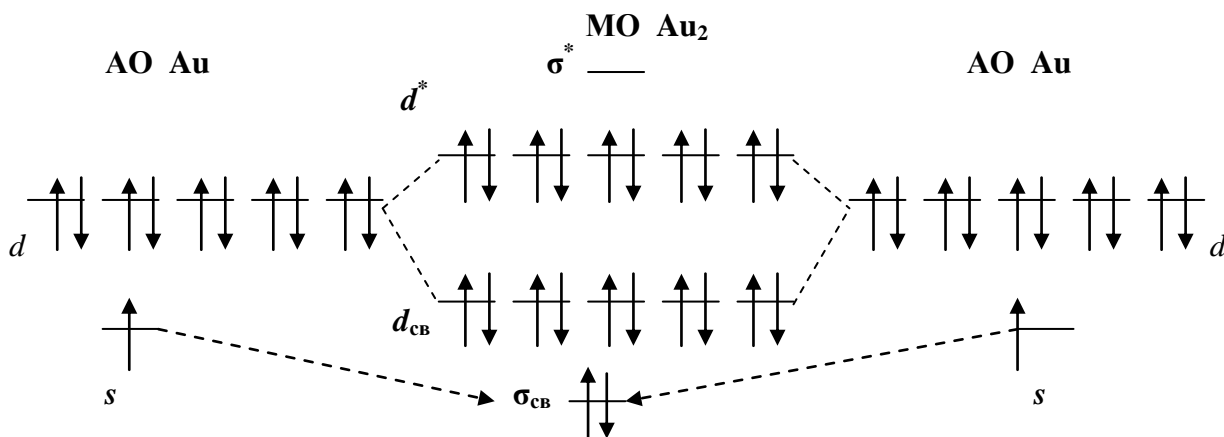


Из диаграммы следует, что порядок связи в молекуле Ta₂ (d^3s^2) равен 5. Следующий за танталом, самым прочным и тугоплавким металлом является вольфрам, который имеет конфигурацию d^4s^2 и самый большой порядок связи в молекуле W₂, равный шести.



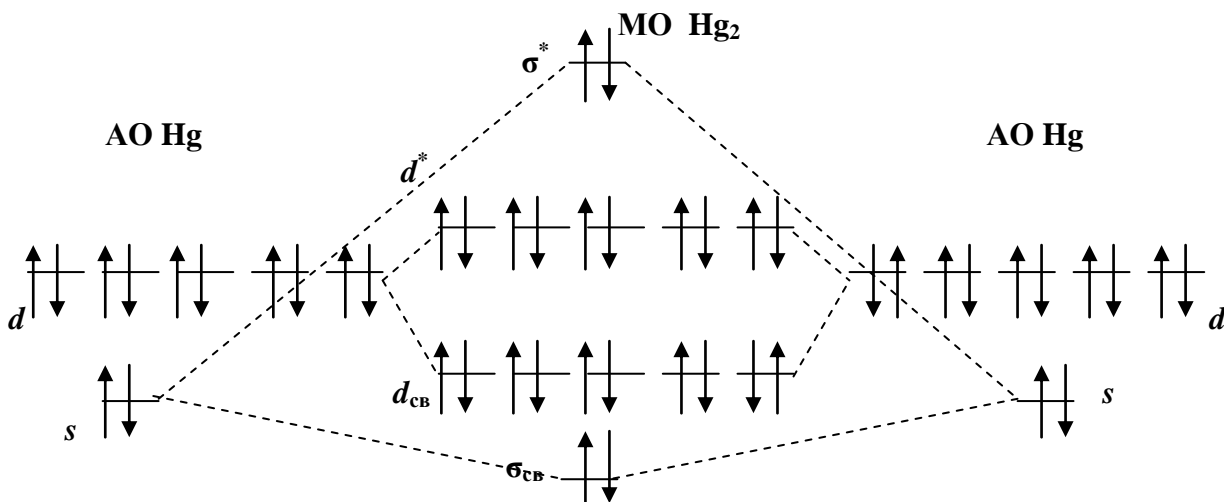
Следующий за вольфрамом рений имеет электронную конфигурацию d^5s^2 , которая приводит к снижению порядка связи (ПС = 5) из-за заполнения двумя электронами разрыхляющей d^* молекулярной орбитали. У последующих за рением металлов (Os, Ir, Pt, Au, Hg) наблюдается дальнейшее заполнение разрыхляющих молекулярных орбиталей, снижение порядка связи (4, 3, 2, 1 и 0) и прочности.

Рассмотрим отдельно золото и ртуть. Эти металлы имеют свои особенности, связанные с полностью заполненными электронами d подуровнем (Au ... $5d^{10}6s^1$) и с полностью заполненными электронами d - и s -подуровнями (Hg $5d^{10}6s^2$).



Для золота ПС = $(12 - 10)/2 = 1$ за счет нескомпенсированной пары электронов, размещающихся на связывающей σ_{CB} -орбитали.

У ртути полностью заполнены связывающие и разрыхляющие орбитали и ПС = 0 (см. ниже энергетическую диаграмму). Ртуть является единственной жидкостью среди металлов при комнатной температуре ($T_{пл} = -38,8$ °С). Из диаграммы следует, что порядок связи для ртути равен нулю и, по-видимому, соседние атомы ртути связаны между собой только силами Ван-дер-Ваальса, что приводит к низким температурам плавления ртути и высоким парциальным давлениям ее паров при комнатных температурах.



В [7] на основе рентгенограмм твердой и жидкой ртути было установлено, что в кристаллическом и жидком состояниях ртуть обладает одинаковым координационным числом, равным шести, что свидетельствует о том, что в твердой и жидкой фазах ртуть состоит из обособленных атомов, связанных между собой только силами Ван-дер-Ваальса.

Из построенных нами энергетических диаграмм следует, что для металлов VI периода в зависимости от числа валентных электронов порядки связи (рис. 5) проходят через макси-

мум при числе суммы ($s + d$) электронов равной шести, что соответствует электронной конфигурации d^4s^2 (W) и качественно согласуется с данными, представленными на рис. 1 и 2.

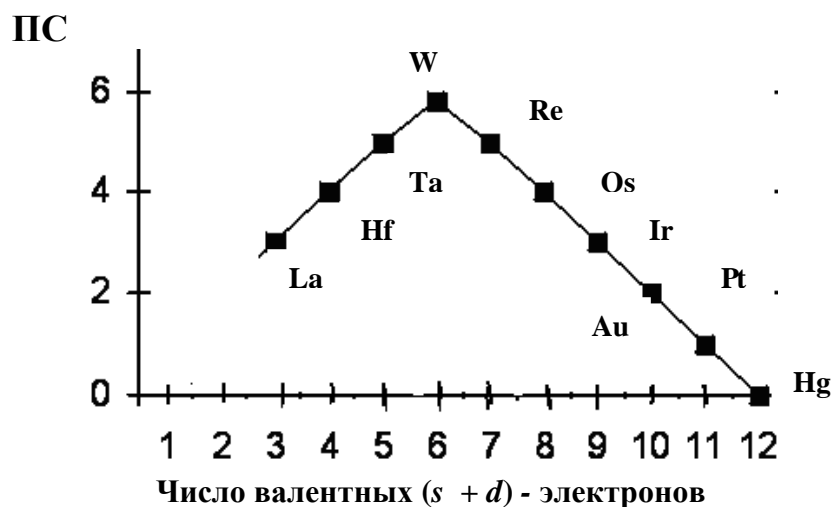


Рис. 5. Зависимость ПС от числа валентных электронов для металлов VI периода

Таким образом, ясно, что прочностные и термические характеристики переходных металлов VI периода в основном определяются энергией парных взаимодействий соседних пар атомов Me-Me.

Показано, что поведение переходных металлов IV периода существенно отличается от поведения металлов VI периода: на зависимостях имеются два максимума, разделенных минимумом, который приходится на Mn; сами значения величин (прочность, энтальпии сублимации и температуры плавления) для металлов IV периода значительно меньше, чем у металлов VI периода. В этой связи следует рассмотреть электронные характеристики атомов этих металлов и характеристики их соединений, чтобы понять и выявить причины, приводящие к отличию поведения d -металлов IV и VI периода.

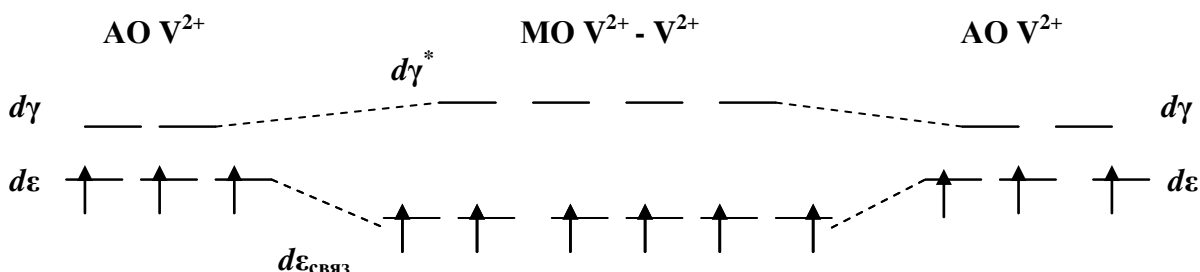
Известно, что: 1) эффективные заряды ядер переходных металлов меняются в ряду $5d \gg 3d$; в этом же направлении меняются энергии ионизации I_1 и I_2 и их сумма $I_1 + I_2$; это свидетельствует о том, что атомы $3d$ -металлов легче теряют электроны и образование ионов Me^+ или Me^{2+} становится более вероятным, чем для $5d$ -металлов; 2) двугорбые зависимости прочности, температур плавления и кипения и энергий связи Me-Me (рис. 1 и 4) не отличаются по своему виду от кривых изменения энергий гидратации двухзарядных ионов этих металлов и энергий кристаллических решеток в оксидах и диалогенидах металлов IV периода [8 - 10], в которых металлы находятся в виде ионов Me^{2+} . Это подтверждается и данными по изменению радиусов ионов Me^{2+} [8 - 10], и при этом не наблюдается корреляции с ковалентными радиусами нейтральных атомов, которые имеют вид перевернутой правильной параболы [8].

Таким образом, характер изменения энергий связи в Me-O, Me - $(H_2O)_n$, Me - Γ_2 (где $\Gamma = F, Cl, Br, I$), энергий сублимации, парных взаимодействий Me-Me и температур плавления, подобен изменению ионных радиусов, что является доказательством того, что в узлах кристаллической решетки элементов IV периода преимущественно находятся ионы Me^{2+} , а не нейтральные атомы.

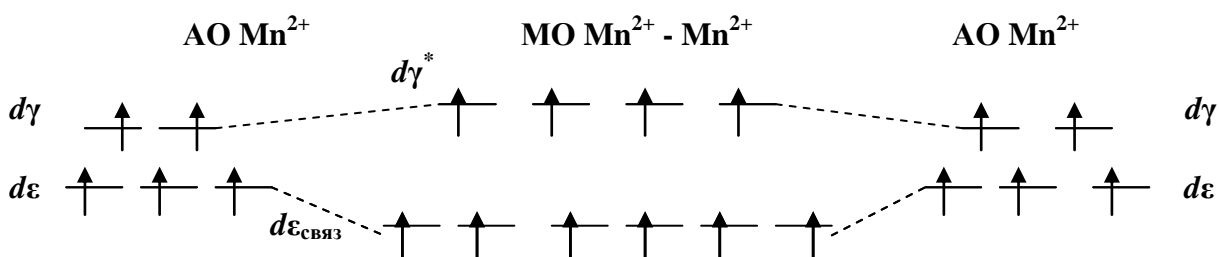
Приняв это за основу, рассмотрим с точки зрения образования молекул $Me^{2+} - Me^{2+}$, на примерах $V^{2+} - V^{2+}$; $Mn^{2+} - Mn^{2+}$ и $Ni^{2+} - Ni^{2+}$ и некоторых других с помощью метода МО ЛКАО. При этом будем считать, что два электрона от каждого атома перешли в зону проводимости и участия в образовании связей не принимают, а сами металлы IV периода кристаллизуются в гранцентрированную кубическую (Mn, Ni, Cu), гексагональную (Sc, Ti, Co, Zn) и объемноцентрированную кубическую (V, Cr, Fe) упаковки, в которых каждый атом окружен 8 или 12 атомами, расположенными в вершинах кубооктаэдра [11].

Таким образом, каждый двухзарядный ион металла IV периода в кристаллической решетке находится в октаэдрическом поле, и d – подуровень в этом случае расщепляется на два подуровня $d\varepsilon$ и $d\gamma$ [8].

Учитывая это, для парных взаимодействий $Me^{2+} - Me^{2+}$ будем иметь следующие, выборочно представленные далее, наиболее характерные энергетические диаграммы.

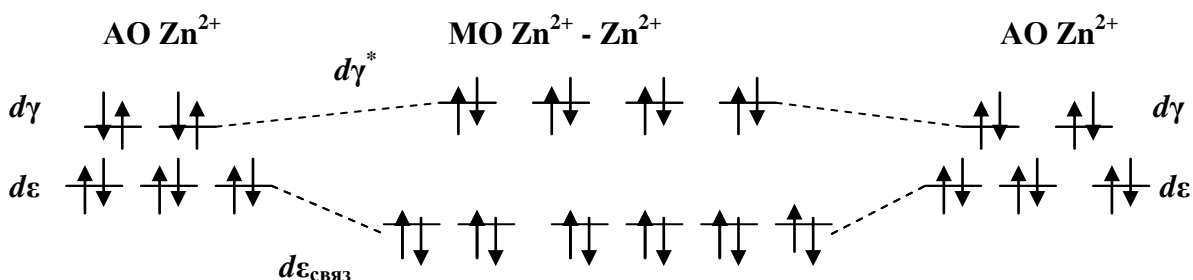


Из диаграммы видно, что порядок связи в соединении $V^{2+}-V^{2+}$ равен $PC = 3$. Для системы $Mn^{2+} - Mn^{2+}$ схема образования МО будет выглядеть следующим образом:



Из диаграммы следует, что $PC = 1$ и для этой системы суммарный спин является максимально возможным $\Sigma s = 5$, что согласуется с данными о том, что Mn по своим парамагнитным свойствам превосходит большинство переходных металлов. Для системы $Ni^{2+} - Ni^{2+}$ порядок связи равен $PC = 4$.

Крайнем в этом ряду является цинк, для которого $PC = 2$.



Суммированные данные по порядкам связи, определенные из подобных энергетических диаграмм для систем $Me^{2+} - Me^{2+}$, составленных из металлов IV-го периода, представлены на рис.6. Из рисунка следует, что зависимости PC характеризуются двумя максимумами, приходящимися на V и Ni и минимумом – на Mn. Радиусы ионов Me^{2+} этих металлов, наоборот, имеют минимумы для V и Ni и максимум, приходящийся на Mn. Порядки связи для металлов IV-го периода не превышают четырех, что свидетельствует об их меньшей прочности по сравнению с металлами VI-го периода, где в максимуме величина PC равна 6 (для W).

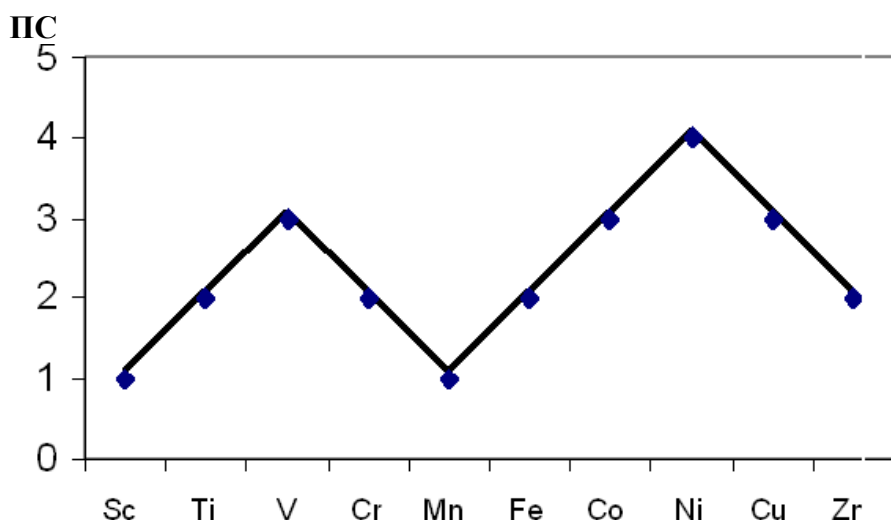


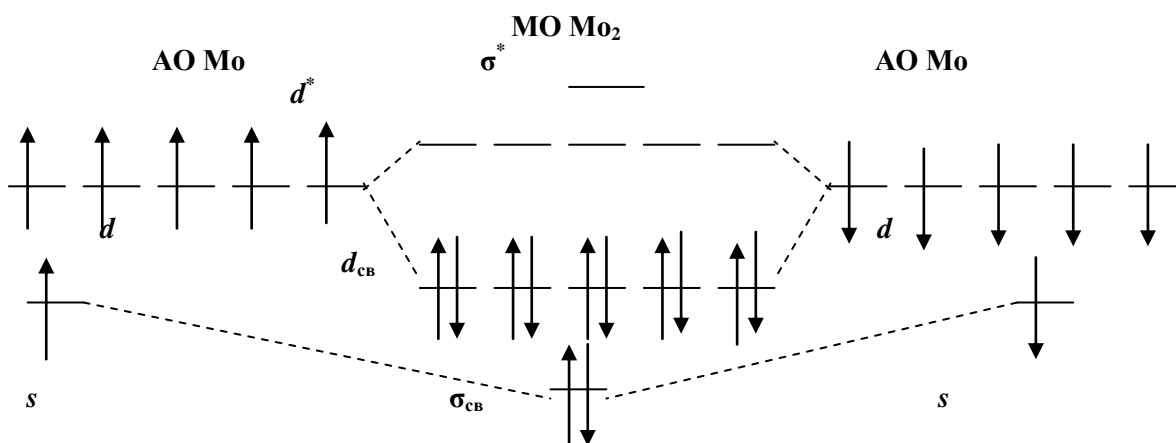
Рис. 6. Порядки связи в системах $Me^{2+} - Me^{2+}$, определенные из энергетических диаграмм для ионов Me^{2+} металлов 4-го периода

Таким образом, парные взаимодействия для металлов IV-го периода в кристаллических решетках этих металлов преимущественным образом обусловлены взаимодействием соседствующих пар ионов $Me^{2+} - Me^{2+}$.

V период, по всей видимости, является переходным, и в кристаллической решетке металлов этого периода химические связи, очевидно, образуются как по механизмам VI, так и IV периодов и по этой причине зависимости энтальпий сублимации, энергий связи $Me-Me$ и температур плавления носят отпечатки аналогичных кривых в меньшей степени IV, и в большей степени VI периодов (см. рис. 1–4). На зависимостях имеется плохо выраженный минимум в центре d -серии, а сами значения величин ближе к аналогичным значениям, наблюдаемым для металлов VI периода.

Радиусы атомов d -элементов V-го и VI-го периодов одной подгруппы очень близки, а сами элементы одной группы схожи по многим химическим свойствам. Это связано с тем, что увеличение радиусов за счет возрастания числа электронных слоев при переходе от V к VI периоду компенсируется f -сжатием, вызванным заполнением $4f$ -подслоя у f -электронов VI периода. По этой причине характер энергетических диаграмм для V-го периода следует считать аналогичным VI-му периоду.

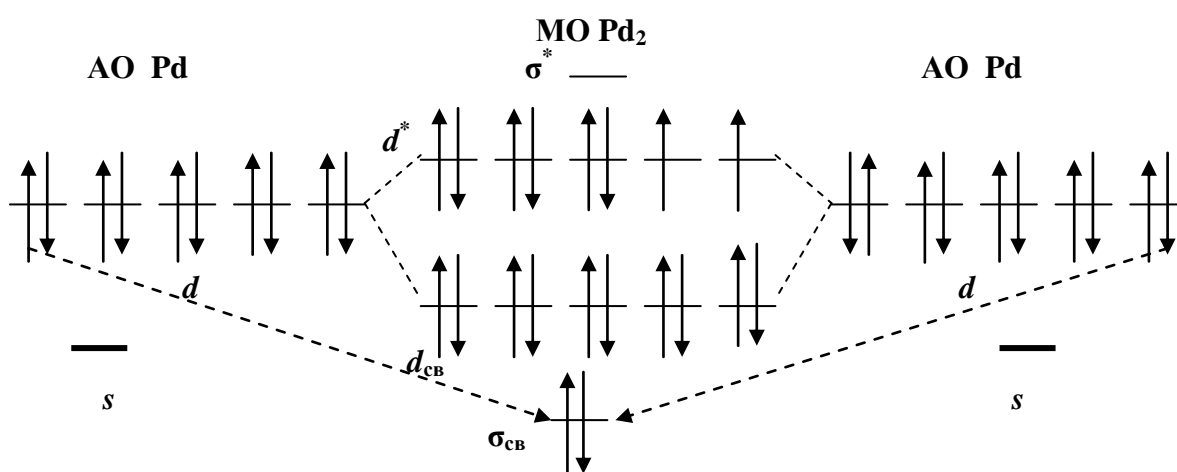
Рассмотрим лишь некоторые наиболее характерные молекулярные энергетические диаграммы для металлов V периода. Так, наиболее прочные металлы этого периода имеют высокие ПС и электронные конфигурации d^4s^1 (Nb) (ПС = 5) и Mo (электронная конфигурация d^5s^1), которому отвечает самая высокая прочность в V периоде (ПС = 6).



У последующих за Мо металлов этого периода Tc, Ru, Rh, Pd и Ag по мере заполнения разрыхляющих МО электронами порядки связи соответственно снижаются: 5 (Tc), 4 (Ru), 3 (Rh), 2 (Pd) и 1 (Ag).

Особого пояснения требует Pd, имеющий электронную конфигурацию $4d^{10}5s^0$ и промежуточную прочность между Rh и Ag. Модуль упругости для Rh равен 280, для Pd - 115, для Ag - 80 ГН/м^2 . Модуль упругости определяется межатомным взаимодействием и поэтому коррелируется с энергией связи E в металле.

В случае Pd, полностью заполненную d -оболочку нельзя рассматривать как внутреннюю, не участвующую в связях. В молекуле Pd_2 , в соответствии с сохранением минимума энергии, вначале заполняется свободная связывающая s -МО, в результате чего на двух разрыхляющих d -орбиталях оказываются 2 неспаренных электрона, что обеспечивает порядок связи в молекуле Pd_2 равный двум и кристалл является парамагнетиком, что соответствует эксперименту.



Таким образом, переходные металлы в кристаллическом состоянии связаны между собой ковалентной связью и большой вклад в образование кристаллических решеток переходных металлов вносят два механизма, вклады которых меняются при переходе от IV периода (превалирующий вклад $\text{Me}^{2+} - \text{Me}^{2+}$ взаимодействий) к V и VI периодам (доминирующий вклад парных взаимодействий $\text{Me} - \text{Me}$).

Библиографический список

1. Браун, Т. Химия – в центре наук / Т. Браун, Г.Ю. Лемей. – М.: Мир. 1983. Т. 1. – 448 с. Т. 2. – 520 с.
2. Фролов, В.В. Химия / В.В. Фролов. – М.: Высш. школа, 1979. – 559 с.
3. Займан, Дж. Физика металлов. Электроны / Дж. Займана. – М.: Мир. 1972. – 464 с.
4. Волков, А.И. Метод молекулярных орбиталей / А.И. Волков. – М.: Новое знание. 2006. – 133 с.
5. Шусторович, Е.М. Химическая связь / Е.М. Шусторович. – М.: Наука. 1973. – 231 с.
6. Аноганикум / под. ред. Л. Кольдиц. – М.: Мир. 1984. Т. 1. – 668 с.
7. Campbell, J.A., Hildebrand, J.H. / J.Chem. Phys. 1943. V. 2. – 330 p.
8. Ахметов, Н.С. Общая и неорганическая химия / Н.С. Ахметов. – М.: Высшая школа. 1988. – 640 с.
9. Крестов, Г.А. Теоретические основы неорганической химии / Г.А. Крестов. – М.: Высшая школа. 1982. – 295 с.

10. **Зайцев, О.С.** Общая химия. Состояние веществ и химические реакции / О.С. Зайцев. – М.: Химия. 1990. – 352 с.
11. **Пирсон, У.** Кристаллохимия и физика металлов и сплавов. Т. 1. / У. Пирсон. – М.: Мир. 1977. – 197 с.

*Дата поступления
в редакцию 13.10.2011*

V.I. Naumov

CHEMICAL BOND OF TRANSITION METALS IV-VI PERIODS

Were established correlations between melting points, sublimation energies and binding energies of diatomic molecules Me-Me and the electronic structure of transition metals IV-VI periods in comparison with the orders of bond of diatomic molecules. Found that the main contribution to the energy of the crystal lattice *d*-metals makes the energy of pair interaction Me-Me (VI period) and Me^{2+} - Me^{2+} (IV period). There are two types of interactions in metals of the fifth period.

Key words: *d* – metals; chemical bond; bond order; pairs interactions.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 336

Д.А. Корнилов

КОНКУРЕНТОСПОСОБНОСТЬ ПРОДУКЦИИ КАК ФУНКЦИЯ СООТВЕТСТВИЯ ПОТРЕБИТЕЛЬСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОВАРА ЕГО СТОИМОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены вопросы оценки конкурентоспособности продукции, оценки потребительских характеристик легких коммерческих автомобилей (LCV), соответствия цены автомобилей их потребительским характеристикам. Сделан анализ потребительских характеристик и цены легких коммерческих автомобилей (LCV).

Ключевые слова: Конкурентоспособность, стоимость, цена, потребительские характеристики, легкие коммерческие автомобили.

С приходом рыночной экономики назрел вопрос о пересмотре подходов к определению целей и задач всего процесса производства автомобилей, включая и их проектирование. В сложившихся условиях проектировщики вынуждены учитывать запросы потребителей или будущих покупателей этой продукции, а также наличие конкурирующих фирм. В круг интересов покупателей входят комфорт, престижность, качество изготовления, надёжность машины, её цена. Техничко-эксплуатационные свойства также учитываются, но не в первую очередь, и среди них важными являются эксплуатационные затраты, т. е. расход топлива.

Проведённые исследования авторынка в странах, уже перешедших на всеобщую систему качества, показали, что интересы покупателей автомобилей включают в себя следующие свойства:

- роскошь и комфорт;
- стиль и дизайн;
- топливную экономичность;
- безопасность;
- минимальные затраты на эксплуатацию;
- качество изготовления;
- долговечность и возможность перепродажи;
- основные дорожные характеристики;
- цену.

Для оценки значимости вносимых в конструкцию автомобиля изменений необходимо учитывать потребительские свойства и переходить к общей оценке автомобиля через степень его конкурентоспособности на основе принципов Парето, Тагутти и других, в основе которых лежит соотношение цена-качество.

Опросы покупателей и владельцев автомобилей показывают, что их интересуют прежде всего такие качества автомобиля, как надёжность, удобство, экономичность. Для многих важным фактором является качество изготовления, стоимость содержания и, конечно, цена. Техничко-экономические показатели большинства легковых автомобилей весьма сходны и коррелируются вместе с классом автомобиля. Конечно, степень достоверности

оценки имеет определенное рассеивание, но для того и проводятся многочисленные массовые опросы, чтобы получить усредненные и более достоверные результаты.

Другая особенность состоит в том, что необходимо сопоставить разнообразные величины, как имеющие размерность, так и не имеющие таковой, например, дизайн. Во всех этих случаях применяется так называемая экспертная оценка в баллах. Она основана на использовании группы автомобилей-аналогов, с которыми сравнивается проектируемый или покупаемый автомобиль. При этом шкала баллов, или оценка, может быть достаточно подробной, например, десятибалльной, или весьма упрощенной, например, двоичной (хорошо-плохо) и зависит как от квалификации эксперта, так и от задачи оценки. Могут быть и промежуточные шкалы - например, пятибалльная.

Рассмотрим ряд методик по оценке конкурентоспособности (КП) автомобиля.

В упрощенном виде методика оценки конкурентоспособности может быть представлена в виде трех этапов:

1. Формирование групп характеристик КП автомобиля.
2. Анализ показателей в группах.
3. Определение соответствия потребительских характеристик (ПХ) автомобиля его стоимости.

Последний этап позволяет решить две задачи.

Прямая задача:

На основе анализа ПХ новой модели автомобиля определяется начальная цена для вывода автомобиля на потребительский рынок или потребитель формирует индивидуальные предпочтения по ПХ и анализирует какой автомобиль в большей степени соответствует его требованиям с учетом установленной на рынке цены.

Обратная задача:

На основе анализа имеющихся на рынке аналогов формируется параметрическая модель соответствия ПХ цене, определяются ключевые ПХ, конструируется новая модель автомобиля с оптимальным набором ПХ для максимизации стоимости при минимизации затрат.

Например, оценка конкурентоспособности может быть проведена методом экспертных оценок при расчете обобщенного интегрального показателя Π с учетом коэффициентов весомости K_d, K_k, K_b, K_z, K_n ,

$$\Pi = \Pi_d K_{d+} + \Pi_k K_{k+} + \Pi_b K_{b+} + \Pi_z K_{z+} + \Pi_n K_n, \quad (1)$$

где $\Pi_d, \Pi_k, \Pi_b, \Pi_z, \Pi_n$ - показатели двигателя, комфорта, безопасности, топливной экономичности, надежности.

В обобщенном виде эта методика может быть представлена для комплексной оценки изделий автомобильной промышленности. Расчет обобщенного показателя качества K проектируемого автомобиля, по отношению к группе автомобилей-аналогов представим в виде:

$$K = m_j m_{ij} q_{ij}, \quad (2)$$

где m_j - коэффициенты значимости групп показателей;

m_{ij} - коэффициенты значимости самих показателей i в группе,

q_{ij} - показатель i свойства в группе выраженный в относительных величинах.

При расчете относительных величин могут применяться методы сравнения со средним значением, лучшим, базовым и т.д. Также могут сразу применяться балльные оценки.

Для установления множества изделий-аналогов определяют пределы изменения классификационных (и, при необходимости, конструктивно-технологических) показателей, которые характеризуют аналогичную продукцию данного назначения. Например,

- снаряженная масса легкового автомобиля - от 1100 до 1600 кг;
- рабочий объем двигателя - от 2.0 до 3.0 л. и т.д.

При оценке конкурентоспособности автомобилей многими исследователями была отмечена корреляционная зависимость между рыночной ценой и совокупностью свойств автомобиля [1].

Введем рабочую гипотезу о том, что рыночная цена автомобиля является некоторым эквивалентом его свойств, отражающим покупательский интерес на фоне требований рынка в условиях современной конкуренции.

Выразим стоимость каждого свойства автомобиля произведением его балльной экспертной оценки B_i , на маркетинговую переменную X_i то получим уравнение, в левой части которого находится цена автомобиля [2]:

$$C = B_{\text{пр}}X_{\text{пр}} + B_{\text{кф}}X_{\text{кф}} + B_{\text{д}}X_{\text{д}} + B_{\text{б}}X_{\text{б}} + B_{\text{н}}X_{\text{н}} + B_{\text{эф}}X_{\text{эф}} - B_{\text{с}}X_{\text{с}}, \quad (3)$$

где $B_{\text{пр}}X_{\text{пр}}$ - балльная оценка и переменная престижа;

$B_{\text{кф}}X_{\text{к}}$ - балльная оценка и переменная комфорта;

$B_{\text{д}}X_{\text{д}}$ - балльная оценка и переменная дизайна;

$B_{\text{б}}X_{\text{б}}$ - балльная оценка и переменная безопасности;

$B_{\text{н}}X_{\text{н}}$ - балльная оценка и переменная надёжности;

$B_{\text{эф}}X_{\text{эф}}$ - балльная оценка и переменная комфорта;

$B_{\text{с}}X_{\text{с}}$ - балльная оценка и переменная стоимости содержания.

Таким образом, эта схема дает возможность оценить любые конструктивные изменения в проекте с точки зрения соотношения цена-качество, включая комплектацию вспомогательного оборудования для комфорта и дизайна, по известным маркетинговым переменным. Для этого необходимо правильно соотнести узел и свойство.

Рассмотрим пример реализации данной методики для анализа потребительских качеств легких коммерческих автомобилей (LCV).

Вначале необходимо разработать перечень характеристик, наиболее интересующих пользователей автомобилей. За основу возьмем набор ПХ, рассмотренный в работе С.М. Кудрявцева [2].

Таблица 1
Предварительная группировка потребительских характеристик автомобиля

1	Престиж
2	Комфорт
3	Дизайн
4	Безопасность
5	Надежность
6	Эффективность
7	Стоимость эксплуатации и обслуживания автомобиля
8	Рабочие характеристики
9	Экологичность
10	Модификация

Однако для проведения анализа и определения потребительских качеств автомобиля представленные группы являются достаточно крупными и будут содержать недостаточно подробные данные.

Для анализа были рассмотрены десять фургонов различных автомобильных марок с разными комплектациями:

- Volkswagen Transporter T5;
- Ford Transit;
- Fiat Ducato;
- Mercedes-Benz Sprinter 316;
- Peugeot Boxer;
- Citroen Jumper;
- IVEKO Daily;
- Opel Movano 2.3 DT DPF 92kW M;

- Renault Master;
 - Газель Бизнес.
- Стоимость автомобилей приведена в табл. 3.

Таблица 2

Дерево свойств легкового автомобиля

I уровень	II уровень	III уровень
1	2	3
1) Престиж	Класс	
	Фирма	
	Цвет кузова	
2) Комфорт	Комфорт посадки и размещения	Регулировка руля
		Электрорегулировка сидений
		Электрорегулировка стекол и их подогрев
		Электрорегулировка зеркал и их подогрев
	Комфорт езды	Плавность хода
		Уровень шума
		Обзорность
		Кондиционер
	Комфорт управления	Усилитель руля
		Автоматическая КПП
		Круиз-контроль
		АБС тормозов
		Усилитель тормозов
Автоматическая диагностика		
Фирма	Бортовой компьютер	
	Противобуксовочная система	
2) Дизайн	Временная новизна дизайна модели	
	Стиль модели	
	Цельность композиции модели	Сочетаемость составных частей внешнего дизайна
		Сочетаемость составных частей внутреннего дизайна
		Сочетаемость внутреннего и внешнего дизайна
Фирма		
4) Безопасность	Активная безопасность	Тормозные свойства (тип тормозных механизмов, АБС)
		Управляемость (ГУР)
		Устойчивость (тип привода, ГУР)
		Плавность хода
	Пассивная безопасность	Ремни безопасности
		Подушки безопасности
	Система защиты от посягательств	Усиление кузова
		Размеры автомобиля
		Противоугонная сигнализация
		Иммобилайзер
5) Надежность	Качество сборки	
	Коррозийная стойкость	
	Надежность узлов	
	Фирма	
6) Эффективность	Максимальная скорость	
	Время разгона	
	Угол подъема	
	Удельная мощность (max)	

Окончание табл. 2

1	2	3
7) Среднегодовая стоимость эксплуатации и обслуживания автомобиля	Постоянные расходы	Налог с владельца ТС
		Оплата гос. техосмотра
	Эксплуатационные расходы	Масло
		Ремонт/обслуж.
	Амортизация	
8) Рабочие характеристики	Грузоподъемность	
	Количество посадочных мест	
	Полезный объем	
	Пробег без подзаправки	
	Коробка передач	
	Емкость бака	
	Трансмиссия	
9) Экологичность	Выброс CO2	Норма EVRO 3
		Норма EVRO 4
		Норма EVRO 5
		Без выбросов
	Электромагнитные волны	
	Утилизация аккумуляторов	
10) Модификация		

Таблица 3

Стоимость рассматриваемых автомобилей

	Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato Benz	Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano	Renault Master	Газель Бизнес
Стоимость (тыс. руб.)	1 300	1 265	900	1 668	1 221	1 031	1 350	1 077	1 035	514

Для каждого показателя первого уровня определяется вес a_k , сумма всех весов равна 1, т.е.

$$\sum_{k=1}^l a_k = 1 \tag{4}$$

Например, для восьмого показателя: «Рабочие характеристики» определены еще восемь показателей второго уровня:

Таблица 4

Показатели второго уровня

1.1. Грузоподъемность
1.2. Количество посадочных мест
1.3. Объем
1.4. Расход топлива
1.5. Объем бака

Для каждого показателя второго уровня также определяется вес b_{kj} , сумма всех весов равна 1, т.е.

$$\sum_{j=1}^m b_{kj} = 1 \tag{5}$$

Если для отдельных показателей второго уровня имеется также набор показателей третьего уровня, то для каждого показателя третьего уровня также определяется вес c_{kji} , сумма всех весов показателей третьего уровня равна 1, т.е.

$$\sum_{i=1}^n c_{kji} = 1 \tag{6}$$

Таблица 5

Данные о показателях комфорта автомобиле

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato	Mercedes-Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano 2.3 DT DPF 92kW M	Renault Master	Газель Бизнес
Комфорт посадки и размещения										
Регулировка руля	эл	эл	ручн	ручн	ручн	ручн	нет	ручн	ручн	ручн
Электрорегулировка сидений	-	+	-	-	+	-	-	-	-	-
Электрорегулировка стекол и их подогрев	-/+	+/+	+/-	+/+	+/+	+/-	+/+	+/-	+/+	-/-
Электрорегулировка зеркал и их подогрев	+/+	+/+	+/+	+/+	+/+	-/+	+/+	+/+	+/+	+/+
Комфорт езды										
Плавность хода	6,5	7	6	7	6,5	7	7	7,5	7,5	5
Уровень шума	8	7	9	7	7	6	7	7	8	4
Обзорность	9	8	9	8	8	9	7	8	7	7
Кондиционер	-	+	-	-	+	+	-	+	+	-
Комфорт управления										
Усилитель руля	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Автоматическая КПП	-	+	-	+	+	-	-	-	-	-
Круиз-контроль	+	+	-	-	+	+	+	+	+	-
АБС тормозов	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Бортовой компьютер	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-
Противобуксовочная система	+	+	-	+	+	-	+	+	+	-

Таблица 6

Приведенная балльная оценка комфорта

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Duc- ato	Mer- cedes- Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano 2.3 DT DPF 92kW M	Renault Master	Газель Бизнес
Общий балл комфортности	7,18	8,28	6,47	7,00	7,99	6,83	6,72	7,35	7,60	4,83
Комфорт посадки и размещения	6,50	8,00	5,75	6,50	7,25	5,00	5,75	5,75	6,50	5,00
Регулировка руля	8,00	8,00	5,00	5,00	5,00	5,00	2,00	5,00	5,00	5,00
Электрорегулировка сидений	5,00	8,00	5,00	5,00	8,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00
Электрорегулировка стекол и их подогрев	5,00	8,00	5,00	8,00	8,00	5,00	8,00	5,00	8,00	2,00
Электрорегулировка зеркал и их подогрев	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	5,00	8,00	8,00	8,00	8,00
Комфорт езды	6,38	7,50	6,50	6,00	7,38	7,50	5,75	7,63	7,63	4,50
Плавность хода	6,50	7,00	6,00	7,00	6,50	7,00	7,00	7,50	7,50	5,00
Уровень шума	8,00	7,00	9,00	7,00	7,00	6,00	7,00	7,00	8,00	4,00
Обзорность	9,00	8,00	9,00	8,00	8,00	9,00	7,00	8,00	7,00	7,00
Кондиционер	2,00	8,00	2,00	2,00	8,00	8,00	2,00	8,00	8,00	2,00
Комфорт управления	8,67	9,33	7,17	8,50	9,33	8,00	8,67	8,67	8,67	5,00
Усилитель руля	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	6,00
Автоматическая КПП	6,00	10,00	6,00	10,00	10,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Круиз-контроль	10,00	10,00	5,00	5,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	5,00
АБС тормозов	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	2,00
Бортовой компьютер	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	5,00
Противобуксовочная система	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	2,00	6,00	6,00	6,00	6,00

Таблица 7

Эксплуатационные расходы на 1 км*т. груза

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato	Mercedes-Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano 2.3 DT DPF 92kW M	Renault Master	Газель Бизнес
Стоимость	1 300 000	1 264 900	900 000	1 668 400	1 221 200	1 031 000	1 350 000	1 077 500	1 035 600	514 500
Нормативный пробег за срок службы автомобиля*	300000	300000	300000	300000	300000	300000	300000	300000	300000	300000
Стоимость/пробег	4,33р.	4,22р.	3,00р.	5,56р.	4,07р.	3,44р.	4,50р.	3,59р.	3,45р.	1,72р.
Вид топлива	95	ДТ	ДТ	ДТ	95	ДТ	ДТ	ДТ	ДТ	92
Стоимость литра топлива	28,15	25,84	25,84	25,84	28,15	25,84	25,84	25,84	25,84	26,26
Расход топлива на 100 км	7,4	9,7	7,8	12,1	7,9	9,5	10	9,8	12,8	11,5
Затраты на бензин на 1 км	2,08р.	2,51р.	2,02р.	3,13р.	2,22р.	2,45р.	2,58р.	2,53р.	3,31р.	3,02р.
Стоимость ТО (за 1-й год)	8790	8190	9100	11300	9700	9200	9300	8720	8500	6430
Нормативный срок службы автомобиля*	7	7	7	7	7	7	7	7	7	7
ТО на 1 км	0,22р.	0,20р.	0,23р.	0,28р.	0,24р.	0,23р.	0,23р.	0,22р.	0,21р.	0,16р.
Сумм ЭР на 1 км	6,64р.	6,93р.	5,24р.	8,97р.	6,54р.	6,12р.	7,32р.	6,34р.	6,97р.	4,90р.
ЭР на 1 км*т. груза	4,74р.	8,66р.	5,38р.	6,90р.	4,36р.	3,06р.	2,61р.	2,62р.	4,23р.	3,63р.

* Для упрощения расчетов нормативный пробег и срок службы у всех автомобилей был принят одинаковым.

Эксперты оценивают в баллах каждый показатель нижнего уровня для каждой модели автомобиля. Эксперты дают балльную оценку x_{kji} от 0 до 10. Чем лучше показатель, тем выше балл.

Оценка ПХ автомобиля на каждом уровне будет зависеть от весов показателей и присвоенных баллов. Например, оценка каждого показателя на втором уровне для t модели автомобиля будет определяться по формуле:

$$O_{tkj} = \sum_{i=1}^n (c_{kji} * x_{kji}) \tag{7}$$

Оценка каждого показателя на первом уровне для t модели автомобиля будет определяться по формуле:

$$O_{ik} = \sum_{j=1}^m b_{kj} (\sum_{i=1}^n (c_{kji} * x_{kji})) \tag{8}$$

Итоговая оценка потребительских характеристик для t модели автомобиля будет определяться по формуле:

$$ПХ_t = \sum_{k=1}^l a_k (\sum_{j=1}^m b_{kj} (\sum_{i=1}^n (c_{kji} * x_{kji}))) \tag{9}$$

Максимальное значение для автомобиля с наилучшими показателями будет равно 10, а наименьшее значение для автомобиля с наихудшими характеристиками будет равно 1.

Из-за ограниченности объема статьи упустим подробный процесс расстановки баллов. Пример расстановки баллов по группе «комфорт» представлен в табл. 4, 5. По группе показателей «Стоимость эксплуатации и обслуживания» в табл. 6, 7, 8.

Таблица 8

Стоимость эксплуатации и обслуживания

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato	Mercedes-Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano	Renault Master	Газель Бизнес
Стоимость эксплуатации и обслуживания										
Транспортный налог	3570	3850	3850	7800	4200	4200	5110	4375	4375	3745
Эксплуатационные расходы на перевозку 1 тонны груза на 1 км	4,74	8,66	5,38	6,90	4,36	3,06	2,61	2,62	4,23	3,63
ОСАГО	5069	3960	4200	3168	4752	3168	4205	3784	4752	4215

Таблица 9

Балльная оценка расходов на эксплуатацию и обслуживание

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato	Mercedes-Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano	Renault Master	Газель Бизнес
Итоговый балл	7,49	7,00	7,81	6,30	7,37	9,09	8,67	9,00	7,44	8,77
Транспортный налог	10,00	10,00	10,00	6,00	8,00	8,00	8,00	8,00	8,00	10,00
Эксплуатационные расходы на перевозку 1 тонны груза на 1 км	6,48	2,00	5,43	2,91	7,11	9,26	10,00	9,99	7,33	8,32
ОСАГО	6,00	9,00	8,00	10,00	7,00	10,00	8,00	9,00	7,00	8,00

Полученные балльные значения свойств автомобиля: комфорта, дизайна, безопасности, надежности, эффективности, стоимости эксплуатации, рабочих характеристик и экологичности сводим в табл. 10.

Таблица 10

Сводная таблица балльных характеристик

	Volkswagen Transporter T5	Ford Transit	Fiat Ducato	Mercedes-Benz Sprinter 316	Peugeot Boxer	Citroen Jumper	IVEKO Daily	Opel Movano	Renault Master	Газель Бизнес
Комфорт	7,18	8,28	6,47	7,00	7,99	6,83	6,72	7,35	7,60	4,83
Дизайн	7,50	8,25	7,50	9,50	8,75	9,00	8,00	8,50	8,25	5,00
Безопасность	8,29	7,83	6,42	8,50	6,67	7,33	5,67	7,50	6,42	5,83
Надежность	7,43	8,66	7,59	8,51	6,67	8,70	6,50	6,56	6,16	4,50
Эффективность	8,38	8,80	8,46	9,46	8,66	8,06	7,43	7,77	8,94	5,49
Стоимость эксплуатации	7,49	7,00	7,81	6,30	7,37	9,09	8,67	9,00	7,44	8,77
Рабочие характеристики	6,67	6,01	6,94	6,48	8,43	8,70	9,04	8,40	7,39	6,44
Экологичность	9,33	8,33	8,33	8,33	8,33	6,67	8,00	9,33	8,33	7,33

В результате проделанной работы были вычислены общие баллы по всем потребительским характеристикам. Баллы и цены на автомобили сводим в табл. 11.

Таблица 11

Общие ПХ автомобилей и их цены

№	Наименование	Общ. оценка потребительских качеств	Цена
1	Volkswagen Transporter T5	7,79	1300000
2	Ford Transit	7,90	1264900
3	Fiat Ducato	7,44	900000
4	Mercedes-Benz Sprinter	8,01	1668400
5	Peugeot Boxer	7,86	1221200
6	Citroen Jumper	8,05	1031000
7	Iveko Daily	7,50	1350000
8	Opel Movano	8,05	1077500
9	Renault Master	7,57	1035600
10	Газель Бизнес	6,02	514500

Находим средний балл по общим потребительским характеристикам и среднюю цену автомобиля: средний балл равен 7,62; средняя цена автомобиля – 1136310.

Это означает, что в среднем для автомобиля с общей ПХ = 7,62 оптимальной рыночной ценой будет 1136310.

На основе этих данных, зная общие баллы потребительских характеристик автомобилей, можно вычислить оптимальную цену для каждого рассматриваемого автомобиля (рис. 12).

Таблица 12

Соотношение реальных цен на автомобили и оценки их стоимости с точки зрения потребителя

№	Наименование	Общ. оценка потребительских качеств	Реальная стоимость	Оптимальная цена
1	Volkswagen Transporter T5	7,79	1300000	1161233
2	Ford Transit	7,90	1264900	1177783
3	Fiat Ducato	7,44	900000	1109587
4	Mercedes-Benz Sprinter	8,01	1668400	1194756
5	Peugeot Boxer	7,86	1221200	1172243
6	Citroen Jumper	8,05	1031000	1200221
7	Iveko Daily	7,50	1350000	1119150
8	Opel Movano	8,05	1077500	1200937
9	Renault Master	7,57	1035600	1128540
10	Газель Бизнес	6,02	514500	898649

В результате мы можем видеть, что цена на рассматриваемые автомобили с рассмотренными комплектациями:

Volkswagen Transporter - завышена на 139 тыс. руб., или на 11% от его реальной стоимости;

Fiat Ducato - завышена на 87 тыс. руб., или на 7% от его реальной стоимости;

Volkswagen Transporter - занижена на 210 тыс. руб., или на 23% от его реальной стоимости;

Mercedes-Benz Sprinter - завышена на 474 тыс. руб., или на 28% от его реальной стоимости;

Peugeot Boxer - завышена на 49 тыс. руб., или на 4% от его реальной стоимости;

Citroen Jumper - занижена на 169 тыс. руб., или на 16% от его реальной стоимости;

Iveko Daily - завышена на 231 тыс. руб., или на 17% от его реальной стоимости;

Opel Movano - занижена на 123 тыс. руб., или на 11% от его реальной стоимости;

Renault Master - занижена на 93 тыс. руб., или на 9% от его реальной стоимости;

Газель Бизнес - занижена на 384 тыс. руб., или на 75% от его реальной стоимости.

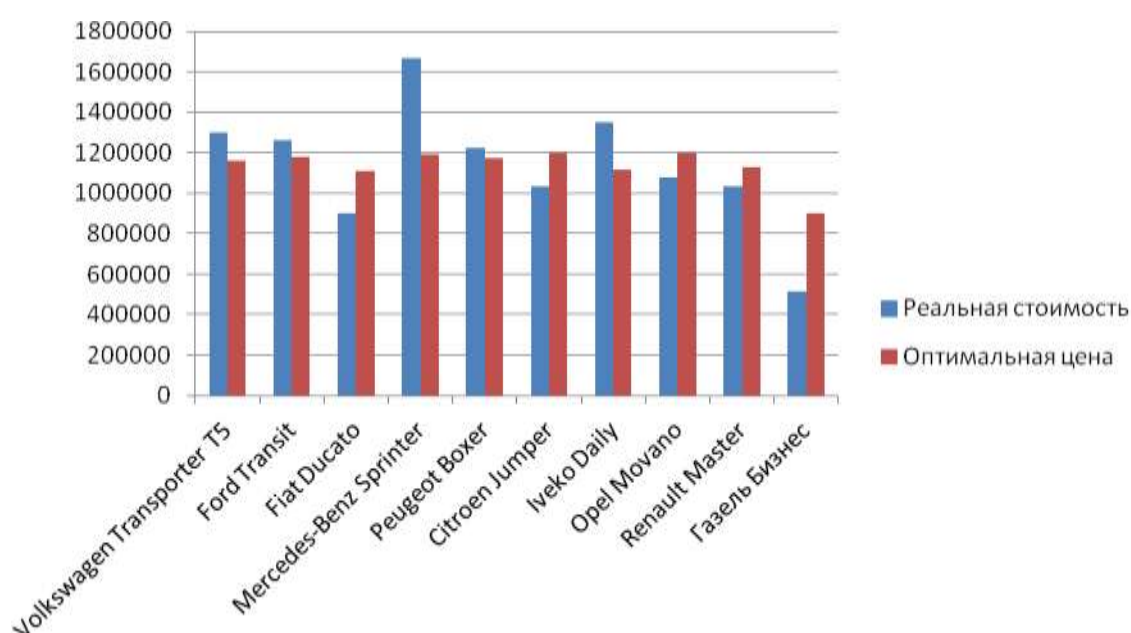


Рис. 1. Соотношение реальных цен на автомобили и оценки их стоимости с точки зрения потребителя

Полученный набор соотношений цен и потребительских характеристик автомобилей имеет ряд спорных моментов и может вызвать сомнения. Например, полученные расчеты показали, что Газель Бизнес имеет заниженную цену на 75% по сравнению с заграничными аналогами.

Указанные ранее соотношения цен и потребительских характеристик автомобилей получены при условии, что в расчетах задано равенство весов всех потребительских свойств автомобиля. Более корректно было бы вывести линейную зависимость между ценой и каждой из потребительских характеристик автомобиля. Тогда расстановка весов была бы более обоснована, а методика привела бы к более точным результатам. Также видно, что расхождение между оптимальной ценой и реальной ценой у зарубежных аналогов незначительное (кроме, Mercedes-Benz Sprinter), т.е. можно сделать вывод о необходимости подкорректировать значение веса у ряда качественных показателей, таких как комфорт, надежность, имидж, дизайн.

Библиографический список

- 1 Оценка машин и оборудования / А.П. Ковалев [и др.]. – М.: Финансы и статистика, 2005. – 272 с.
- 2 **Кудрявцев, С.М.** Оценка свойств легкового автомобиля: учеб. пособие / С.М. Кудрявцев. – Нижегород. гос. техн. ун-т. Н. Новгород, 2005. – 137 с.
- 3 **Корнилов, Д.А.** Методика оценки потребительских характеристик товара (на примере автомобилей) // Актуальные аспекты экономики, менеджмента и образования: сборник материалов Российской научно-практической конференции. – Н. Новгород, 2011. С. 10–22.

*Дата поступления
в редакцию 19.10.2011*

D.A. Kornilov

COMPETITIVENESS OF PRODUCTION AS FUNCTION OF CONFORMITY OF CONSUMER CHARACTERISTICS OF THE GOODS OF ITS COST

In the article are considered questions of an estimation of competitiveness of production, an estimation of consumer characteristics of Light Commercial Vehicle (LCV), conformity of the price of cars to their consumer characteristics. The analysis of consumer characteristics and the price of Light Commercial Vehicle (LCV) are made.

Key words: Competitiveness, cost, the price, consumer characteristics, Light Commercial Vehicle.

УДК 336

Ф.Ф. Юрлов, Н. А. Плеханов

**ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИНИМАЕМЫХ РЕШЕНИЙ
В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ И МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В существующей экономической литературе проблема выбора эффективных решений в условиях неопределенности внешней среды и проблема оценки их эффективности по совокупности критериев, как правило, рассматриваются раздельно. В настоящей статье предлагается методика оценки эффективности принимаемых решений при наличии неопределенности внешней среды и при использовании совокупности критериев эффективности экономических инновационных систем.

Ключевые слова: выбор эффективных решений, оценка эффективности, неопределенность, многокритериальность, инновации.

В реальных ситуациях проблемы оценки эффективности анализируемых систем в условиях многокритериальности и неопределенности приходится решать совместно. Это существенно затрудняет определение наиболее предпочтительных стратегических решений. Возникает необходимость разработки теоретических и практических аспектов совместного решения указанных проблем. Данному вопросу посвящена настоящая статья.

Неопределенность внешней среды характеризуется набором неуправляемых факторов для лиц, принимающих стратегические решения. В качестве указанных могут выступать природные, рыночные, международные, инфляционные и другие факторы. Критерии эффективности систем могут представлять экономические, социальные, экологические и иные критерии.

При определении эффективности принимаемых инновационных решений с учетом неопределенности внешней среды возникают следующие типы противоречий:

- обусловленные применением различных принципов эффективности, учитывающие факторы внешней среды, которые являются неуправляемыми;
- возникающие при использовании набора экономических показателей;
- возникающие при применении нескольких инновационных показателей;
- между экономическими и инновационными показателями.

В качестве принципов выбора эффективных решений находят применение принципы: оптимизма, пессимизма, гарантированного результата и др. Анализ рассматриваемой проблемы показывает, что в общем случае использование указанных принципов приводит к различным выводам относительно эффективности принимаемых решений. Возникает необходимость согласования решений, полученных при реализации каждого принципа.

В качестве экономических показателей, которые могут быть применены при оценке эффективности инновационных решений, могут выступать: выручка, прибыль, рентабельность продаж и др. Можно показать, что в общем случае эти показатели являются противоречивыми, т.е. улучшение какого-либо показателя приводит к ухудшению других. Поэтому выбор эффективных решений в данных ситуациях затрудняется.

Как показывает анализ проблемы оценки эффективности инноваций в экономических системах, во многих случаях имеют место противоречия между экономическими и инновационными показателями.

Таким образом, при оценке эффективности инноваций в экономических системах необходимо учитывать указанные виды противоречий. С этой целью потребуются разработка новых подходов к выбору эффективных инновационных решений с учетом факторов неопределенности и многокритериальности. В настоящей работе приводятся основные этапы ме-

тодики определения эффективности систем различного назначения при наличии неуправляемых факторов и при применении совокупности противоречивых критериев.

Сущность методики заключается в следующем.

1. Определяются цели принимаемого инновационного решения:

$$Ц = \{Ц_i\}, i = 1, n.$$

В качестве целей анализа могут выступать: инновационные, экономические, социальные, технологические, экологические и иные цели. В соответствии с системным многоуровневым подходом указанные цели необходимо формулировать на разных уровнях управления социально-экономическими процессами. Уровни анализа могут представлять: федеральный, региональный, областной, городской и другие, включая отрасли промышленности и предприятия. В общем случае указанные цели имеют противоречивый характер. Поэтому потребуется согласование этих целей, например, согласование экономических целей, имеющих коммерческий характер, и инновационных целей развития систем различного назначения.

Определяются средства достижения целей:

$$X = \{x_i\}, i = 1, n.$$

Средства достижения целей представляют собой управляемые факторы. В качестве этих факторов могут выступать: прогрессивные технологии, патенты на изобретения, финансовые ресурсы, методы управления, организационные факторы, трудовые ресурсы и т.п. При использовании многоуровневого подхода средства достижения целей следует определять на каждом из указанных ранее уровней анализа.

3. Формируется набор неуправляемых факторов, характеризующих состояние внешней среды.

$$Y = \{y_j\}, j = 1, m.$$

Неуправляемые факторы могут представлять: природные условия, рыночные факторы, инфляционные процессы, внешнеэкономические факторы и т.п. Характерной особенностью этих факторов является то, что они не описываются вероятностными закономерностями. Это означает, что вероятностные характеристики внешней среды являются неизвестными. Известны только возможные наборы неуправляемых факторов.

4. Формируется набор критериев (показателей) эффективности принимаемых решений:

$$K = \{k_z\}, z = 1, N.$$

В качестве критериев эффективности принимаемых решений могут выступать: финансовые, инновационные, технологические, экономические и иные критерии. В общем случае указанные критерии (показатели) являются противоречивыми. При этом улучшение какого-либо показателя может привести к ухудшению других показателей. Например, улучшение экономических показателей во многих случаях приводит к ухудшению социальных.

5. Устанавливаются зависимости показателей эффективности от управляемых и неуправляемых факторов:

$$K = K(x, y).$$

Подобные зависимости формируются на каждом уровне анализа.

6. Формируются матрицы эффективности анализируемых систем для каждого из критериев эффективности:

$$/ K(x, y) /.$$

Данная матрица представляет собой таблицу, в клетках которой проставляются значения показателей эффективности как функции управляемых и неуправляемых факторов.

7. Определяются принципы эффективности анализируемых систем:

$$G(x, y).$$

В качестве указанных принципов выступают: принцип оптимизма, принцип песси-

мизма, принцип гарантированного результата, принцип Сэвиджа, принцип гарантированных потерь и др.

8. При выбранном критерии эффективности $K(x,y)$ 1 и выбранном принципе эффективности $G(x,y)$ 1 определяется наиболее предпочтительное решение (x_1,y_1) .

9. При данном критерии эффективности определяется эффективное решение при использовании второго принципа $G(x,y)$ 2. Это решение обозначается через (x_2,y_2) .

10. Подобным образом определяются эффективные решения для всех принципов эффективности до последнего принципа с номером n . Эффективное решение, получаемое для принципа с номером n , обозначим через (x_n,y_n) .

11. Выбирается второй критерий эффективности $K(x_2,y_2)$.

12. С помощью данного критерия выбираются эффективные решения с использованием каждого из принципов эффективности. Процедура оценки эффективности альтернатив аналогична описанной ранее.

13. Проверяется согласованность решений, получаемых при выбранном критерии эффективности при каждом принципе эффективности.

14. В ситуациях, когда принимаемые решения не совпадают, осуществляется поиск компромиссных решений.

15. Проверяется согласованность решений, которые получаются при применении каждого критерия.

16. При наличии противоречивых решений осуществляется поиск тех или иных схем компромисса.

Пример. Предположим, что осуществляется оценка эффективности нескольких инновационных проектов и выбор наиболее предпочтительного решения. Набор проектов обозначим через:

$$П = \{ П_i \}, i = 1, n.$$

В качестве неуправляемых факторов выступают рыночные цены:

$$P = \{ P_j \}, j = 1, n.$$

Критерии эффективности представляют чистая текущая стоимость ЧТС и индекс доходности ИД.

В качестве принципов эффективности выступают: принцип оптимизма $G_{опт}$ и принцип гарантированного результата G_g .

Зависимости показателей эффективности от управляемых и неуправляемых факторов определяются в виде:

$$ЧТС = ЧТС(П, P), \quad ИД = ИД(П, P).$$

Матрицы эффективности имеют вид:

$$/ ЧТС = ЧТС(П,P) / , \quad / ИД = ИД(П,P) / .$$

Матрица чистой текущей стоимости представлена в виде табл. 1.

Таблица 1
Матрица чистой текущей стоимости

П \ P	P1	P2		Pn
П1	Чтс11	Чтс12		Чтс1n
П2	Чтс21	Чтс22		Чтс2n
Пn	Чтс n1	Чтс n2		Чтс nn

Матрица индекса доходности представлена в виде табл. 2.

Таблица 2
Матрица индекса доходности

Р \ П	Р1	Р2		pn
П1	ИД11	ИД12		ИД1n
П2	ИД21	ИД22		ИД2n
Пn	ИД n1	ИДn2		ИДnn

Предположим, что матрица чистой текущей стоимости имеет вид:

Таблица 3
Пример матрицы чистой текущей стоимости

Р \ П	Р1	Р2	Р3	Max ЧТ ЧТС	Min ЧТ ЧТС
П1	5	4	12	12	4
П2	10	8	4	10	4
П3	2	15	20	20	2
П4	17	9	7	17	7

Матрица индекса доходности имеет вид:

Таблица 4
Пример матрицы индекса доходности

Р \ П	Р1	Р2	Р3	Max ИДИД	MinИД
П1	1	2	2,5	2,5	1
П2	3	1,5	2	3	1,5
П3	3,5	2	1,5	3,5	1,5
П4	4	2	1	4	1

Применим принцип оптимизма при анализе матрицы чистой текущей стоимости. Принцип оптимизма запишем в виде:

$$\text{ЧТС опт} = \max_P \max_p \text{ЧТС} (P, p).$$

Из таблицы следует, что $\max_P \max_p \text{ЧТС} (P, p) = 20$. При этом оптимальной стратегией является стратегия с номером 3, т.е. П3.

Применим принцип гарантированного результата при использовании критерия чистой текущей стоимости. Формула для определения данного принципа запишем в виде:

$$\text{ЧТС г} = \max_P \min_p \text{ЧТС} (P, p).$$

Из матрицы чистой текущей стоимости следует, что $\text{ЧТС г} = 7$ ед. Оптимальной стратегией является стратегия с номером 4, т.е. П4.

Таким образом, применение принципов оптимизма и гарантированного результата приводит к разным оптимальным решениям. Следовательно, требуется согласование полученных решений при использовании критерия чистой текущей стоимости.

Рассмотрим возможность применения критерия индекса доходности. С этой целью применим данные табл.2.

В соответствии с данной таблицей оптимистическое значение индекса доходности равно 4 ед, т.е. ИД опт = 4 ед. При этом оптимальная стратегия Попт. = П4. Гарантированное значение индекса доходности равно 1., т.е. ИД г = 1. Оптимальными являются стратегии с номерами П1 и П4.

В данном случае, как и в предыдущем, применение принципов оптимизма и гарантированного результата приводит к разным выводам относительно эффективности принимаемых решений. Поэтому возникает необходимость согласования полученных результатов. С этой целью потребуются поиск тех или иных схем компромисса, обусловленного противоречиями между принципами оптимизма и гарантированного результата.

Рассмотрим вопрос совместимости решений, которые получаются при использовании каждого принципа и критериев эффективности: чистой текущей стоимости и индекса доходности.

При использовании принципа оптимизма и критерия чистой текущей стоимости эффективным решением является П4. Применение критерия индекса доходности позволяет получить эффективное решение П3. Следовательно, применение указанных критериев при использовании принципа оптимизма приводит к разным эффективным решениям.

В случае применения принципа гарантированного результата при использовании критерия чистой текущей стоимости оптимальным является решение П4. Применение критерия индекса доходности при этом приводит к оптимальному решению П2 и П3.

Как уже отмечалось, при оценке эффективности инновационных решений с учетом неуправляемых факторов с использованием набора критериев эффективности анализируемых систем возникает необходимость согласования принимаемых решений. С этой целью потребуются определение тех или иных схем компромисса. В качестве средств согласования противоречивых решений могут выступать: законодательные и нормативные акты, организационные решения, финансовые ресурсы, методы оптимизации и т.п.

Выводы

1. В существующей экономической литературе при оценке эффективности принимаемых решений в условиях неопределенности внешней среды обычно рассматриваются вероятностные модели и модели, учитывающие набор неуправляемых факторов. Применение вероятностных моделей во многих случаях затруднено из-за недостатка или отсутствия информации о законах распределения случайных факторов, оказывающих влияние на эффективность анализируемых систем. Поэтому применение моделей, включающих неуправляемые

факторы, является необходимым и целесообразным.

2. Следующей проблемой, которая возникает при выборе эффективных решений, является проблема определения эффективности рассматриваемых систем по совокупности противоречивых показателей. С этой целью может быть использован многокритериальный подход.

3. В общем случае рассматриваемые проблемы многокритериальности и неопределенности приходится решать совместно. Это значительно усложняет процесс принятия наиболее предпочтительных решений. Требуется развитие теории и практики оценки эффективности систем различного назначения с использованием набора экономических, социальных, инновационных и иных показателей.

-
1. Методы и модели в экономике: учебник / Ф. Ф. Юрлов [и др.]; Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2010. – 243 с.

*Дата поступления
в редакцию 19.10.2011*

F.F. Yurlov, N.A. Plekhanov

PERFORMANCE EVALUATION OF DECISIONS IN TERMS OF UNCERTAINTY AND MULTICRITERIA

In the existing economic literature, the problem of choosing effective decisions in an uncertain external environment and the problem of evaluating their performance on set criteria are generally considered separately. In this article we propose a method of estimating the efficiency of decision making in the presence of uncertainty of the environment and the use of set performance measures of economic innovation systems.

Key words: choice of effective solutions, performance evaluation, uncertainty, multicriteria, innovation,

УДК 336.5

А.Г. Чернов

**МОНИТОРИНГ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ НАЦИОНАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ
УНИВЕРСИТЕТОВ ПРИВОЛЖСКОГО ФЕДЕРАЛЬНОГО ОКРУГА**Аппарат полномочного представителя Президента Российской Федерации
в Приволжском федеральном округе

В статье рассматривается новый класс высших учебных заведений – национальные исследовательские университеты. Рассмотрены условия и законодательные акты, на основании которых вузы получают статус национального исследовательского университета, а также критерии оценки эффективности их деятельности. Автором сделан вывод о целесообразности дальнейшего развития системы национальных исследовательских университетов в двух направлениях – организация взаимодействия указанных вузов между собой при выполнении совместных научных программ, а также более активное привлечение национальных исследовательских университетов к разработке программ и стратегий развития территорий.

Ключевые слова: национальный исследовательский университет, приоритетные направления развития, Приволжский федеральный округ, развитие территорий, федеральный бюджет.

Система взаимодействия вузов, научно-исследовательских институтов и предприятий, сформированная во времена Советского Союза, в настоящее время достаточно сильно устарела. Основными направлениями взаимодействия было обеспечение предприятий новыми разработками и квалифицированными кадрами, в первую очередь промышленно-производственным персоналом.

Традиционно предприятия наряду с использованием квалифицированных кадров, подготавливаемых системой высшего профессионального образования, сами вели подготовку необходимых кадров. В течение 1990–1998 гг. объемы промышленного производства в России сократились более чем в два раза. Основной целью предприятий стало финансовое выживание, что привело не только к резкому сокращению численности промышленно-производственного персонала, но и к фактической ликвидации системы подготовки кадров на предприятиях. Начавшийся позднее экономический подъем не решил проблему кадровой обеспеченности на предприятиях – отток кадров не прекратился, хотя и наблюдалось некоторое снижение его темпов.

Еще более неблагоприятна ситуация с обеспечением предприятий новыми технологиями и разработками – всем тем, что в настоящее время принято называть «инновациями». При этом следует понимать, что, учитывая существенно возросший уровень международной конкуренции, вопрос повышения конкурентоспособности отечественных предприятий за счет внедрения новых технологий является в настоящее время одним из ключевых в сфере решения проблемы сохранения и развития промышленности России.

В условиях усиливающейся роли инноваций в социально-экономическом развитии и снижающегося влияния многих традиционных факторов роста, прежде всего сырьевых, в ближайшее десятилетие регионы России должны перейти к формированию новой инновационно ориентированной модели экономики, основанной на расширении выпуска инновационной промышленной продукции, обладающей лучшими потребительскими свойствами и способной успешно соперничать на внутреннем и внешнем рынках с зарубежными аналогами.

Инновационная система включает в себя не только инновационные проекты и реализующий их впоследствии инновационный бизнес, но и исследовательский сектор, сферу образования. Её основная задача – обеспечить эффективное прохождение всего инновационного цикла.

Для решения проблем внедрения в промышленное производство инновационных продуктов необходимо создание эффективной инновационной инфраструктуры, которая обеспе-

чивает продвижение передовых знаний к рынку и привлекает инвестиции в самые прорывные проекты. Национальные исследовательские университеты – это и есть новая институциональная форма организации научной и образовательной деятельности.

По своей концепции, национальный исследовательский университет - высшее учебное заведение, призванное одинаково эффективно осуществлять образовательную и научную деятельность на основе принципов интеграции науки и образования. Их важнейшими отличительными признаками должны являться способность как генерировать знания, так и обеспечивать эффективный трансфер технологий в экономику; проведение широкого спектра фундаментальных и прикладных исследований; наличие высокоэффективной системы подготовки магистров и кадров высшей квалификации, развитой системы программ переподготовки и повышения квалификации. Практически национальный исследовательский университет должен являться интегрированным научно-образовательным центром или включать ряд таких центров в виде совокупности структурных подразделений, осуществляющих проведение исследований по общему научному направлению и подготовку кадров для определенных высокотехнологичных секторов экономики.

Основной задачей государственной поддержки института национальных исследовательских университетов является вывод на мировой уровень образовательных организаций, способных взять на себя ответственность за сохранение и развитие кадрового потенциала науки, высоких технологий и профессионального образования, развитие и коммерциализацию в Российской Федерации высоких технологий.

Стратегической миссией национального исследовательского университета является содействие динамичному развитию научно-технологического комплекса страны и обеспечение его необходимыми людскими ресурсами, сбалансированными по численности, направлениям подготовки, по квалификационной и возрастной структуре с учетом необходимых темпов их обновления и прогнозируемых структурных преобразований в науке и экономике.

Категория «национальный исследовательский университет» присваивается высшему учебному заведению сроком на 10 лет. Оценка эффективности реализации программ развития НИУ проводится Министерством образования и науки Российской Федерации один раз в год на основании докладов о ходе реализации их программ развития, представляемых в Министерство образования и науки Российской Федерации до 1 марта года, следующего за отчетным.

Перечень показателей оценки эффективности реализации программ национальных исследовательских университетов и порядок представления ими отчетности о своей деятельности утвержден Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации от 29 июля 2009 г. № 276 «О перечне показателей, критериях и периодичности оценки эффективности реализации программ развития университетов, в отношении которых установлена категория «национальный исследовательский университет».

Все показатели разделены на категории «А» и «Б». При этом в отчетном году должны быть достигнуты все показатели категории «А» и не менее половины показателей категории «Б». Реализация программ развития национальных исследовательских университетов признается эффективной при условии достижения в отчетном году не менее 80% показателей оценки эффективности реализации их программ развития, утвержденных правительством Российской Федерации (табл. 1).

Финансирование программ развития национальных исследовательских университетов из федерального бюджета предусматривается в течение пяти лет их реализации и может осуществляться в виде дополнительных ассигнований на обеспечение выполнения функций бюджетных учреждений, субсидий автономным учреждениям или предусматриваться при реализации федеральных целевых программ при условии обеспечения национальным исследовательским университетом ежегодного внебюджетного софинансирования программы развития в размере не менее 20% размера ассигнований федерального бюджета, выделенных на эти цели. Одним из важнейших условий успешной реализации программы развития является обоснованный механизм устойчивого функционирования национального исследовательского университета после окончания бюджетного финансирования, поскольку повышенные требования к университе-

ту будут сохраняться и в последующий период. В этом смысле функция государства состоит в создании инфраструктурных предпосылок дальнейшего саморазвития университета.

Таблица 1

Перечень показателей оценки эффективности реализации программ развития национальных исследовательских университетов

КАТЕГОРИЯ А	КАТЕГОРИЯ Б
<i>Показатели успешности образовательной деятельности</i>	
Доля обучающихся в НИУ по приоритетным направлениям развития (далее - ПНР) в общем числе обучающихся	Доля профильных обучающихся НИУ, трудоустроенных по окончании обучения по специальности
	Количество человек, принятых в аспирантуру и докторантуру из сторонних организаций по ПНР НИУ, в расчете на одного научно-педагогического работника (далее - ННР)
	Количество молодых ученых из сторонних организаций, прошедших переподготовку или повышение квалификации по ПНР НИУ в расчете на одного ННР
<i>Показатели результативности научно-инновационной деятельности</i>	
Количество статей по ПНР НИУ в научной периодике, индексируемой иностранными и российскими организациями (Web of Science, Scopus, Российский индекс цитирования), в расчете на одного ННР	Отношение доходов от реализованной НИУ и организациями его инновационной инфраструктуры научно-технической продукции по ПНР НИУ к расходам федерального бюджета на НИОКР, выполненные НИУ
Доля доходов от НИОКР из всех источников по ПНР НИУ в общих доходах НИУ	Количество поставленных на бухгалтерский учет объектов интеллектуальной собственности по ПНР НИУ
	Доля опытно-конструкторских работ по ПНР НИУ в общем объеме НИОКР НИУ
	Количество научных лабораторий по ПНР НИУ, оснащенных высокотехнологичным оборудованием
<i>Показатели развития кадрового потенциала</i>	
Доля ННР и инженерно-технического персонала в возрасте от 30 до 49 лет	Доля ННР, имеющих ученую степень доктора или кандидата наук
Эффективность работы аспирантуры и докторантуры по ПНР НИУ	Доля аспирантов и ННР, имеющих опыт работы (прошедших стажировки) в ведущих мировых научных и университетских центрах
<i>Показатели международного признания</i>	
Доля иностранных обучающихся (без учета стран СНГ) по ПНР НИУ	Доля обучающихся из стран СНГ по ПНР НИУ
	Объем НИОКР по ПНР НИУ в рамках международных научных программ в расчете на одного ННР
<i>Показатели финансовой устойчивости</i>	
Финансовое обеспечение программы развития из внебюджетных источников начиная с 2010 года	Финансовое обеспечение программы развития из внебюджетных источников начиная в 2009 году
	Доходы НИУ из всех источников от образовательной и научной деятельности в расчете на одного ННР
	Доля внебюджетного финансирования в доходах НИУ от образовательной и научной деятельности
	Отношение заработной платы 10 процентов самых высокооплачиваемых работников НИУ к заработной плате 10 процентов самых низкооплачиваемых работников

Началом процесса создания сети национальных исследовательских университетов явилось вступление в силу Указа Президента Российской Федерации от 07.10.2008 N 1448 "О реализации пилотного проекта по созданию национальных исследовательских университетов", в соответствии с которым статус национальных исследовательских университетов был присвоен первым двум вузам: Московскому инженерно-физическому институту, на базе которого был сформирован Национальный исследовательский ядерный университет, и Московскому институту стали и сплавов, на базе которого был создан Национальный исследовательский технологический университет.

7 октября 2009 завершился первый конкурс по отбору программ развития университетов, в отношении которых была установлена категория "национальный исследовательский университет". По итогам обсуждения путём тайного голосования были выбраны 12 вузов-победителей, получившие указанную категорию и средства из федерального бюджета на финансирование своих программ развития на 2009–2018 годы в объёме до 1,8 млрд руб. каждый.

В число победителей первого конкурса были включены четыре вуза Приволжского федерального округа - Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева, Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Пермский государственный технический университет и Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва.

По итогам второго аналогичного конкурса 4 из 15 вузов-победителей также являются представителями Приволжского федерального округа. Это Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, Казанский государственный технологический университет, Пермский государственный университет и Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского.

Таким образом, из 29 существующих сегодня в России национальных исследовательских университета почти треть расположены в регионах Приволжского федерального округа. Вложения средств федерального бюджета в эти 8 университетов составляет 13,5 млрд руб.

Информация об основных направлениях деятельности национальных исследовательских университетов Приволжского федерального округа, а также параметрах финансирования их программ развития приведена в табл. 2.

Таблица 2

Информация об основных направлениях деятельности национальных исследовательских университетов Приволжского федерального округа

№	Наименование вуза	Объем финансирования, млрд руб.	Направления деятельности
1	2	3	4
1	Мордовский государственный университет им. Н.П.Огарева	1,5	- энергосбережение и новые материалы; - фундаментальные и прикладные исследования в области финно-угроведения
2	Казанский государственный технологический университет	1,5	- химия и технология полимерных и композиционных материалов; - химия и технология энергонасыщенных материалов; - комплексное освоение ресурсов углеводородного сырья; - нанотехнологии, наноматериалы; - энергоресурсосберегающие технологии перспективных материалов

Окончание табл. 2

1	2	3	4
3	Казанский государственный технический университет им. А.Н. Туполева	1,8	- аэродинамика, проектирование и прочность изделий наукоемкого машиностроения и сооружений; - новые технологии и материалы в наукоемком машиностроении; - проблемы управления и информационных технологий в наукоемком машиностроении; - радиоэлектронные, инфокоммуникационные системы и комплексы в авиации, транспорте и наукоемком машиностроении
4	Нижегородский государственный университет им.Н.И. Лобачевского	1,8	- информационно-телекоммуникационные системы: физические и химические основы, перспективные материалы и технологии, математическое обеспечение и применение; - информационно-телекоммуникационные системы; - космические и авиационные технологии; - индустрия наносистем и материалы; - живые системы; - рациональное природопользование; - энергетика и энергосбережение; - безопасность и противодействие терроризму
5	Пермский государственный университет	1,5	- технологии изучения, освоения, прогнозирования и управления георесурсами и геосистемам; - моделирование и управление физическими и химическими процессами, развитие технологий; - наукоемкие технологии управления живыми системами; - прогнозирование и управление процессами социально-экономического развития стран и территорий на основе современных информационных технологий
6	Пермский государственный технический университет	1,8	- авиационное двигателестроение и газотурбинные технологии; - добыча и переработка нефти, газа и полезных ископаемых; - наноиндустрия; - урбанистика
7	Самарский государственный аэрокосмический университет им. академика С.П. Королёва	1,8	- авиационно-космическая наука, технологии и техника, компьютерное моделирование
8	Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского	1,8	- математика и информационные технологии; - фундаментальные и прикладные исследования в сфере высоких технологий; - живые системы; - риски социальных систем

Учитывая значительные объемы бюджетных средств, направляемых в данные университеты, а также высокую важность целей, на которые направляются данные средства, необходима организация жесткого контроля за их использованием.

При этом при проведении анализа результатов расходования данных средств следует сконцентрироваться не на формальном установлении факта их освоения, как это иногда бывает при реализации подобных проектов. Необходимо оценивать качественные результаты по тем направлениям, в которых работают национальные исследовательские университеты, и при проведении последующих конкурсных отборов университетов для присвоения данной

категории анализировать необходимость и целесообразность усиления одних направлений, и, возможно, ликвидации менее приоритетных, отдавая предпочтение, в первую очередь, тем проектам, возможность коммерциализации, а также экономический эффект от реализации которых являются наибольшими.

Национальные исследовательские университеты фактически получают государственные средства на собственное усиление и развитие. Это очень важная на сегодняшний день задача – усиление позиций России в мировом научном сообществе. При этом следует отметить, что приоритетные направления развития национальных исследовательских университетов, определенные в программах их развития, во многом коррелируют с основными направлениями развития округа, зафиксированными в Стратегии социально-экономического развития Приволжского федерального округа до 2020 года. Это определяет возможность использования их потенциала и наработок в данных направлениях при разработке механизмов реализации стратегии округа, а также программных документов, определяющих перспективное развитие входящих в него территорий.

Одновременно представляется целесообразной организация взаимодействия и обмена опытом между национальными исследовательскими университетами, работающими по аналогичным направлениям, а также совместная реализация несколькими национальными исследовательскими университетами масштабных научных программ и экспериментов.

Библиографический список

1. Указ Президента России от 7 октября 2008 г. №1448 "О реализации пилотного проекта по созданию национальных исследовательских университетов". URL: <http://www.kremlin.ru>
2. Постановление Правительства России от 13 июля 2009 г. N 550 "О конкурсном отборе программ развития университетов, в отношении которых устанавливается категория "национальный исследовательский университет"" (с изменениями и дополнениями). URL: <http://govportal.garant.ru>
3. Приказ Минобрнауки России от 29 июля 2009 г. N 276 "О перечне показателей, критериях и периодичности оценки эффективности реализации программ развития университетов, в отношении которых установлена категория "национальный исследовательский университет"". URL: <http://mon.gov.ru/files/materials/5561/276.pdf>
4. Национальные исследовательские университеты [Электронный ресурс]: Министерство образования и науки Российской Федерации. URL: <http://mon.gov.ru/pro/niu/>

*Дата поступления
в редакцию 10.10.2011*

A.G. Chernov

MONITOR THE ACTIVITIES OF NATIONAL RESEARCH UNIVERSITIES OF THE VOLGA FEDERAL DISTRICT

The article discusses a new group of higher institutions - National Research Universities. They receive their status and efficiency estimation criteria of their activity due to the specific condition and legislative acts that are considered in the article. The Author concludes that the further development of National Research Universities can be in two direction – the organization of interaction between the specified high schools in carrying out of joint research programs as well as greater involvement of National Research Universities to development of programs and strategies of regional development.

Key words: National Research University, priority directions of development, the Volga Federal District, regional development the Federal budget.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 316.001

О.Н. Багаева

«ФИЛОСОФСКАЯ ВЕРА» КАРЛА ЯСПЕРСА КАК ИСТОЧНИК ЭКЗИСТЕНЦИАЛЬНОЙ КОММУНИКАЦИИ И ВОЗМОЖНОСТЬ ОБЪЕДИНЕНИЯ ЛЮДЕЙ

Нижегородский государственный лингвистический университет им. Н.А. Добролюбова

С понятием «коммуникация» люди имеют дело достаточно часто. Это слово употребляется и в быденной речи, и на страницах художественных произведений, и в научно-публицистическом обиходе. Само понятие имеет широкий смысл, обозначая все формы непосредственных контактов между индивидами. С того момента как в русском языке появилось иностранное слово «коммуникация» (от латинского *communicatio* – связь), этот термин стал использоваться как синоним «общения», большей частью в научной сфере. Однако в последнее время в результате все возрастающего внимания к области как и интерличностных отношений, так и к полю взаимодействия больших общественных групп обнаруживаются различия между определенными видами связи людей. В наши дни понимание общения как отношения человека к человеку как к полноценной, духовно-наполненной, свободной личности, как к настоящему другу и соратнику, признание уникальности и неповторимости каждого конкретного индивида, и вместе с этим взгляд на государственное и мировое сообщество как на единство множества людей при всем их многообразии – все это представляется в философской мысли как различные проявления человеческого общения, диалога, как чрезвычайно богатый, многосложный, подчас противоречивый, но витально необходимый мир общения.

Ключевые слова: общение, коммуникация, диалог, коммуникативные связи, общечеловеческая культура, философствующий субъект, философская вера, трансценденция, единство человечества, надгосударственное образование.

Немецкий мыслитель К. Ясперс во главу угла своего философского творчества ставит человеческую личность. Для него человек – «единственно существенное» [1, с. 442]. Обо всех других явлениях этого мира можно помыслить лишь в соотнесении с человеком, а именно о том, что он встречает, как реагирует на эту встречу и общение. Для человека, по мнению философа, значимо только то, что для него есть, присутствует, бытийствует в реальности. Все объекты, которые существуют, должны стать для него настоящими, реальными, они должны быть узнаны человеком, введены в систему личности «здесь и теперь», «в настоящий момент». Философ при анализе известного постулата о том, что «...человек в его мизерности, это ничто в закоулке бесконечного мироздания» [1, с. 443], приходит к выводу, что человек даже в таком уготованном положении, находясь в ограничивающих, жестких рамках мироздания является его вершиной и имеет непосредственное отношение к тому, что есть рядом с ним, существует над этим миром и было до его создания. То, что существует реально, в действительности существует и без человека, даже если это проистекает из человеческого бытия, являясь ему в различных формах и способах. Все то, что создано не человеческой личностью, в любом случае есть, по Ясперсу, для него. Мы можем иметь лучшее представление о том, что не есть мы сами. Как правило, человеку менее ясно, в чем заключается его суть, чем суть того, что он встречает на своем пути. Такое стремление к знанию

реальности находит «свое завершение в картине мира» [2, с. 75]. Но сама личность сама для себя остается непознанной тайной, как считает мыслитель. Н.С. Мудрагей пишет по этому поводу: «...Человеческая самость утверждается как непознанный и – главное – непознаваемый, непроницаемый для познания темный исток» [3, с. 89].

Человек принадлежит к такой системе, которая имеет иерархическое строение. В природном плане человек мыслится немецким философом как высший из животных, в духовном – как низший из ангелов. Но он не является ни тем, ни другим, хотя некоторой частью своего существа родственен им. Перед лицом обоих человек, являясь творением Бога, обладает рядом преимуществ, так как имеет те качества, которых лишены и животные, и ангелы. Человеческая личность является своеобразным микрокосмом, обладающим самостоятельным и полноценным содержанием. В этом микрокосме содержится все то, что имеет макрокосм, мир. Ясперс пишет: «Человек не соответствует ни одному единичному существу, только миру в целом» [1, с. 443]. Человек рассматривается не с точки зрения своего образа, физически осязаемого или духовно незримого, а с точки зрения ситуации, в которой он бытийствует. Главный признак существования личности – ситуативность, конкретная ситуация, в которой она себя находит. Философ подходит к характеристике человеческой личности с точки зрения диалектики. С одной стороны, человек обладает падшей природой, вследствие которой его тянет вниз мироздания. С другой стороны, человек поистине велик, так как аналогов ему не существует, он обладает непознанными сильнейшими возможностями. Человек преходящ, тленен. Его конечность – показатель конечности всего живого вообще. Он зависит от текучести окружающего мира, отдан во власть природного процесса, «некого неудержимого глобального процесса» [4, с. 152]. Именно вследствие шаткости, конечности его существования, согласно Ясперсу, произрастают загадочные силы и способности человека. Он заброшен во власть неведомой судьбы, выброшен в мир разобщенных объектов, но ничего могущественнее, одареннее человека в мире этом нет, уверен философ.

К. Ясперс рассматривает личность с двух позиций: как предмет исследования; и как свободу. Человек является предметом исследования для таких наук, как анатомия, психология, социология и др. Для философа большое значение имеет факт важности и неповторимости человеческого тела как предмета исследования естественных наук: «...мы видим человеческое тело в его ни с чем несравнимом выражении» [1, с. 446]. Тело принадлежит человеку, оно обладает своеобразием, уникальной красотой. Этим не обладает никто другой. Человек ни из чего не выводится и ни к чему не сводится. Более того, он – «непосредственная основа всех вещей» [1, с. 448]. Это, по мнению философа, является залогом свободы. Процессы, которые происходят в действительности, имеют отношение лишь к внешнему человеку, но его суть, вещество не затрагивают. Любое знание о человеческой личности, превращаемое и возводимое в мнимое знание о ее самости, настоящем естестве, ведет к постепенной потере и исчезновению свободы. Абсолютизация знания, которая претендует на полновесное изучение, исследование человека, на самом деле ведет к искажению его реального образа. Некорректное толкование сущности человека может привести к искажению его самого. Образ человека, считаемый истинным и единственно верным, становится реальным фактором жизни, что может предрешить характер общения с другими людьми, а также выбранный образ жизни и стиль поведения. О важности верного толкования одного экзистенциального субъекта другим размышляет Карл Ясперс, согласно которому корректность, неискаженность при восприятии другого – залог истинного общения. «...Самобытие и бытие-коммуникации неразрывны» [5, с. 37], – считает Л.А. Ситниченко. Так как человек пытается познать самого себя в качестве предмета исследования, то таинство свободы скрывается от него, вследствие этого мы видим лишь причинно-следственную связь, конечность бытия, казуальную необходимость. Истинное человеческое бытие проистекает из безосновной свободы. Наш мир бездонен, также как и глубокая человеческая личность. Все же она находит в себе нечто, что в мире найти не может, а именно свободу. К.Ясперс характеризует ее как «нечто непознаваемое, недоказуемое, всегда непредметное, нечто ускользающее от всякой исследовательской науки...» [1, с. 449]. Здесь открывается явление трансценденции.

Познать человека с указанных противоположных позиций возможно с помощью различных источников. Согласно Ясперсу, первый источник (человек как предмет исследования) является основанием для знания, второй (человек, понимаемый как свобода) – становится содержанием веры. Причем, уточняет мыслитель, веру возможно обнаружить на пути свободы, которая не возводится в степень абсолютной. Такую свободу Ясперс называет пустой. Настоящая свобода является как конвенциональная, то есть она сама допускает, что ее может и не быть. Полагая, что свобода существует, человек может быть уверенным в наличии трансценденции. С помощью свободы человек достигает определенной независимости от реалий действительности, от мира вообще, так как она «стоит за пределами сферы предметного бытия» [6, с. 114], – уточняет П.П. Гайденко. Наивысшей точки независимости возможно достичь только с помощью трансценденции. Посредством мнимого знания о свободе, ее неправильного толкования возникает суеверие, пропускаемое через объект, а не активно мыслящий субъект. Сознание присутствия трансценденции, по Ясперсу, делает человека великим, равносильно как и сознание самого себя личностью, это есть возвышение в мире механических феноменов. «Место трансценденции ни «здесь» и не «там»... Она схватывается на границах и порогах подлинного существования человека в модусе свободы» [7, с. 188], – отмечает Б.В. Марков. Признавая свободный характер своей экзистенции, человек может стать чем-то, рисуя идеал своей сущности.

Человек как «наличное существование» [2, с. 66] (Dasein), по мнению немецкого философа, в феноменальном мире является предметом познавательного процесса. Например, марксизм признает в человеке самостоятельное существо, занимающееся производительным трудом, благодаря которому он обретает верховенство над природными силами. Психоанализ видит в личности деятельность сознательного и бессознательного, с помощью чего определяется ее жизнедеятельность. Теория рас исследует человека, используя набор антропологических характеристик. Этот ряд механизмов исследования человека можно продолжать достаточно долго. Но, как утверждает Ясперс, такие пути познания человеческой личности открывают на какой-то момент лишь то, что может происходить внутри нее в определенный момент, но никогда человек в своей глубине не является им в целом и полностью. Все научные теории, претендующие на абсолютное знание о человеке, его сущности, судьбе потеряли из виду истинного, подлинного человека, подменив его фантомом, как считает мыслитель. Более того, пишет философ, они «...довели до полного угасания сознание о человеке...и, в конце концов, саму человечность» [2, с. 67]. Человеческое бытие, наличие в нем свободного сознания тесным образом связано с его отношением к божественному. Философ указывает на следующий парадокс – несмотря на то, что мы знаем о существовании рационального знания, его границах и возможностях, мы доверяем некоему «направляющему руководству» (Führung). Философ указывает на божественный характер этого руководства. Возникает вопрос: каким образом человек получает руководство от Всевышнего? Ясперс размышляет следующим образом: жизнь человека протекает последовательным образом, отличным от животных. Жизнедеятельность животного в большей степени подчинена природным законам, их цикличности, повторяемости. Человеку же наряду с ненадежностью, хрупкостью его существования дарована свобода, таким образом, шансы стать тем, кем он хочет, выразить себя согласно своему внутреннему наполнению, увеличиваются. Основываясь на свободном волеизъявлении, он обращается со своим существованием как со строительным материалом, из которого человек ваяет свое будущее и настоящее. Таким образом, человеческая личность, по мнению Ясперса, – это не только событие в мире природы. Возможность обладать свободой выводит его на более высокий уровень бытия, дарует «блаженство присутствия вечности в настоящем» [8, с. 78], но сам человек ведом «направляющим руководством».

Данное руководство, ведение человека и его судьбы, замечает философ, ни в коем случае не объясняется властно-иерархическими отношениями между людьми. Ясперс однозначно провозглашает, что человек живет, ведомый Богом, в противном случае «возникает ощущение никогда ранее не испытанной пустоты бытия...» [9, с. 299]. Мы имеем возмож-

ность ощутить «направляющее руководство» Всевышнего, лишь ступив в сферу безусловно-го, нуменального. Но каким образом это возможно, так как известно, что самого Бога никто не видел и доказательства его существования достаточно дискуссионны. Если принять тезис о том, что Бог действительно есть и руководит бытием человека, то как человеку понять, чего именно Бог хочет от него? Имеет ли место встреча и общение человека с Богом? Нередко в различных художественно-публицистических произведениях встречается ситуация, описываемая следующим образом: человек в период решения жизненно важных вопросов испытывает определенную неуверенность, терзается сомнениями, его существо разрывает от непреходящего ощущения неустроенности, нерешаемости проблем, колебаний то в одну, то в другую сторону. Но вдруг наступает просветление, терзающие сомнения исчезают, уверенной поступью шагает определенность. В достигаемом чувстве уверенности, долгожданной ясности Ясперс видит руку помощи, протянутую Всемогущим. Таким образом, по мнению философа, устанавливается «...связь своего существования с направляющим руководством Бога...» [2, с. 68] и человеку даруется возможность почувствовать себя в руках божьих. Причем чем свободнее и увереннее ощущает себя человек, тем яснее для него становится наличие трансценденции. Это руководство, осуществляемое Богом, является не в виде какого-то однозначного и достаточно определенного посыла или требования, а в виде неизбежной свободы с трансцендентным основанием.

К. Ясперс справедливо замечает, что «направляющее руководство», имеющее трансцендентальный характер, отличается от любого другого руководства в мире, так как является единственным в своем роде, исключительным, «вневременным и абсолютным» [10, с. 65]. Оно совершается на том пути, который проходит через нуменальную свободу. Прикосновение божественной сути и общение с ней проявляется в том, что «...раскрывается отдельному человеку в самоудостоверении, когда он открыт для всего, что выступает к нему из традиции и окружающего мира» [2, с. 69]. Человек при этом не лишен своих собственных суждений и ощущений. Более того, он должен иметь самостоятельное мнение по поводу своих поступков, действий и жизнедеятельности. В этом также проявляется присутствие божественного, так как Бог не может иначе выразить себя в пространстве и времени, кроме как через наличие у человека собственного мнения и только ему присущей линии поведения. В том, как человек себя воспринимает, ощущает, видит и чувствует, наличествует косвенное присутствие божественного, «...человек косвенно обретает суждение Бога...» [2, с. 69], который, в свою очередь, полностью не открывается ему, оставляет за собой право казаться неоднозначно толкуемым, воспринимаемым в качестве нескольких смыслов. Философ продолжает – человеческое суждение будет с самого начала ошибочным, если он явно желает найти в своем самовыражении Божественное прикосновение, окончательное, бесповоротное и узкооднозначное. Также неправильным находит Ясперс поведение человека, когда тот полагается в процессе жизнедеятельности только на самого себя, будучи самодовольным, считая себя и свое поведение единственно верным и правомочным. В этом случае, по мнению мыслителя, необходимо внимательно следить за собой, немедленно выявлять подобные свои проявления и бороться с ними.

На самом деле человек не может быть доволен собой в совершенной степени и не может надеяться и опираться только на себя в процессе экзистенциального существования. Он интересуется мнением окружающих его людей, к которому он довольно чувствителен, при этом «реальность восприятий» [11, с. 321] представляется ему несомненной. В меньшей степени его волнует суждение среднестатистического человека, или человека массы, толпы, а также людей и социальных институтов, которые потеряли для него важное значение, хотя совсем своего внимания на них обращать он не может. Решающую роль для человека играет даже не мнение личностей, чей авторитет он не подвергает сомнению, а, конечно же, на взгляд философа, суждение Бога. Ясперс отмечает, что едва ли человек на протяжении всего исторического процесса был действительно самостоятелен в суждении о самом себе. В подавляющем большинстве случаев для него являлось значимым суждением другого и других.

Но мыслитель в своих философских воззрениях использует термин «честного полагания-на-самого-себя» (Auf-sich-selber-Stehen). Суть этого понятия, пишет он, держится «...на согласии какого-то счастливого существа с самим собой, а возможно, неосознанно еще на некой исторически унаследованной субстанции...» [2, с. 70]. Если вышеуказанное «честное-полагание-на-самого-себя» (Auf-sich-selber-Stehen) не прекращает существовать, погружаясь в ничто, либо трансформируясь в полагание на мнение окружающих, то указывает на свою глубокую связь с тем, что истинно и подлинно (was eigentlich ist), а именно, суждение Все-вышнего.

Истина направляющего суждения К.Ясперса может проявиться в двух формах: как общепринятое требование (Forderung) и как историческое притязание (Anspruch). Предполагается, что все мы должны следовать нравственным принципам и нормам, которые существуют в определенном обществе. Эти нормы имеют общепринятый, универсальный характер. Они имеют свое смысловое выражение в десяти заповедях Христа, что является, по Ясперсу, «формой присутствия Бога» [2, с. 70]. Философ полагает, что люди могли бы признавать их и следовать им, не веруя в Бога, ограничиваясь лишь тем, что человек, являясь «самостоятельным существом перед лицом мирового бытия» [8, с. 54], в состоянии полагаться только на самого себя и свои нравственные убеждения. Однако суть согласия и повиновения христианским заповедям заключается в прислушивании к голосу трансценденции, которая обнаруживает себя в нахождении и постижении примордиальной свободы. Однако, продолжает немецкий мыслитель, поведение человеческой личности в конкретной ситуации не может в полной мере определяться нравственным принципом и нормой или наложенным обществом запретом. Человек, живя в определенную историческую эпоху, при решении «вечных вопросов» прислушивается и действует согласно «непосредственному и невыводимому ниоткуда требованию – «надо сделать так» [2, с. 71]. Но, в сути этого вслушивания конкретного человека в «направляющее руководство Бога» (Führung), даже если оно исходит от самого Творца, все равно лежит определенная доля неуверенности и риска. За индивидуумом, всецело полагающегося на Всевышнего, по Ясперсу, остается право свободы выбора, отсюда в некоторых случаях можно наблюдать воздержанность и умеренность в принятии человеком решений. Благодаря этому исключается стопроцентная гарантия ясного видения пути, по которому предстоит пройти, а также возможность обобщения и универсализации схожих жизненных ситуаций. В таком случае человек не может требовать подобного поведения от других людей, это препятствует слепому фанатизму. Индивидууму необходимо учитывать, что каким бы удивительно ясным не представлялся путь, он может и не быть единственно верным. В этом кроется залог Божественной мудрости, считает мыслитель.

Человеку свойственно неправильно толковать присутствие Бога и общение с ним. Обладая уверенностью в адекватном разрешении вопроса, все же есть вероятность вступления на ложный путь. По мнению К. Ясперса, даже самое правильное суждение, как кажется человеку, пока оно не обросло последствиями, должно находиться в некотором подвешенном состоянии. К индивидуума всегда присутствует некая толика страха перед лицом грядущего события. Абсолютная уверенность в истинности есть «уничтожающая опасность для истины в мире» [2, с. 71]. В момент пребывания в незыблениой уверенности перед будущим человек обязан испытывать смирение перед тем, что все-таки ситуация остается открытой для вливания возможных изменений, таким образом, человек должен отринуть «патетику ненадежного» [1, с. 442]. Вздохнуть с облегчением и изумиться перед Божественной премудростью следует, по Ясперсу, только при взгляде назад, когда все уже произошло. Но даже теперь, когда факты свершения наличествуют в действительной реальности, они не являются чем-то достоверным, поскольку «...направляющее руководство Бога не может стать предметом обладания» [2, с. 71]. Следует отметить, что Божественный глас рядовые люди способны различить лишь в особые мгновения, находясь в «пограничном состоянии».

Наше отношение к миру трансценденции все-таки может быть описуемо, хотя нумеральный мир не может физически материализоваться и наглядно демонстрироваться. Живя в

обществе себе подобных и практически ежедневно общаясь с ними, человек имеет свойство испытывать жгучее чувство одиночества и покинутости, поэтому он стремится к трансценденции в надежде от него избавиться и ощутить присутствие трансцендентального, «потустороннего». Так как человек обладает не только низшей, но и высшей природой, он желает получить доказательство Божественного присутствия в мире «сем». Немецкий философ уверен, что наше отношение к трансцендентальному приобретает убедительные черты, в том случае если «...мы осуществляем непомерное» [2, с. 72] (Ungemäße). Это «осуществление непомерного» (Ungemäße) происходит во встрече и общении с Богом. Божество в этом случае, согласно Ясперсу, притягивается к человеку, а тот, в свою очередь, возвышается до сущности в своей личности, которое способно говорить с Богом. Но человеческую личность окружает не только Божество, а те силы, которые лишают нас уверенности, вселяют страх, опасения, беспокойство в процессе нашей жизнедеятельности, разверзают «пустоту под нашими ногами» [8, с. 90]. Доверие к бытию как таковому, по мнению Карла Ясперса, возможно обрести только через веру в Бога. Помощь тварному человеку, осуществляемая Богом в «подлинном бытии самости» [2, с. 73], есть суть помощи «одного-единого» (des Einen). Таким образом, постулируется тезис о существовании одного Бога (мыслитель скептически относился к политеизму). Содействие человеческой личности, оказываемое Всевышним, очень часто воспринимается людьми с прагматических позиций. Иными словами, индивидуум, взывая к Богу, например, в процессе творения молитвы, рассматривает свое посещение священного места и акта моления в качестве своеобразного долга, конечной целью которого является удовлетворение насущных потребностей жизнедеятельности. В таком случае человек не ищет сокровенной встречи и общения с Господом, не тянется к его руке, сеющей добро и благодать, не алчет тишайшего и таинственного созерцания Его.

Человек, который имеет достаточно ясное представление о самости бытия, отдает себе отчет в том, что все, что есть у него в жизни (в том числе, крайне тяжелые, подчас безвыходные ситуации, ведущие к уничтожению и разрушению) даровано Господом Богом. Индивидууму не возбраняется роптать на Всевышнего, но он должен понимать, что залог его несчастий – неправильное толкование шифров трансценденции при общении с нуменальным миром, ведь суть действия трансценденции, по Ясперсу, состоит в «открывающейся в ней безусловности любви» [2, с. 73]. Каждая конкретная ситуация, в которой обнаруживает себя человеческое существо, есть суть проявления его свободного выбора, но человеку имманентно стремление к счастливому бытию, хотя порой он не в состоянии ответить на вопрос «что такое счастье?» и как его отличить от других состояний. Человек не всегда оказывается послушен Богу, руководствуясь «земными» целями, но это, по Ясперсу, говорит о его недостаточной духовной зрелости и умудренности. Индивидуум, прозрев и уверовав во Всевышнего, принимает глубокие решения, которые могут идти вразрез с утолением сиюминутных, сниженных потребностей «упорядоченного существования» [4, с. 145]. Таким образом, он проявляет послушание, действуя определенным образом и руководствуясь любовью и верой, хотя не может сказать уверенно, чего именно от него ждет от него Господь. Бог проявляет себя через свободное решение отдельного индивидуума. Философ отмечает: «Ранг человеческого бытия определяется глубиной, исходя из которой оно в этом послушании обретает свое направляющее руководство» [2, с. 74].

Единство человечества путем установления экзистенциальной коммуникации К. Ясперс называет не конечной и наивысшей целью бытия, но с его помощью, по мнению мыслителя, открываются безграничные возможности человеческой сути. Это единство не может быть достигнуто, по Ясперсу, с помощью всеобщих научных знаний, так как предполагается объединение на основе разумных положений, рассудочных выводов, теорий и т.д., таким образом, сам человек со сферой «подлинного самобытия» забывается и в расчет не берется. Единство человечества не может быть достигнуто, добавляет философ, и на основе принятия единой мировой религии, так как в данном случае существует вероятность подмены истинной веры на фанатическое или искусственно религиозное отношение к Богу. Объ-

единить человечество, как считает немецкий философ, не удастся, опираясь на геополитическую ситуацию современной действительности, то есть путем подписания различных пактов, конвенций и т.д., но, тем не менее, все с большей очевидностью встает перед нами необходимостью «...неразделимости судеб уникального индивида и общества, человечества как целого» [12, с. 25]. Желание приобщиться к надгосударственным образованиям возникает у людей на основе здравого смысла и трезвого расчета, но нивелируется, таким образом, глубоко личностное стремление одного человека к другому, желание видеть в нем истинного друга и союзника. «Единство можно обрести только из глубины историчности и притом не как некоторое общее содержание, или результат познания, – его можно достичь только в неограниченной коммуникации исторически различных моментов, которые состоят в незавершимом разговоре друг с другом» [2, с. 108], – пишет Карл Ясперс. Кульминационная точка этого разговора составляет, согласно мыслителю, разговор одного самобытия с другим, отличным самобытием, что, в конце концов, принимает форму своеобразной борьбы или конфронтации, так как данное общение не может протекать без напряжения, что свойственно экзистенциальному существованию. Но, отмечает философ, такие отношения зиждутся только на взаимной любви и уважении. И.Н. Сидоров отмечает, что «для Ясперса речь идет о возможности общей для всего человечества веры, которая объединила бы все варианты человеческой культуры» [13, с. 80].

Немецкий философ рассуждает о возможности единения всех людей, живущих на нашей планете, даже исходя из того, что все мы настолько разные и непохожие друг на друга, что может возникнуть ощущение недоверия или сомнения в другом, чуждом человеке. В первую очередь, все люди отличаются по внешним характеристикам, даже внутри одной национальности, не говоря уже о расовых признаках. И конечно, один индивид разительно непохож на другого, исходя из внутреннего наполнения, имманентных черт характера, эмпирического опыта и т.д. К.Ясперс по этому поводу пишет: «Все наши глубочайшие различия, различия в характерах, отдаленность друг от друга, доходящая до полного взаимного непонимания, до возникновения смертельной вражды, наше ужасающе безмолвное отчуждение при душевной болезни или в страшной реальности контрационных лагерей, все это – мука, в действительности порожденная родством, забытым или заблудившимся на пути к своему осуществлению» [4, с. 69]. По Ясперсу, наша экзистенциальная сущность, присутствующая в каждом индивиде, взывает увидеть, разглядеть это глубинное родство всех людей, не противиться этому, а слушать этот внутренний голос и следовать ему. Тот факт, что мы в настоящее время особенно пытаемся заглушить голос, призывающий к единению, свидетельствует о бегстве от самих себя, оскудении, исчерпаемости «подлинного самобытия», вследствие чего человечество может пойти дорогой самообмана, не к себе, а от себя, то есть может прозойти, по Ясперсу, «утрата собственного бытия человека в пользу мира...» [14, с. 166].

Немецкий философ рассуждает о возможности единения всех людей, живущих на нашей планете, даже исходя из того, что все мы настолько разные и непохожие друг на друга, что может возникнуть ощущение недоверия или сомнения в другом, чуждом человеке. В первую очередь, все люди отличаются по внешним характеристикам, даже внутри одной национальности, не говоря уже о расовых признаках. И конечно, один индивид разительно непохож на другого, исходя из внутреннего наполнения, имманентных черт характера, эмпирического опыта и т.д. К.Ясперс по этому поводу пишет: «Все наши глубочайшие различия, различия в характерах, отдаленность друг от друга, доходящая до полного взаимного непонимания, до возникновения смертельной вражды, наше ужасающе безмолвное отчуждение при душевной болезни или в страшной реальности контрационных лагерей, все это – мука, в действительности порожденная родством, забытым или заблудившимся на пути к своему осуществлению» [4, с. 69]. По Ясперсу, наша экзистенциальная сущность, присутствующая в каждом индивиде, взывает увидеть, разглядеть это глубинное родство всех людей, не противиться этому, а слушать этот внутренний голос и следовать ему. Тот факт, что мы в настоящее время особенно пытаемся заглушить голос, призывающий к единению, свидетельствует

о бегстве от самих себя, оскудении, исчерпаемости «подлинного самобытия», вследствие чего человечество может пойти дорогой самообмана, не к себе, а от себя, то есть может прозойти, по Ясперсу, «утрата собственного бытия человека в пользу мира...» [14, с. 166].

Предпосылкой «разговора друг с другом» на основе искренней симпатии, теплого внимания, что является показателем внутреннего достоинства личности, становится ситуация ненасилия и отказа от любых военных проявлений. Необходимость достижения такого состояния мировой общественности очевидна, по мнению философа. Попытка мыслить единство всего человечества, отринув насильственные способы объединения, дает возможность упорядочить экзистенциальные основы бытия, упрочить фундамент, на котором возводятся принципы нуменального миропорядка. К. Ясперс отмечает, что условием единения человечества выступает такая политическая форма управления, которая может гарантировать максимальное расширение поля свободы, при этом сохраняя всеобщее согласие и непротивление. Такая форма государственного объединения была четко продумана в странах Западной Европы, но не до конца реализована в реальной жизни, как считает философ. То, к чему следует стремиться в попытке единения человечества – правовое государство, где верховенствующую роль играет закон. «Все со всеми» содействуют в реализации наиважнейшей цели, будучи хорошо информированными, благодаря постоянно циркулирующим сообщениям и уведомлениям, создавая, по словам О.Ф. Больнова, «людской совместный мир» [15, с. 55]. Отсутствие военных столкновений объяснялось бы тем, что не существовало бы отдельного, обособленного государства, которое владело бы теми или иными природными или иными ресурсами, а человечество жило бы жизнью одного организма, где все органы и их функции тесно взаимосвязаны, утверждает философ.

Библиографический список

1. **Ясперс, К.** Философская вера. В кн. Ясперс, К. Смысл и назначение истории: [пер. с нем.] / К. Ясперс. – М.: Политиздат, 1991. – 460 с.
2. **Ясперс, К.** Введение в философию: [пер. с нем.] под ред. А.А. Михайлова / К. Ясперс. – Мн.: ПроPILEI, 2000. – 192 с.
3. **Мудрагей, Н.С.** Очерки истории западноевропейского иррационализма / Н.С. Мудрагей. – М.: Наука, 2002. – 112 с.
4. **Ясперс, К.** Истоки истории и ее цель. Смысл и назначение истории: [пер. с нем.] / К. Ясперс. – М.: Политиздат, 1991. – 460 с.
5. **Ситниченко, Л.А.** Человеческое общение в интерпретациях современной западной философии (критический анализ) / Л.А. Ситниченко. – Киев: Наук. думка, 1990. – 112 с.
6. **Гайденок, П.П.** Человек и история в свете «философии коммуникации» К.Ясперса. В кн. «Человек и его бытие как проблема современной философии» / П.П. Гайденок. – М.: Издательство «Наука», 1978. – 495 с.
7. **Марков, Б.В.** Коммуникация, феноменология и экзистенция: К. Ясперс и М. Хайдеггер. История современной зарубежной философии: компаративистский подход / Марков Б.В. – СПб.: ЛАНЬ, 1997. – 590 с.
8. **Ясперс, К.** Ницше и христианство: [пер. с нем. Т.Ю. Бородай] / К. Ясперс. – М.: «Медиум», 1994. – 114 с.
9. **Ясперс, К.** Духовная ситуация времени. В кн. Ясперс К. Смысл и назначение истории: [пер. с нем.] / К. Ясперс. – М.: Политиздат, 1991. – 460 с.
10. **Типсина, А.Н.** Немецкий экзистенциализм и религия / А.Н. Типсина. – Л.: Издательство Ленинградского университета, 1990. – 152 с.
11. **Ясперс, К.** Собрание сочинений по психопатологии в 2 тт. Т. 1 / К. Ясперс. – М.: Издательский центр «Академия», СПб.: «Белый кролик», 1996. – 321 с.
12. История философии: Запад – Россия – Восток (книга четвертая: Философия XX в.). – М.: «Греко-латинский кабинет» Ю.А. Шичалина, 1999. – 448 с.
13. **Сидоров, И.Н.** К.Ясперс: предэкзистенциализм и экзистенциализм. История современной зарубежной философии: компаративистский подход / И.Н. Сидоров. – СПб.: ЛАНЬ, 1997. – 590 с.

14. **Габитова, Р.М.** Человек и общество в немецком экзистенциализме / Р.М. Габитова. – М.: Издательство «Наука», 1972. – 222 с.
15. **Большов, О.Ф.** Философия экзистенциализма / О.Ф. Большов. – СПб.: Издательство «Лань», 1999. – 224 с.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2011*

O.N. Bagaeva

**PHILOSOPHICAL BELIEF OF KARL YASPERS
AS EXISTENTIAL COMMUNICATION RESOURCE
AND PEOPLE UNITING OPPORTUNITY**

People deal with the term «communication» rather often. It is used and in everyday speech, and on the pages of writing, and in scientific publicity. The term itself has a wide meaning, identifying all the forms of contacts among individuals. From the moment of appearance of the foreign word “communication” in the Russian language (lat. «communication» - link) it has been used as the synonym of the word “relation”, mostly in the scientific sphere. However, differences between definite types of people’s connection have been found out lately as the result of growing interest to the interpersonal relations as well as to the interactions among big social groups. Nowadays, interpretation of communication as attitude toward another person as a valuable, mentally developed and free person, as a real friend and companion, acknowledgement of originality and peculiarity of every concrete individual, and at the same time viewing state and world community as the unity of persons’ multitude with all their diversity – all the above mentioned has been represented in the philosophical reflection as different displays of human communication, dialogue, as the extremely splendid, complicated, at times contradictory, but vitally necessary world of communication.

Key-words: relation, communication, dialogue, communicative links, international culture, philosophizing subject, philosophical faith, transcendental act, unity of humankind, international state formation.

УДК 1/14

Д.В. Воробьёв

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ СТАТУС И ЭТИМОЛОГИЯ ПОНЯТИЯ НИЧТО В ФИЛОСОФСКОЙ ТРАДИЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Предметом настоящей статьи является онтологический и этимологический анализ категории «ничто». Автор, апеллирующий в своих рассуждениях к широкому диапазону научных, исторических, литературных источников, развивает свою мысль в не вполне традиционной для научной статьи манере изложения, которая, тем не менее, позволяет выявить ряд аспектов, остающихся за гранью осмысления в классическом философском анализе. Целью автора является раскрытие «ничто» не столько через ментальные конструкции, сколько через «многоговорящее слово».

Ключевые слова: ничто, бытие, небытие, сущее, существование, реальность, онтология, этимология.

Образование слова «ничто» в английском и русском осуществляется аналогично. В русском «ничто» - означает буквально «ни что», «ни что-то». «Ничего» – «ни чего», отрицание нечего, чего-то. В английском nothing – no-thing. Ни вещь, ни предмет. То есть, путем добавления к «что-то», нечего, предмету логического отрицания ни (не). Заметьте, не к существованию, но именно к «что-то», к нечему, к предмету [1, с. 23].

Как известно еще со времен Аристотеля, понятие «бытие» выступает в двух смыслах. В смысле *существования* и в смысле – *сущего, существующего*. Того, что вообще существует. Всего того, что наделено признаком существования и, таким образом, относящегося к области существования. Соответственно, если идти от противоположного, то понятие «небытие» выступает также в двух смыслах. В смысле – *не-сущего, несуществующего*, того, что не может быть существующим или на данный, конкретный момент не является им. И в смысле – отсутствия существования, то есть *ничто* – несуществования. Ничто – есть, другими словами, отсутствие «что-то», чего-то. Равно как этого «что-то», его самого, так и отсутствие его существования (что, собственно, суть то же самое).

При этом «ничто» – выступает опять же в двух смыслах. Обозначает, с одной стороны, отсутствие этого «что-то», чего-то конкретного (того, что, к примеру, не может существовать на данный конкретный момент или не существует вообще). А с другой стороны, – отсутствие всяких предметов; всего, чего бы то ни было. К примеру, всей совокупности данного (или какого-то) класса предметов. В этом смысле «ничто» совпадает (по смыслу) с понятием «ничего».

«Ничего», таким образом, обозначает отсутствие (или отсутствие существования) всей совокупности данного (то есть, опять же какого-то) класса предметов или отсутствие всей совокупности всякого класса предметов-вещей, наделенных каким-либо видом существования. Оно есть «ничто» в своей крайности, то есть крайняя степень «ничто». «Ничто», если можно сказать так, в его устремлении к полной абстракции (от всего, что наделено каким-либо существованием), к пустому отсутствию, к отсутствию всякого сущего (ныне, в прошедшем и будущем).

Итак, под идеей *ничто* нам следует полагать неналичие (несуществование, отсутствие существования):

- чего-то конкретного, какого-то единичного «что-то»;
- целого класса предметов-вещей;
- чего-либо вообще; всякого вида (класса) предметов, наделенных возможностью быть, то есть стать существующим (обладать каким-либо видом существования).

Прежде чем далее говорить о «ничто», задумаемся над особенностями не столько даже употребления, сколько над особенностями происхождения этого слова. Итак, откуда берется ничто?

Понятно, что философский анализ уместен здесь меньше всего (нет, он, конечно, уместен, но не здесь, не сейчас: не на этом этапе рассуждений, когда речь идет именно о происхождении слов). Поскольку с необходимостью предполагает ссылки на разного рода философов и разного рода системы, которые эти философы и представляют. Но чем, позвольте спросить, занимается настоящий философ? Он либо пользуется, что называется, наработанным материалом, основанным зачастую на домыслах и неправильных истолкованиях прошлых систем, либо сам создает свое содержание-смысл, удобный только ему, позволяющий «разместить» это слово-понятие в системе собственной философии. Но и в том и в другом варианте, он меньше всего озабочен этимологией этого слова. Словом, анализ здесь нужен не философский, но именно лингвистический, этимологический.

Но что означает «этимология»? И что понимать здесь под словом «анализ»? Что означает «этимология», в частности, этого единичного слова? То есть, какого-то слова. Конкретного слова. Понятно, что под анализом мы понимаем дедукцию. Переход от общего к частному. Разбиение общего на ряд составляющих. Этимология происходит от двух древнегреческих слов *ετιμος* – истина и *λόγος* – логос, слово (*λογία* – наука, учение). Таким образом, можно сказать, что этимология – это наука (раздел лингвистики, языкознания), изучающая происхождение слов. «Этимологией» называют также само происхождение слова. «Предложить новую этимологию» – соответственно, означает «предложить версию происхождения».

Осуществить этимологический анализ – означает, следовательно, свернуть речевую многосмысленность этого слова, избавив от разного рода ошибок: неточностей, домыслов, неправильных истолкований, накопленных со времени его возникновения. Опять же от разного рода фантазий философов, каждый из которых стремится наделить его своим собственным смыслом, удобным только ему. Прийти к изначальному смыслу, откинув при этом все остальные. Прийти к началу, к первопонятию этого слова, к началу-понятию, ниоткуда уже не выводимому и никем не определяемому. Словом, слово должно сказать само за себя.

Итак, осуществить этимологический анализ – означает свернуть речевую многосмысленность слова в один изначальный смысл, в одно самоговорящее слово. Понятно, что мы не обойдемся одним лишь анализом слова «ничто». Анализ этого слова повлечет за собою анализ происхождения «небытия», связанного с ним по смыслу (но никак не происхождению). «Небытия» – «бытия» (поскольку как понятие оно является его логическим отрицанием), которое связано с «существованием» и с «сущим».

С самого первого взгляда, немецкое *nichts* никоим образом не может быть связано с тем, что по-немецки обозначает предмет или вещь. Налицо, таким образом, отступление от ранее рассмотренной схемы. Но это лишь с первого взгляда. В немецком *nichts* прячется готское слово *waihts*, связанное по смыслу (но никак не происхождению) с немецкими *etwas* (что-то, нечто) и *ding* – (вещь, предмет), к которому добавляется *ni* – отрицание [2, 272]. Таким образом, налицо все то же самое отрицание. Отрицание «что-то», нечто. Ни что-то. Ничто. Немецкое *ding* (вещь, предмет), в свою очередь, происходит от старогерманского *thing* (тинг), связанного по смыслу с английским *thing* (вещь, предмет) [3, 90]. Но вот, что действительно представляет собой отступление от рассмотренной схемы, так это латинское слово *nihil*. Латинское *nihil*, происхождение которого неизвестно и по сегодняшний день, толковалось древними римлянами как *ne-nilum*: «ни пуха, ни пера», «ни пылинки и ни соринки», ничего; никакого даже самого малого нечто, предмета.

Очевидно, что существующий или сущий (кр. форма нашего существующий) каким-то образом связаны с «есть». Ведь существующий – это тот, что каким-либо образом «есть», существует. Однако каким? Можно, к примеру, сказать, что оно связано только по смыслу и

только. На этом все и заканчивается. Что же касается происхождения, то вероятность такой связи скорее стремится к нулю. Да и есть ли она, эта связь? А вот все-таки есть. Славянский корень *сущ-* происходит от *суть*. Русское «суть» (мн. форма нашего «есть»), происходит от старославянского «соть», связанного с латинским *sonticus*, с готским *sunja*, с древнеиндийским *sant*, означающими примерно одно и то же: истинный, сущий, лежащий в основе. Кстати сказать, одно из значений русского *суть* – это то, что лежит в основании. Суть анекдота, рассказа. То, что есть самое главное. Суть изложения.

Сущее, нечто, вещь и предмет – если и связаны между собою, то только по смыслу. Тогда как *вещь* и *объект* – не только по смыслу. Происхождение слова «объект» ведет нас к латинскому *objectum* – «вещь (брошенная навстречу, выставленная вперед, напоказ)». *Ob + jicere* = «навстречу» + «бросать». Соответственно, «объективная реальность» – уже не реальность вещей-в-себе, которая не познается ни чувством, ни разумом. А реальность, выставленная перед нами, перед нашим взором. Наблюдаемая реальность. Реальность, которая служит предметом нашего постижения. Предметом познания. Или, вернее сказать, состоящая из познаваемых нами предметов.

В форме чего существует ничто? Мы говорим, что ничто – есть простое отсутствие. Но что в таком случае понимать под «отсутствием»? Существует оно или нет? Разумеется – «да», существует. Но, если «да», существует, то в виде опять же чего? Существует лишь в форме ментальной конструкции, а не в форме, к примеру, предмета действительности? Или в форме чего-то еще? И если ничто существует лишь в виде ментальной конструкции, то какова его роль среди прочих ментальных конструкций? В мире умственных построений, которые подменяют собою действительность?

Итак, речь с преимуществом будет в дальнейшем идти о «*ничто*». О том самом *ничто*, которое, наряду с остальными конструктами, подменяет собою действительность, но в отличие от остальных, то есть прочих ментальных конструктов, не имеет того, что мы чаще всего называем «предметом его соответствия» или «предметом его приложения». Или реже – аналогом. То есть, каким бы то ни было эквивалентом-аналогом среди «внешних» явлений-предметов, реалий той самой действительности, которую это *ничто* подменяет собой наряду с остальными конструктами. И в этом смысле является голым конструктом. То есть, конструктом в его, так сказать, чистоте, лишенным того, что мы чаще всего называем «предметом его соответствия», существующим в виде, и только лишь в виде, ментальной конструкции.

В свою очередь, это уже объясняется тем, что *ничто* как ментальный конструкт не является результатом обычной «подгонки» сегодняшних и, каких бы то ни было, представлений о мире вообще, а является следствием более сложных процессов. Именно их мы и будем рассматривать несколько позже. Но какая здесь связь между тем, что *ничто* как конструкт не является результатом «подгонки» и тем, что ничто как конструкт не имеет аналогов? Все дело в том, что предмет, под который мы подгоняем свои представления, чаще всего и является этим аналогом, словом, тем самым предметом той самой конструкции, которая и являет собой результат этой самой «подгонки». То есть, является результатом подогнанных или, даже точнее, «урезанных» представлений о мире. Тем, во что они превращаются в ходе такой операции.

Итак, если мы говорим об уже изначальном отсутствии всяких предметов «подгонки» – можно ли нам говорить о каких-то дальнейших аналогах? Очевидно, что – «нет». Именно в силу того, что *ничто* как конструкт не является результатом «подгонки» и, таким образом, в силу отсутствия (изначального неналичия – неприсутствия – несуществования) предмета «подгонки» – мы обладаем в конечном итоге отсутствием всяких аналогов, то есть, предметов – а речь, я напомним, идет о *ничто* как конструкте – его приложения.

Таким образом, можно сказать, что:

- во-первых, ничто как ментальный конструкт – наряду с остальными конструктами – подменяет собою действительность;
- во-вторых, как ментальный конструкт, оно не является результатом «подгонки» теперешних или, скажем, каких бы то ни было представлений о мире вообще, а является результатом иного процесса;
- именно в силу последнего, в-третьих, ничто как ментальный конструкт – не имеет аналога, то есть, не обладает «предметом его приложения» (среди «внешних» реалий: предметов-явлений той самой действительности, которую это *ничто* подменяет собой наряду с остальными конструктами).

Итак, вправе ли мы утверждать, что *ничто* есть всего лишь ментальный конструкт? Если так, то каков механизм появления этой конструкции? И если мы говорим, что *ничто* как конструкт не является результатом обычной подгонки, а является результатом иного процесса – в чем же тогда заключается этот процесс?

Можно ли будет дать четкий ответ? Очевидно, что – «да». Но для этого нужно дать четкий ответ на другие вопросы. Что есть, к примеру, Единое? Или, к примеру, Единое Сущее? Что есть Единица (как всеобъемлющая реальность)? И как можно творить из ничто? Ведь ничто – это то, чего нет?

Делая экскурс в историю, можно сказать, что *ничто* как идея есть очевидный ровесник идеям пространства и времени. И, что если речь идет о европейской традиции – а, вернее сказать, древнегреческой – то *ничто* как идея в достаточно четком, оформленном виде присутствует у элеатов (бытие (сущее) – есть, а не-сущего (ничто) – нет), у атомистов, в учении Гераклита Эфесского, у Платона и неоплатоников (равно как христианских, так и до-христианских, языческих неоплатоников). И что своего, если можно сказать так, развития и становления (в том самом виде, в котором оно существует сейчас) – достигает в учении христиан (а, точнее, в иудео-христианской традиции), в той его части, где речь идет о творении из ничего. [4, 479]. О творении в полной своей, так сказать, чистоте. «Сотворять» или просто «творить», то есть «творить» вне своего отношения с тем «из чего», – здесь означает «творить в чистом виде», в подлинном смысле этого слова. И эта его чистота состоит в сотворении нового. Новое – это не есть измененное старое, не имевшее ранее форм и лишь затем сформированное. Оно не пребывает в каком-то ином, к примеру, опять же в бесформенном виде в каком-то уже существующем ранее «где-то», откуда Он, Бог-Творец, «извлекает» его. Его попросту нет. Оно не существует нигде и ни в каком виде.

Прямой, так сказать, внеположностью этой позиции – служит позиция неоплатоников разного толка, в том числе и христианских. Согласно последним, всякое тварное сущее до своего сотворения не «не существует нигде», а именно «где-то уже существует». И это «где-то» есть Сам Бог-Творец. Мир сотворяется Богом-Творцом из Себя Самого. Сотворение мира здесь непосредственно связано с изливанием Бога (из Самого Себя). Мир проистекает из Бога, изливаясь из Божественной полноты, подобно солнечному свету. Бог творит тварный мир из Себя Самого, «распадаясь» при этом на множество тварных существ, уже содержащихся в Нем в состоянии тождества: в неразличном, бесформенном виде.

Когда одного из известнейших ныне фантастов спросили: как он относится к летающим тарелкам? Он ответил: никак. И тут же добавил, что скорее относит их к области современной мифологии, потому что лет триста назад это было б, к примеру, явлением сатаны, и, кстати сказать, не известно, чем это будет лет этак, скажем, через четыреста или пятьсот.

Но позвольте, – спросили его, – ведь все ваши книги буквально пронизаны верою в то, что такое возможно. Идеи космических перелетов, освоения новых пространств: галактик, планет – они же буквально присутствуют в каждом из ваших романов? Кроме того – существует множество очевидцев, так сказать, напрямую столкнувшихся с этим явлением.

Да, разумеется, часть из них и, наверное, большая часть, просто больные, психически нездоровые люди. Часть – скучающие бездельники, которым попросту нечем заняться. Иные же – просто мошенники. Часть – абсолютно нормальные, то есть честные и правдивые, но выдают желаемое за действительное и в этом собственном устремлении совершают отнюдь не хорошие вещи, вводя, таким образом, в замешательство, равно как и себя, так и тех бедолаг, что имеют несчастье их окружать. Однако не все же такие плохие, и не все же так плохо. Есть среди них и хорошие люди. Отрицать, одним словом, подобного рода явления – не сказать, конечно, что просто безумие, однако же, все равно, что... ну скажем, как отрицать очевидные вещи... Что трава, например, есть зеленая, а лошадь или свинья, если, конечно, эта свинья не калека, имеет четыре ноги. То есть глупо, неправильно и, в общем-то, просто нехорошо. Словом, такие дела...

Упаси вас Господь, – ответил фантаст, – я никоим образом не отрицаю это явление. То, с чем столкнулся ваш очевидец или, точнее сказать, то, с чем он должен столкнуться – есть, безусловно, явление. Или, я бы сказал, есть всего лишь явление. Или, как говорят сейчас, «голый факт». Однако не более. Дело, однако, не столько в наличии или отсутствии, существовании или несуществовании явления, сколько в том, что любое, включая и это, – само по себе ничего абсолютно не значит. Как это? – спросите вы. Охотно отвечу. Любое явление приобретает для человека какую-то значимость (или, лучше сказать, обретает осмысленность, содержательность) лишь в сочетании с тем содержанием, или, другими словами, с той самой умственной составляющей, которую он, человек, в него вкладывает. Представьте, к примеру, на миг себя в роли такого очевидца. Вы наблюдаете и говорите, к примеру: «летающая тарелка», но тем самым вы уже вкладываете в это явление некое собственное содержание (собственную умственную или, вернее сказать, виртуальную составляющую), а именно: космический, инопланетный корабль – словом, то самое содержание, которое соответствует теперешнему вашему или, точнее будет сказать, теперешнему нашему представлению об окружающем мире.

Словом, лет этак триста назад – было иное, принципиально отличное от нашего, теперешнего, понимание мира. И в соответствии с этим иным представлением мира он вкладывал в *это* иное свое содержание или, как модно сейчас говорить, иную свою составляющую. И это было, к примеру, явлением сатаны или, напротив, признаком божественного проявления.

Проведем опять-таки мыслимый эксперимент. Представим на время, насколько хватит вашей фантазии, мир раннего средневековья. Эпоха жестокости, немилосердия, мир мракобесия, низости в самых, что ни на есть наихудших своих проявлениях. А теперь попытайтесь ответить: какое такое свое содержание будете вкладывать вы, житель, к примеру, одиннадцатого-двенадцатого веков, сторонник системы Клавдия Птолемея с ее эпициклами и деферентами? Словом, той самой системы, согласно которой земля находилась по центру вселенной, была неподвижной и окруженной непроницаемой сферой? Системы, сводящей на нет идеи космических перелетов и освоения звездных систем? Ответили, нет?... Да, да – той самой системы, в свете которой идеи космических путешествий и освоения звездных галактик – были б не просто абсурдными, не просто дурацкими или там идиотскими, однако же, попросту никогда б не возникли.

Сталкиваясь, таким образом, с неким явлением (с явлением, как ему кажется, летающей тарелки) человек сталкивается не столько с ним, сколько с собственной умственной составляющей, которую он, человек, в него вкладывает. Выступая, другими словами, в роли такого очевидца – человек «соприкасается» не столько с явлением, сколько с собственным умственным построением. А именно: с умственным построением этой тарелки...

Итак, говоря, например: «летающая тарелка», вы уже вкладываете в это явление некое собственное содержание, словом, ту самую умственную составляющую-построение, которое соответствует или входит, другими словами, в систему тех самых умственных составляю-

щих-построений, которые формируют или, лучше сказать, представляют в своем сочетании систему сегодняшних представлений об окружающем мире.

Но из этого следует обыкновенно понятная и довольно разумная мысль, согласно которой мы пребываем не столько в мире реальной действительности, сколько в мире собственных умственных построений, подменяющих или, скорее, уже подменивших собою действительность. Таким образом, можно сказать, что мир умственных построений есть, в своем роде, преграда, барьер, отделяющий нас от реальной действительности, подменяющий и выдающий себя за действительность. Лично мне это видится частью огромной китайской стены, (за которой не видно уже ничего), отделяющей нас от реального внешнего мира и как бы тем самым уже отвергающей факт его существования. Оставаясь, другими словами, один на один с миром собственных умственных построений, человек полагает, что именно это и есть тот действительный, подлинный мир, где он, человек, существует с самого, что ни на есть, начала-рождения.

Здесь возникает резонный вопрос. Почему, говоря о реальности умственных составляющих, мы ставим знак равенства между умственным построением и умственной составляющей? (И что есть умственная составляющая вообще?) Заметьте, что речь здесь идет лишь о равенстве, но не о тождестве этих моментов. В самом деле, любая из умственных составляющих есть, прежде всего, построение ума. Или, как модно сейчас говорить, есть ментальный конструкт. Далее должно сказать, на наш взгляд, о самом механизме подмены и, в каком-то аспекте, раскрыть вместе с тем механизм самого постижения. Дело в том, что процесс самого постижения означает, в какой-то мере, «подгонку» сегодняшних представлений под этот конкретный предмет постижения. Постигая, другими словами, какой-то предмет или явление – мы тем самым уже «подгоняем» его под собственные представления о мире и, таким уже образом, вкладываем в него некую умственную составляющую. Словом, такую, которая соответствует или, как было указано ранее, должна соответствовать нашим, опять же теперешним представлениям (то есть, другими словами, является элементом системы осмысленных в том смысле, что умственных представлений об окружающем мире). Таким образом, можно сказать, что сначала она существует в своем сочетании с этим («постигнутым» нами) явлением, а затем наступает процесс «отчуждения». Этот процесс состоит в «отчуждении» умственной составляющей, в том, что она «отчуждается», «отпадает» или, вернее сказать, «отделяется» от явления, приобретает статус независимого конструкта и как бы тем самым уже подменяет собою явление.

Все это уже объясняет тот факт, что мы ставим знак равенства между ментальным конструктом (умственным построением) и умственной составляющей (всяких явлений). Мы ставим знак равенства в том самом смысле, что ментальный конструкт – это то, чем в конечном итоге становится или то, во что обращается умственная составляющая. В свою очередь, умственная составляющая – это то, чем является всякий ментальный конструкт на самом первом этапе его становления. Мы не говорим здесь о тождестве на том самом простом основании, что оба эти момента – не суть то же самое.

Но вернемся, опять же, к вопросу об умственных составляющих (то есть, к вопросу о том, что есть умственная составляющая вообще). Так, ранее мы говорили, что умственная составляющая любого явления – это есть, прежде всего, содержание, которое мы подгоняем под данный конкретный предмет, и вместе с тем соответствует нашему пониманию мира. Впрочем, здесь нам, я думаю, должно скорей обратиться к каким-то конкретным примерам. Словом, полное понимание этих составляющих требует большего, не какого-то общего определения, но, очевидно, чего-то еще, каких-то особых, конкретных примеров. И хотя мы говорили уже об одной из таких составляющих (речь идет о летающей тарелке как о космическом, инопланетном аппарате) – очевидно, что этого будет еще недостаточно.

Здесь нам на помощь приходят примеры из школьного курса по физике. Так, мы говорим, например: «электрический ток есть упорядоченное движение электронов». Или, что «атомы состоят из ядра, электронов, а ядро – состоит из протонов, нейтронов». Или, что «звук – это есть звуковая волна, воздействующая на барабанную перепонку нашего уха. А свет, в свою очередь, есть «световая волна, оказывающая механическое воздействие на сетчатку нашего глаза»... Словом, все то, что мы называли недавно «явлением» или предметами внешнего мира, в реальности – суть лишь конструкты сознания. Суть лишь примеры таких составляющих. Суть содержания прошлых веков, что являют собой результат измененных, урезанных и тем самым подогнанных представлений о мире. Представлений под какой-то конкретный предмет постижения (в случае, к примеру, с атомом – это есть вспышка на экране электронного микроскопа).

Таким образом, можно опять же еще раз сказать, что мы существуем не столько в мире реальной действительности, сколько в мире ментальных конструктов, то есть собственных умственных построений, подменяющих или, скорее, уже подменивших собою действительность. Оставаясь опять же один на один с миром собственных умственных построений, человек полагает, что именно это и есть та действительно подлинная реальность, что окружает его постоянно, всегда, с самого начала-рождения. Что электрический ток, например, существует как упорядоченное движение электронов, а атомы состоят из протонов, нейтронов... И очень редко кто задается вопросом, полагая, что современная модель атома – есть всего лишь модель, и что там на самом-то деле, в реальности?.. Бог его знает.

Впрочем, здесь возникает опять же резонный вопрос: если то, что указано выше – всего лишь конструкт, то почему он не может быть адекватен реалиям нашей действительности? Если он, этот самый конструкт - есть не просто удобный конструкт или, будет опять же вернее сказать, не только удобен, но и применяем «на практике», разве это не повод сказать об его адекватности?

Следует сразу сказать, что подобного рода вопрос возникает тогда, когда во главу всех своих рассуждений ставят принцип, основанный на смешении двух очень важных начал: результативности и адекватности, когда одно подменяют другим или ставят знак тождества. То есть следуют, на наш взгляд, из неверного утверждения, что чем более он, этот конструкт, применим «практически», тем более он адекватен реалиям нашей действительности. То есть, тем более он отражает реальные отношения между предметами внешнего мира (реальное положение вещей), либо имеет конкретный предмет своего приложения (среди этих же внешних предметов-явлений). Разумеется, это не значит, что мы отрицаем наличие всяческой связи между одним и другим. Это значит, что мы отрицаем наличие четкой, прямолинейной зависимости и говорим о наличии более сложного механизма.

Этот механизм представляется чем-то действительно сложным и требует явного рассмотрения в подробностях или деталях.

И последнее. Хочется высказать несколько слов о самом механизме подмены «реальностей». О последнем, как было указано ранее, мы можем сказать, что такой механизм тесным образом связан с «подгонкой» сегодняшних представлений (о мире) под какой-то, к примеру, конкретный предмет постижения, то есть, связан с процессами постижения нами действительности. Понимание этих процессов и, вместе с тем, самого механизма «подгонки» представляется делом весьма непростым и потребует даже не столько каких-то особых усилий ума, сколько всякого рода примеров «из жизни». Речь идет о примерах, касательных «новых открытий», известных из школьного курса по физике. Например, электрический ток Фарадея. Или явление электромагнитной индукции. Или явление электромагнитной волны.

Итак: Бог творит тварный мир из *ничто* и Бог творит тварный мир из Себя Самого. Таковы эти два несводимых посыла. Второе не есть результат или следствие первого, то, во что обращается первое в ходе своих изменений. Если идея творения мира Творцом из Себя

Самого и идея творения из *ничего* – выступают как два независимых и несводимых друг с другом начала, то возникает разумный вопрос: каков смысл в рассмотрении первой идеи? Ведь для нас представляется значимой только вторая. Именно эта, вторая идея, и предполагает собою идею *ничто* в его онтологическом значении.

Библиографический список

1. An English-Reader's Dictionary by A.S.Hornby Oxford University Press. – London, 1952. – P. 23.
2. Wackernagel Jacob. Vorlesungen uber Syntax. II. Reihe, 2 – Aufl, 1928. – P. 272.
3. Longman Dictionary of Scientific Usage Longman Group Limited. – Harlow, 1987. – P. 90.
4. Лосский, В.Н. Догматическое богословие // Боговидение. – М., 2003. – С. 479.

Дата поступления
в редакцию 17.10.2011

D.V. Vorobjev

ONTOLOGICAL STATUS AND ETYMOLOGY OF «NOTHING» CATEGORY WITHIN PHILOSOPHICAL TRADITION

The article reveals with the ontological and etymological analysis of «nothing» category. The author unites and classifies a wide diapason of points of view, scientific, historical, literature sources. The article composition and style are not traditional for scientific publications; nevertheless, it opens the way for new horizons of discovering the describing category. The purpose of the article is the analysis of «nothing» category not by means of mental constructions, but through the «multi-saying word».

Key words: nothing, genesis, nothingness, things, existence, reality, ontology, etymology.

УДК 316.001

М.Ф. Глухова

**МЕХАНИЗМ СОЦИАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ
ИНФРАСТРУКТУРОЙ МОЛОДЁЖНОЙ ПОЛИТИКИ**

Московский городской университет управления правительства Москвы

В статье даётся обоснование источников, способствующих преобразованию инфраструктурных компонентов в региональных и муниципальных практиках работы с молодёжью, реализованных в Концепции развития учреждений органов по делам молодёжи. Представлены понятия и принципы, раскрыты цели, задачи и направления, которые комплексно рассматриваются в качестве ориентира, определяющего особенности современного развития учреждений по работе с молодёжью. Анализ практик учреждений органов по делам молодёжи показывает, что преобладание экстенсивных признаков над интенсивным наращиванием конструктивных аспектов работы в молодёжной среде отличает современное состояние инфраструктуры молодёжной политики.

Ключевые слова: управление, социальное управление, социология управления, социология молодёжи, социальная политика, молодёжная инфраструктура.

Сегодняшнее состояние молодёжной политики характеризуется активизацией внимания государства и гражданского общества к социальным субъектам, имеющим непосредственное отношение к молодёжи, проблемам социализации юношей и девушек, а также осуществляющим многофункциональную и многопрофильную профессиональную деятельность в молодёжной среде. Видится несколько причин усиления позиций молодёжной политики и её субъектов в связи с включением ряда проблемных аспектов социального функционирования современных молодых людей в число приоритетов социальной политики российского государства. Молодёжная среда аккумулирует значительный спектр социальных проблем, которые масштабно отражают социально-экономическое неблагополучие российского общества и препятствуют своевременной социализации юношей и девушек, необходимой для их социального становления в качестве субъектов самостоятельной жизнедеятельности. Очевидно, что важной стороной государственной политики остаётся деятельность по разработке и реализации срочных комплексных мер в связи с необходимостью преодоления всех видов неблагополучия в молодёжной среде.

Признание определяющей роли молодого поколения в трансформации экономического, политического и культурного развития страны, обязательности вклада молодых людей в осуществление ближних и среднесрочных перспектив развития государства и общества означает приоритетность субъектных качеств молодёжи, включающих самостоятельность, инициативность и активность юношей и девушек. В этом случае государство действует в русле модернизационной стратегии, указанной в Концепции долгосрочного социально-экономического развития Российской Федерации на период до 2020 года. Создаваемый в обозначенном контексте комплекс соответствующих целевых ориентиров и практических конструкций направлен на формирование у молодых людей поведенческого ориентира на саморазвитие, самореализацию и самообеспечение, что требует значительной мобилизации интеллектуальных, профессиональных, физических, демографических и социокультурных ресурсов юношей и девушек.

Дифференцированное состояние молодёжной среды, преобладающий характер субъектных качеств молодых людей, определение молодого поколения в качестве основного ресурса социально-экономической, социально-политической и социокультурной трансформации обуславливают специфику государственных мер в отношении российской молодёжи и проблем жизнедеятельности юношей и девушек, которые можно представить в двух видах действий:

- в первом случае – помогающие или социозащитные;
- во втором – поддерживающие или инвестиционные.

Среди наиболее активных акторов, реализующих различные стратегии государственной политики по отношению к молодым гражданам страны, особое место отводится инфраструктуре молодёжной политики. Данный акцент был актуализирован на заседании Государственного совета Российской Федерации, посвящённого Году молодёжи, состоявшемся в июле 2009 года. Инфраструктура молодёжной политики, представляя область функционирования учреждений по работе с молодёжью, профильных организаций и служб, относится к числу наиболее интенсивно развивающихся современных ценностно-ориентированных социальных структур, имеющих место в социальной сфере российского общества. Специфичным образом организованная социальная структура, предназначенная для социализации юношей и девушек, решения проблем молодёжной группы российского социума в рамках государственных мер и общественных инициатив, инфраструктура молодёжной политики складывается как поэлементная система, функционирующая в виде сети учреждений органов по делам молодёжи.

Определение инфраструктуры молодёжной политики в роли современной социальной системы, целостность которой обеспечивается теснотой взаимосвязи, характером взаимодействия входящих в её состав элементов, раскрывает специфику интеграции сети региональных и муниципальных учреждений, различие которых проявляется в практиках работы в молодёжной среде. Следовательно, инфраструктура объединяет вариативные социальные практики учреждений по работе с молодёжью и придаёт им общие черты. Общность учреждений обеспечивается единым компонентным содержанием инфраструктуры молодёжной политики, каждый из которых находит своё проявление в поэлементном составе рассматриваемой социальной структуры:

- нормативный правовой (законодательные акты и нормативные документы, определяющие специфику организации и функционирования сети учреждений по работе с молодёжью);
- организационный (типология сети учреждений органов по делам молодёжи);
- содержательно-технологический (направления работы, концептуальные установки, методы, техники, формы, средства помощи, поддержки, содействия, сопровождения молодых людей по вопросам жизнедеятельности в социуме);
- ресурсный (финансовое, материальное, техническое, информационное, кадровое оснащение учреждений по работе с молодёжью).

Разнообразие учреждений обусловлено выбором того или иного направления профессиональной деятельности, проявляющегося в комплексе форм, средств, условий работы с молодёжью. Присутствие общих качеств позволяет учреждениям транслировать сходные функции в связи с реализацией целей и задач по преобразованию молодёжной группы российского социума, обусловленных федеральными приоритетами и региональными установками молодёжной политики.

Концепцию развития учреждений органов по делам молодёжи субъектов Российской Федерации можно рассматривать в роли механизма социального управления инфраструктурой молодёжной политики. Представляя собой некий ориентир, Концепция включает понятия, принципы, параметры, условия, показатели и способы оценки, опираясь на которые региональные и муниципальные учреждения могут строить на типовой основе работу в молодёжной среде, сохраняя при этом разнообразие социальных практик, интегрированных в состав инфраструктуры молодёжной политики. Следовательно, Концепция определяет не только процессуальные характеристики и результирующие показатели деятельности учреждений органов по работе с молодёжью. Общая целенаправленность Концепции связана с созданием условий, обеспечивающих развитие элементов инфраструктуры, по отношению к которым осуществляются социально-управленческие функции, интегрирующие их в институциональный состав государственной молодёжной политики субъектов Российской Федерации.

В реализации Концепции принимают участие социальные субъекты, профессиональная сфера которых связана с деятельностью учреждений по работе с молодёжью или непосредственно с молодёжной группой регионального социума. В основу реализации Концепции положена трёхуровневая система взаимодействия государственных и государственно-общественных структур, осуществляющих работу с молодёжью на федеральном, региональном и местном (муниципальном) уровнях, на каждом из которых определяются, конкретизируются и реализуются цели, а также решаются соответствующие специфические задачи и имеется достаточное ресурсное обеспечение.

Изучение специфики современного состояния социальных практик работы в молодёжной среде показывает, что в области молодёжной политики имеют место противоречия, сложившиеся в результате инициативного развития учреждений в субъектах Российской Федерации:

- стратегическая линия на увеличение числа региональных и муниципальных учреждений по работе с молодёжью сопровождается их слабой ориентированностью на потребности юношей и девушек в саморазвитии, самореализации в связи с особенностями жизнедеятельности молодых людей в региональных социально-экономических и социокультурных условиях;
- наращивание темпов в виде значительного количества направлений, числа услуг и охваченных ими юношей и девушек сопряжено с недостатком внимания к вопросам качества профессиональной деятельности и оценки результативности работы в молодёжной среде.

Противоречия позволяют констатировать, что учреждения, находящиеся в режиме саморазвития, в большей степени ориентированы на экстенсивный путь развития, чем на интенсивное наращивание конструктивных аспектов в работе с молодёжью.

Изменить сложившуюся ситуацию возможно при помощи *концептуальных установок*, которые:

- позволят развивать профессиональную деятельность по общим или типовым параметрам в русле тенденций становления и приоритетов развития инфраструктуры молодёжной политики;
- обеспечат сохранение видового, содержательного, технологического и ресурсного своеобразия учреждений, отражающих многие потребности молодёжи в связи с дифференцированным состоянием и различным положением молодых людей в системе социальных отношений.

Нормативное правовое обеспечение деятельности учреждений по работе с молодёжью ориентировано в значительной степени на современный этап развития молодёжной политики и, соответственно, её инфраструктуры. Тем не менее, практически в каждом документе имеются аспекты, которые не были внедрены в практику молодёжной политики, не потеряли своей актуальности из-за остроты нерешённых проблем российской молодёжи и могут использоваться при разработке и реализации Концепции.

Федеральный уровень представлен документами, определяющими развитие молодёжной политики как самостоятельной деятельности российского государства в связи с определением и реализацией системы приоритетов и мер, направленных на создание условий и возможностей для успешной социализации и эффективной самореализации молодёжи с учётом её вклада в социально-экономическое и социально-культурное развитие страны. На федеральном уровне развитие учреждений органов по делам молодёжи определяется следующими нормативными правовыми документами, раскрывающими сущность отношений российского государства, молодёжи и гражданского общества. *Региональный уровень* обеспечивается комплексом нормативных правовых документов, в которых определяются базовые основы разработки, условия и направления реализации молодёжной политики, а также ресурсные возможности субъекта по созданию условий для организации и функционирования учреждений по работе с молодёжью.

К числу принципов, раскрывающих общие подходы к организации работы с молодёжью в сети учреждений органов по делам молодёжи, относятся следующие установки. *Приоритетность* означает направленность учреждений на выбор и организацию работы по тем направлениям и аспектам, которые в большей мере отвечают состоянию молодёжной среды и потребностям юношей и девушек в связи с их дифференцированностью и расслоенностью по показателям и характеристикам социального развития. *Субъектная ориентированность* проявляется в восприятии молодых людей в трёх субъектных позициях: 1) как субъектов собственной жизнедеятельности; 2) как субъектов самостоятельного решения проблем по всем вопросам жизнедеятельности в социуме; 3) как субъектов деятельности учреждений по работе с молодёжью. *Инвестиционная направленность* выражается в социальном кредитовании государством молодёжи в процессе социализации в виде условных материализованных специальных мер поддержки инициатив молодёжи, талантливых юношей и девушек, оказания услуг по профориентации и трудоустройству, обучения молодых родителей и т. д. *Доступность* реализуется в обеспечении равного доступа молодёжи к услугам учреждений, а также в расширении возможностей при получении широкого комплекса поддерживающих мер для молодёжи, которая испытывает трудности в процессе жизнедеятельности. *Эффективность работы с молодёжью* представляет качественную характеристику деятельности учреждений, которая отражает измеряемую на основе специфических показателей степень соответствия поставленных целей и достигнутых результатов деятельности по решению проблем, имеющих место в молодёжной среде. *Согласованность действий* на разных уровнях реализации молодёжной политики формирует общую стратегическую линию и организационные подходы к функционированию инфраструктуры как системы государственных и муниципальных учреждений органов по делам молодёжи, выполняющих полифункциональную деятельность в целях социальной адаптации юношей и девушек, их интеграции в социально-экономическую, общественно-политическую и культурную жизнь страны, региона, муниципального образования.

Демонстрируемый в Концепции спектр направлений развития учреждений органов по делам молодёжи позволяет составить целостное представление об общих путях их организационного и функционального обеспечения, которые, по своей сути, придают сходство основным элементам, образующим инфраструктуру молодёжной политики. Не менее существенное значение Концепция приобретает в связи с тем, что разработанные в ней параметры развития учреждений по работе с молодёжью отвечают установкам федерального центра в связи с ориентацией государственной молодёжной политики на «модернизацию сети региональных и муниципальных учреждений органов по делам молодёжи». Инструментальная роль Концепции видится в возможности применения предлагаемых типовых решений в разных вариантах: для полного преобразования, частичного корректирования или незначительного уточнения некоторых аспектов деятельности учреждений органов по делам молодёжи.

Важнейшим требованием в этом случае является сохранение нетрадиционных подходов или инновационных форм работы в молодёжной среде, которые уже транслируются в социальных практиках значительного числа региональных (государственных) учреждений, имеющих опыт работы молодёжью. Современное состояние инфраструктуры молодёжной политики обусловлено необходимостью применения общих подходов к развитию элементов, образующих её целостность как микроструктурного образования, представляющего собой «сеть связей между основными элементарными составляющими социальной жизни, то есть таковыми, которые с точки зрения социологии рассматриваются как конечные и далее неделимые» [1]. Инфраструктура за постсоветский период получила развитие в большей части субъектов Российской Федерации, что стало возможным благодаря институционализации молодёжной политики как одного из наиболее актуальных и перспективных направлений развития отечественной социальной политики. Несмотря на экстенсивный характер преобразований инфраструктуры, проявившийся в количественном увеличении числа учреждений по работе с молодёжью, направлений профессиональной деятельности, а также привлечённой к

ним молодёжи – задача интенсивного наращивания многих аспектов работы с молодёжью в полном объёме не была решена. При разработке Концепции развития органов по делам молодёжи учитывалось не только состояние сети учреждений по работе с молодёжью, но и возможности инфраструктуры молодёжной политики в части преобразования профессиональной деятельности в молодёжной среде. Одной из определяющих позиций стало следование объективной необходимости не количественного, а результативного воздействия на проблемы и вопросы жизнедеятельности юношей и девушек в региональной среде.

Концепция рассматривается в виде обобщённого ориентира, позволяющего составить представление о путях построения работы в молодёжной среде при обязательном сохранении разнообразия социальных практик учреждений, интегрированных в виде элементов в состав инфраструктуры молодёжной политики.

Одним из существенных вопросов, связанных с внедрением Концепции в практики региональных и муниципальных учреждений инфраструктуры молодёжной политики субъектов Российской Федерации, становится выбор условий её реализации.

Условиями реализации Концепции являются источники, обеспечивающие достижение целей и решения задач по всем обобщённым направлениям развития учреждений:

- 1) в области организационного обеспечения деятельности учреждений органов по делам молодёжи;
- 2) в области обеспечения функционирования учреждений по основным направлениям реализации молодёжной политики;
- 3) в области управления учреждениями и координации деятельности всех субъектов инфраструктуры молодёжной политики.

Представляется, что в результате реализации направлений у всех акторов, задействованных в преобразовательных процессах, будут происходить изменения:

- для сети учреждений по работе с молодёжью – постепенное интегрирование в инфраструктуру молодёжной политики;
- для инфраструктуры – укрепление взаимосвязей между образующими её структуру элементами (региональными и муниципальными учреждениями) и усиление её организационного и функционального обеспечения при одновременном развитии компонентного состава (нормативного правового, организационного, содержательно-технологического и ресурсного);
- для органов по делам молодёжи – развитие внутренних (учреждения, органы по делам молодёжи и молодёжь) и внешних сетевых взаимодействий (учреждения и ведомства социальной сферы, молодёжные организации, негосударственные некоммерческие учреждения по работе с молодёжью) при одновременном усилении и централизации управленческого ресурса инфраструктурой на всех уровнях реализации молодёжной политики (федеральном, региональном и муниципальном).

Определяющим условием реализации основных аспектов Концепции рассматривается наличие совокупности базовых ресурсов, без которых невозможна деятельность любой социальной структуры, распространяющей свою деятельность на другие социальные субъекты, функционирующие в современной социальной сфере.

Ресурсный потенциал реализации Концепции представлен источниками, необходимыми для создания профессиональной, информационной, материальной среды, при помощи которой работа с молодёжью в специализированных учреждениях будет развиваться в виде многофункциональной деятельности, ориентированной на разнообразные виды и формы помощи, поддержки, сопровождения юношей и девушек по наиболее востребованным вопросам их жизнедеятельности в современном обществе.

В состав основных видов ресурсов, обеспечивающих реализацию Концепции, включены: кадровые, информационные и материально-технические. *К кадровым ресурсам*, имеющим непосредственное отношение к организации работы в молодёжной среде, относятся:

- работники федеральных, региональных, муниципальных органов по делам молодёжи,

которые в рамках своих должностных полномочий и регламентов выполняют управленческие функции в связи с развитием в российском регионе сети учреждений по востребованным аспектам работы с молодёжью;

- работники региональных (государственных) и муниципальных учреждений органов по делам молодёжи, подготовленные к решению профессиональных задач в связи с оказанием юношам и девушкам широкого спектра услуг по основным направлениям работы в молодёжной среде.

Все рассматриваемые акторы имеют отношение к процессам социального управления инфраструктурой молодёжной политики, в контексте которой строятся отношения между управляющими и управляемой частями и характеризуются выполняемые ими роли при реализации Концепции. Федеральные, региональные и муниципальные органы по делам молодёжи выступают основным координирующим органом в сфере реализации молодёжной политики, принимают участие в реализации Концепции на позициях *первой управляющей подсистемы* в структуре социального управления инфраструктурой молодёжной политики. Учреждения, основным видом деятельности которых является работа с молодёжью, организационно включённые в состав инфраструктуры молодёжной политики, находятся в составе *второй управляющей подсистемы*. Региональные и муниципальные учреждения развивают субъект-субъектные и субъект-объектные отношения с молодёжью, позиция которой как *управляемой подсистемы* обусловлена её социально-статусными, социально-психологическими, социально-культурными характеристиками. В Концепции даётся поуровневое описание источников кадрового обеспечения молодёжной политики. Кадровое обеспечение учреждений инфраструктуры молодёжной политики реализуется на четвёртом уровне. В рамках формирования структуры кадрового потенциала организаций и учреждений по работе с молодёжью четвёртого уровня осуществляются следующие виды работ:

- организация мониторингов востребованности кадров по работе с молодёжью в организациях и учреждениях;
- становление специализированных подразделений по работе с молодёжью и формирование их кадрового резерва;
- формирование заказа на повышение их квалификации и переподготовку;
- информирование молодых работников об их правах и обязанностях и организация удовлетворения их потребностей в образовании, занятости, жилье, досуге, оздоровлении и т.п. [2].

Информационные ресурсы обеспечивают создание в учреждении единого коммуникационного пространства, способствующего централизации всех аспектов профессиональной деятельности, установлению социальных контактов и поддержке внешних связей с другими структурами, ведомствами и молодёжью. Активное использование информационных ресурсов в деятельности учреждений по работе с молодёжью предполагает развитие информационного компонента как самостоятельного направления деятельности учреждения:

- открытие в учреждении информационно-консультационной службы (отдела или сектора) с должностью специалиста по связям с общественностью;
- использование современных технологий и средств по созданию и трансляции информации для разных целевых групп молодёжи;
- налаживание деятельности по производству информационных продуктов (виртуальная и печатная продукция);
- создание и поддержка виртуальной системы информирования молодёжи о деятельности учреждений и об услугах сети учреждений инфраструктуры молодёжной политики;
- интенсивное подключение молодёжи к работе по созданию, применению и распространению актуальной информации средствами проектной, конкурсной деятельности.

Материально-технические ресурсы создают базовые институциональные условия для организации и функционирования учреждения. Вопросы материально-технического обеспечения включают:

- укомплектованность учреждений оборудованием общего назначения для функционирования учреждения как социальной организации, организующей работу с молодым населением;
- техническими средствами, необходимыми для деятельности служб, отделов в связи с их специализацией работы в молодёжной среде.

Другим, не менее актуальным условием реализации Концепции является обязательность проектирования результатов, на достижение которых ориентируют цель и задачи развития учреждений по работе с молодёжью.

Результаты представляют собой материализацию направлений развития элементов инфраструктуры в связи с организацией, функционированием учреждений, а также выполнением функций социального управления молодёжной политики со стороны органов по делам молодёжи.

Таким образом, среди результатов реализации Концепции можно выделить:

- промежуточные – в виде показателей, соответствующим основным параметрам по направлениям развития учреждений;
- конечные – в виде показателей, отражающих особенности изменений управляющей и управляемой подсистем инфраструктуры молодёжной политики.

Наиболее существенный обобщённый результат можно определить как достижение инфраструктурой состояния в виде структурно организованной и функционально обеспеченной социальной микросистемы, поэлементный состав которой демонстрирует многие социальные практики работы с молодыми людьми, проживающими в российских регионах.

Концепцию развития учреждений органов по делам молодёжи субъектов Российской Федерации необходимо рассматривать в роли механизма управления инфраструктурой, так как её содержание и способы реализации способствуют преобразованию институциональных характеристик региональной молодёжной политики, формируют многие практики работы с молодёжью, а также инициируют качественные изменения в молодёжной среде.

Библиографический список

1. Штомпка, П. Социология. Анализ современного общества: [пер. с пол. С.М. Червонной] / П. Штомпка. – 2-е изд. – М.: Логос, 2010. С. 142–143.
2. Концепция развития кадрового потенциала молодёжной политики в Российской Федерации // Развитие кадрового потенциала молодёжной политики в Российской Федерации: сборник нормативных правовых документов / автор-составитель Т.К. Ростовская. – М., 2009. С. 27–45.

*Дата поступления
в редакцию 17.10.2011*

M.F. Glukhova

PHILOSOPHICAL BELIEF OF KARL YASPERS AS EXISTENTIAL COMMUNICATION RESOURCE AND PEOPLE UNITING OPPORTUNITY

The article concerns with resources of infrastructure components reconstructing connected with regional and municipal youth social practice. The social work concerning youth is realizing within the Concept of youth department development. Basic terms and principles, main purposes and directions are discovered. They are described as modern youth department development orienteer. The analysis of youth social organs activity shows that the dominating of extensive way of development is evident.

Key words: steering, social steering, steering sociology, youth sociology, social politics, youth infrastructure.

МИКРОЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.Н. Шипунов, А.А. Гаврилов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИИ ДАТЧИКА УГЛОВЫХ УСКОРЕНИЙ

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложенная конструкция датчика угловых ускорений позволяет регистрировать низкий уровень входного сигнала и обеспечивает требуемые точностные характеристики. В статье проведено описание конструкции чувствительного элемента, построены структурная и функциональная схемы, на основании которых выведена передаточная функция.

Ключевые слова: чувствительный элемент, угловое ускорение, передаточная функция, уравнение Лагранжа, колебательное звено.

Для получения полной информации о движении различного рода объектов в современных навигационных системах, системах автоматического управления, телеуправления применяются датчики первичной информации (ДПИ).

Уровень сигнала линейного ускорения в разы превышает уровень сигнала углового ускорения, поэтому возникают сложности при создании датчика углового ускорения (ДУУ). Принимая во внимание быстрый рост технологий и усовершенствования измерительной техники в сфере ее быстродействия и миниатюризации, стало возможным изготавливать угловые акселерометры, способные регистрировать низкий уровень входного сигнала.

При выборе схемы построения датчика предпочтительней оказалась схема компенсационного типа с магнитоэлектрической обратной связью, так как в датчиках прямого измерения не обеспечиваются требуемые динамические характеристики, а датчики с электростатической ОС имеют низкий уровень компенсации внешнего воздействия, что с увеличением инерционной массы ЧЭ для повышения чувствительности приведет к увеличению статической погрешности устройства.

Проектируемый датчик состоит из чувствительного элемента (ЧЭ), сервисной электроники, располагающихся в герметичном корпусе с выводными контактами.

Чувствительный элемент содержит (рис. 1):

1) кристаллический элемент 1, выполненный по интегральным технологиям, представляющий собой подвижную обкладку, перемещающуюся на двух подвесах 3, находящихся на оси симметрии элемента;

2) 2 обкладки 5 из стекла ЛК-105, одна из которых образует вместе с подвижной обкладкой кристаллического элемента датчик угла, а посредством другой элемент крепится к корпусу всего датчика. Полигоны датчика угла образованы напылением слоя алюминия на стеклянную неподвижную обкладку.

3) 2 катушки, образующих с магнитными системами датчик момента 4. Катушки крепятся на кронштейн и устанавливаются на подвижную обкладку кристаллического элемента.

4) инерционное кольцо 2, содержащее элементы статической и динамической балан-

сировки (6 винтов), устанавливающееся непосредственно на подвижную обкладку кристаллического элемента.

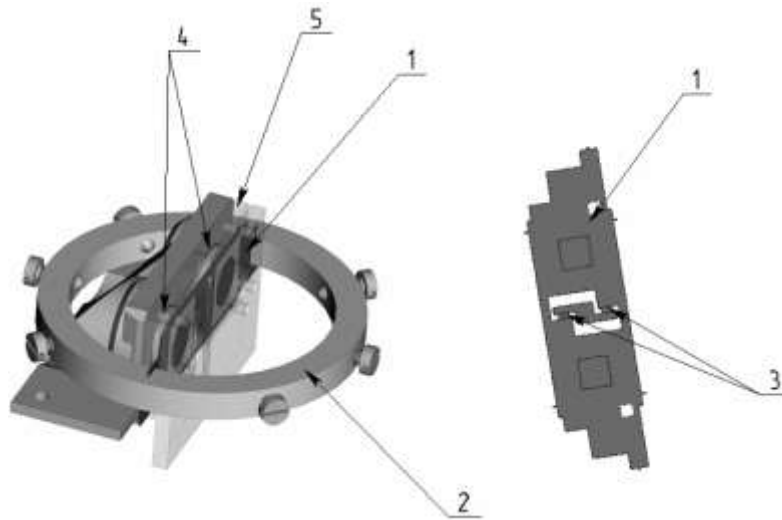


Рис. 1. Конструкция чувствительного элемента

Конструкция подвесов выполнена таким образом, чтобы при воздействии ускорений по неизмерительным осям перемещение инерционной массы не происходило. Подвес представляет форму параллелепипеда, геометрические параметры которого выбираются исходя из прочности при максимальном ударном воздействии, а также из условий наибольшей чувствительности элемента.

В конструкции чувствительного элемента предусмотрено инерционное кольцо, крепящееся к подвижной обкладке кристаллического элемента, поэтому масса кольца и его геометрические размеры будут непосредственно влиять на прочность подвесов и момент, вызываемый угловым движением ЧЭ.

Для оптимальной работы датчика момента, необходимо чтобы сила, вызываемая им для компенсации внешнего воздействия, не превышала силы, создаваемой датчиком момента в линейном акселерометре.

$$F_{AT} = m_{si} \cdot 20 \cdot g = 0,31 \cdot 10^{-3} \text{ кг} \cdot 20 \cdot 9,8 \frac{\text{м}}{\text{с}^2} = 0,062 \text{ Н} ,$$

где m_{si} - масса маятника чувствительного элемента акселерометра АТ1104.

Момент создаваемый данной силой в ЧЭ ДУУ:

$$M_x = F_{AT} \cdot l_{\phi} = 0,062 \text{ Н} \cdot 7,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} = 4,8 \cdot 10^{-4} \text{ Н} \cdot \text{м} ,$$

где l_{ϕ} - расстояние от центра чувствительного элемента до места расположения катушек датчика момента.

Момент, создаваемый инерционной массой ДУУ при воздействии углового ускорения, будет определяться моментом инерционного кольца, так как масса подвижной обкладки кристаллического элемента много меньше массы кольца.

Внутренний радиус кольца определяется исходя из размеров ЧЭ ДУУ: $r_{\text{вн}} = 16,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$, размеры сечения кольца примем 4мм×4мм.

Масса кольца с учетом массы регулировочных винтов, а также массы подвижного узла ЧЭ будет:

$$m = 2 \cdot \pi \cdot \rho_{Al} \cdot a \cdot b \cdot \left(r_{\text{вн}} + \frac{a}{2} \right) + m_{\text{винт}} + m_{\text{узел}} = 6,4 \cdot 10^{-3} \text{ кг} ,$$

где ρ_{Al} - плотность алюминия, из которого изготовлено кольцо; a, b - ширина и высота се-

чения кольца; $m_{\dot{\gamma} \dot{\delta}}$ - масса подвижного узла (подвижной обкладки); $m_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{\delta}}$ - масса регулировочных винтов; $m_{\dot{\gamma} \dot{\delta}} + m_{\hat{a}\hat{e}\hat{i}\hat{\delta}} \approx 1 \cdot 10^{-3} \hat{e}\hat{a}$.

Момент инерции кольца:

$$J_x = m \cdot r_{\hat{a}\hat{\delta}}^2 = 6,4 \cdot 10^{-3} \hat{e}\hat{a} \cdot (18,5 \cdot 10^{-3})^2 = 2,2 \cdot 10^{-6} \hat{e}\hat{a} \cdot \hat{i}^2,$$

где $r_{\hat{a}\hat{\delta}} = r_{\hat{a}\hat{\delta}\hat{\delta}} + \frac{a}{2}$ - средний радиус кольца.

Момент вызываемый инерционным кольцом при действии максимального углового ускорения:

$$M = J_x \cdot \ddot{\psi} = 2,2 \cdot 10^{-6} \cdot 42 = 0,91 \cdot 10^{-4} \hat{i} \cdot \hat{i},$$

где $\ddot{\psi} = \pm 42 \frac{\delta \hat{a} \hat{i}}{\hat{n}^2} = \pm 2400^\circ / \hat{n}^2$ - заданное угловое ускорение.

Данный момент удовлетворяет условию $\dot{I} \leq \dot{I}_x$.

При действии углового ускорения инерционная масса, подвешенная на «мягких» кремниевых упругих элементах, отклоняется от исходного положения. Это отклонение приводит к дебалансу емкостного моста.

Сигнал дебаланса усиливается по мощности и поступает в магнитоэлектрический преобразователь, который воздействует на инерционную массу с силой, равной по величине, но противоположной по направлению инерционной силе. При этом ток в преобразователе пропорционален дистанционному ускорению.

Функционально компенсационный акселерометр состоит из следующих частей: инерционной массы, включающей в себя кремниевую пластину с катушками датчика момента; упругого подвеса, газового демпфера, дифференциального емкостного преобразователя перемещения инерционной массы, усилителя, магнитных систем датчика момента.

Функциональная схема акселерометра изображена на рис. 2.

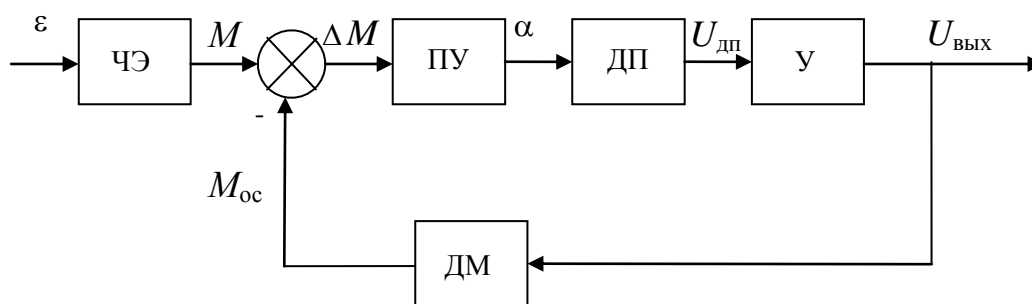


Рис. 2. Функциональная схема акселерометра

Для функциональной схемы: ЧЭ – чувствительный элемент, ПУ – подвижный узел, ДП – датчик перемещений (датчик угла), У – усилитель, ДМ – датчик момента, ε – измеряемое угловое ускорение, M – инерционный момент, M_{oc} – момент обратной связи, α – угол отклонения маятника от нейтральной, U_{дп} – выходное напряжение датчика угла, U_{вых} – выходное электрическое напряжение.

При действии измеряемого углового ускорения на чувствительный элемент возникает момент инерции M, который вместе с моментом обратной связи M_{oc} образуют сигнал ΔM, вызывающий перемещение подвижного узла ПУ на угол α. ПУ перемещается относительно обкладок измерительных емкостей датчика перемещений ДП. В результате изменения величины зазора между обкладками происходит изменение емкостей на выходе мостовой схемы, в которую они включены, появляется напряжение U_{дп}, которое затем проходит усилитель У,

преобразующий его в выходное напряжение датчика $U_{\text{ВЫХ}}$, сигнал которого используется в обратной связи.

На рис. 3 приведена структурная схема ДУУ.

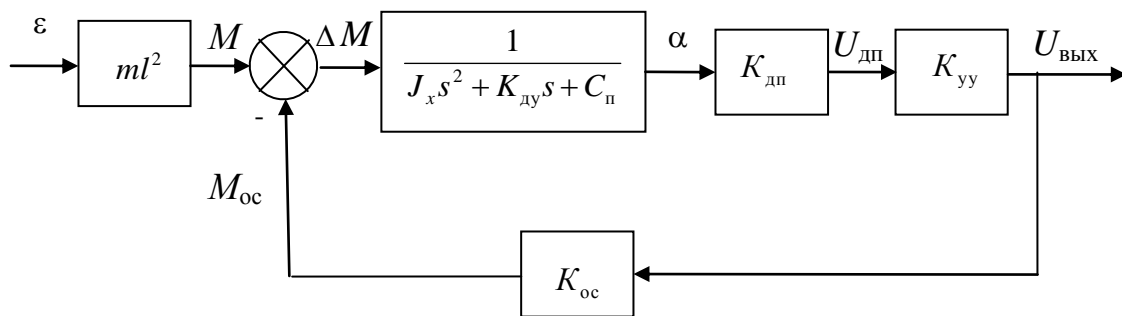


Рис. 3. Структурная схема акселерометра

В данном случае подвижный узел ЧЭ имеет одну степень свободы – угловое перемещение, поэтому система уравнений Лагранжа второго рода вырождается в одно уравнение:

$$\frac{d\partial T}{dt\partial\dot{\phi}} - \frac{\partial T}{\partial\phi} = Q_{\phi}, \quad (1)$$

где $T = \frac{mv^2}{2} + \frac{J_x\omega^2}{2}$ – кинетическая энергия чувствительного элемента, m – масса подвижного узла, $v = \dot{y}$ – линейная скорость центра масс ЧЭ, $\omega = \dot{\phi}$ – угловая скорость центра масс ЧЭ, J_x – момент инерции маятника относительно центра масс.

Кинетическая энергия определяется по следующей формуле:

$$T = \frac{m\dot{y}^2}{2} + \frac{J_x\dot{\phi}^2}{2}. \quad (2)$$

С учетом сил и момента газодинамического демпфирования углового движения ЧЭ, а также угловой жесткости упругого подвеса обобщенный момент можно выразить следующим образом:

$$Q_x = ml^2\varepsilon - K_{\text{дy}}\dot{\phi} - C_{\text{п}}\phi, \quad (3)$$

где ε – действующее угловое ускорение, $K_{\text{дy}}$ – абсолютный угловой коэффициент газодинамического демпфирования, $C_{\text{п}}$ – угловая жесткость подвеса.

Подставляя уравнения для кинетической энергии (2) и обобщенного момента (3) в исходное уравнение Лагранжа (1), получим:

$$\begin{aligned} ml^2\varepsilon - K_{\text{дy}}\dot{\phi} - C_{\text{п}}\phi &= J_x\ddot{\phi}, \\ J_x\ddot{\phi} + K_{\text{дy}}\dot{\phi} + C_{\text{п}}\phi &= ml^2\varepsilon. \end{aligned} \quad (4)$$

Уравнение можно записать в операторной форме:

$$(J_x s^2 + K_{\text{дy}}s + C_{\text{п}})\phi = ml^2\varepsilon, \quad (5)$$

где $s = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Передаточная функция подвижного элемента примет вид:

$$W(s) = \frac{\phi(s)}{\varepsilon(s)} = \frac{ml^2}{J_x s^2 + K_{\text{дy}}s + C_{\text{п}}}. \quad (6)$$

Выходное напряжение углового акселерометра можно выразить следующим образом:

$$U_{\text{вых}} = W(s) \cdot \varepsilon, \quad (7)$$

где $W(s)$ - передаточная функция акселерометра.

Запишем для данного ДУУ передаточную функцию в соответствии со структурной схемой:

$$W_{\text{дуу}}(s) = ml^2 \cdot \frac{1}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right)} \cdot K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{1}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right)} \cdot K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}}}. \quad (8)$$

Упростив данное выражение, получим:

$$W_{\text{дуу}}(s) = ml^2 \cdot \frac{K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}}}{\left(J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}\right) + K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}}}. \quad (9)$$

Приведем выражение (9) к нормированному виду, получим:

$$W_{\text{дуу}}(s) = \frac{k}{T^2 s^2 + 2\xi T s + 1}, \quad (10)$$

где k – статический коэффициент передачи, определяющийся следующим образом:

$$k = \frac{ml^2 \cdot K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}}}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}}}, \quad (11)$$

T – постоянная времени:

$$T = \sqrt{\frac{J_x}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}}}}, \quad (12)$$

ξ – относительный коэффициент газодинамического демпфирования, который можно определить из следующего выражения:

$$2\xi T = \frac{K_{\text{ду}}}{C_{\text{п}} + K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}}}. \quad (13)$$

Получим формулу для определения относительного коэффициента газодинамического демпфирования:

$$\xi = \frac{K_{\text{ду}}}{2T \cdot (C_{\text{п}} + K_{\text{дп}} \cdot K_{\text{уу}} \cdot K_{\text{ос}})}. \quad (14)$$

Определим передаточные функции отдельных звеньев углового акселерометра.

Передаточная функция чувствительного элемента (чувствительной к ускорениям массы) представляет собой безинерционное звено:

$$W_{\text{чз}}(s) = ml^2, \quad (15)$$

где m – масса маятника, l – плечо маятника.

Передаточная функция подвижного узла акселерометра представляет собой колебательное звено второго порядка:

$$W_{\text{пу}}(s) = \frac{1}{J_x s^2 + K_{\text{ду}} s + C_{\text{п}}}. \quad (16)$$

Здесь момент инерции маятника относительно оси качания определяется следующим образом [5]:

$$J_x = m \left(\frac{a_M^3}{3} + \frac{c_M^3}{12} \right), \quad (17)$$

где a_M - длина маятника, c_M - толщина маятника.

Угловой коэффициент газодинамического демпфирования в общем случае для прямоугольного подвижного узла выражается следующим образом:

$$K_{\text{до}} = \frac{\mu}{4h^3} \cdot \frac{a_1^5 b_1^3}{(a_1^2 + b_1^2)}, \quad (18)$$

где b_M - ширина маятника, h - зазор между подвижным и неподвижным узлами; μ - динамическая вязкость демпфирующего газа (для азота $\mu = 1,82 \cdot 10^{-5}$ Па·с).

Угловая жесткость одного упругого подвеса:

$$C_{\text{п1}} = \frac{E_{[100]} b_{\text{п max}} c_{\text{п}}^3}{6a_{\text{п}} (2 + a_{\text{п}} / l_{\text{цм}})} F(\lambda), \quad (19)$$

где $l_{\text{цм}}$ - расстояние от центра тяжести подвижной массы до жесткой заделки подвеса с корпусной пластиной (в данном случае $l_{\text{цм}} = l$), $E_{[100]} = 1,295 \cdot 10^{11}$ Н/м² - модуль упругости кремния для направления [100], $a_{\text{п}}$ - длина упругого подвеса, $c_{\text{п}}$ - толщина упругого подвеса, $F(\lambda)$ - функция, учитывающая кривизну обводов упругого подвеса, которая определяется следующим образом:

$$F(\lambda) = \frac{\sqrt{\lambda(1-\lambda)}}{(\arctg \sqrt{1/\lambda - 1})}, \quad (20)$$

здесь λ - отношение минимальной ширины подвеса к максимальной:

$$\lambda = \frac{b_{i \text{ min}}}{b_{i \text{ max}}}. \quad (21)$$

Так как подвижный узел качается на двух упругих элементах, то формула (19) для определения угловой жесткости примет вид (с учетом, что $l_{\text{цм}} = l$):

$$C_{\text{п}} = 2C_{\text{п1}} = \frac{E_{[100]} b_{\text{п max}} c_{\text{п}}^3}{3a_{\text{п}} (2 + a_{\text{п}} / l)} F(\lambda). \quad (22)$$

Перемещение подвижного узла измеряется датчиком перемещений, коэффициент передачи которого определяется из соотношений дифференциального моста:

$$C_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{h - \Delta h}, \quad (23)$$

где $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м - диэлектрическая постоянная, ε - диэлектрическая проницаемость среды заполнения (для азота $\varepsilon = 1,00058$), S - площадь обкладок измерительных емкостей, Δh - изменение зазора.

$$C_2 = \frac{\varepsilon_0 S}{h + \Delta h}. \quad (24)$$

Напряжение, снимаемое с датчика:

$$U_{\text{дп}} = \frac{C_2 - C_1}{C_2 + C_1} \cdot U_{\text{оп}}, \quad (25)$$

где $U_{\text{оп}}$ – опорное напряжение генератора.

Подставляя (23) и (24) в (25), получим напряжение на выходе моста [5]:

$$U_{\text{дп}} = \frac{\Delta h}{h} \cdot U_{\text{оп}}. \quad (26)$$

Коэффициент передачи датчика перемещений будет равен:

$$K_{\text{дп}} = \frac{U_{\text{дп}}}{\Delta h} \cdot l_{\text{дп}} = \frac{U_{\text{оп}}}{h} \cdot l_{\text{дп}}. \quad (27)$$

где $l_{\text{дп}}$ – длина датчика перемещений (в нашем случае $l_{\text{дп}} = l$).

Коэффициент передачи датчика момента выражается следующим образом:

$$K_{\text{ос}} = \frac{B \cdot L \cdot n \cdot l}{R_{\text{н}}},$$

где $B_{\text{р}}$ – индукция в рабочем зазоре магнитной системы, L – длина одного витка катушки, n – число витков катушки, $R_{\text{н}}$ – сопротивление нагузки.

Теоретически для углового акселерометра имеем передаточную функцию обыкновенного колебательного звена второго порядка. Параметры передаточной функции определяются из расчетов чувствительного элемента и электрической схемы с использованием исходных данных технического задания.

В настоящее время в приборостроении датчики угловых ускорений вызывают большой интерес, а исследование величины углового ускорения позволит решать новые, более сложные задачи военной и гражданской тематики. Разработка ДУУ создаст новый виток в развитии малогабаритных, более маневренных летательных объектов, а также более совершенных систем стабилизации.

Библиографический список

1. **Вавилов, В.Д.** Интегральные датчики / В.Д. Вавилов; НГТУ. – Н. Новгород, 2003. – 503 с.
2. **Вавилов В.Д.** Конструирование интегральных датчиков / В.Д. Вавилов, В.И. Поздьяев. – М.: Изд-во МАИ, 1993. – 68 с.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2011*

A.N. Shipunov, A.A. Gavrilov

DEFINITION OF TRANSFER FUNCTION OF THE GAUGE OF ANGULAR ACCELERATIONS

The offered design of the gage of angular accelerations allows to register low level of an entrance signal and provides demanded characteristics. In article the description of a design of a sensitive element is spent, structural and functional schemes on which basis transfer function is deduced are constructed.

Key words: sensor, the angular acceleration of the transfer function, the Lagrange equation, vibrational element.

УДК 629.7.05/06: 531.781.2 (075.8)

А.А. Гаврилов, А.Н. Шипунов

ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ ИЗМЕРЕНИЯ ИНТЕГРАЛЬНОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

ОАО АНПП «ТЕМП-АВИА», Арзамас

Предложен способ увеличения точности интегрального акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью без снижения диапазона и прочностных характеристик. Увеличение инерциальной массы нового акселерометра по сравнению с прототипом приводит к повышению точностных характеристик датчика. В статье произведено математическое обоснование данного способа, произведен расчет, подтверждающий диапазон измерения и прочностной расчет чувствительного элемента

Ключевые слова: акселерометр, структурная схема, упругий подвес, диапазон измерения, ударопрочность.

Постоянное совершенствование объектов управления, в том числе летательных аппаратов, инклинометров, боеприпасов требует постоянного улучшения и доработки датчиков первичной информации. Основными направлениями модернизации последних являются миниатюризация и повышение точностных характеристик.

В статье предложен способ повышения точностных характеристик интегрального акселерометра с магнитоэлектрической обратной связью АТ 1104-50 без снижения диапазона измерения и ударопрочности. Акселерометр состоит из двух герметичных объемов, в одном из которых находится маятниковый чувствительный элемент (ЧЭ), в другом – электронный преобразователь.

Структурную схему акселерометра можно представить в следующем виде:

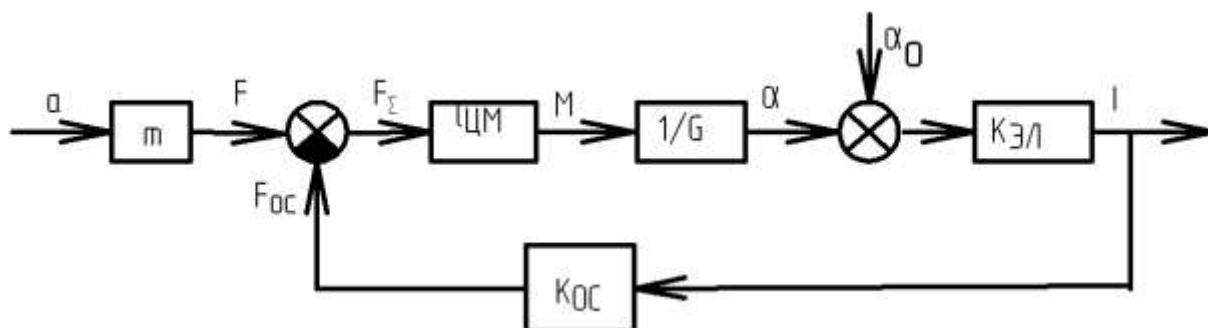


Рис. 1. Структурная схема акселерометра в статике

На схеме a – действующее ускорение; m – масса чувствительного элемента; F – инерционная сила; $l_{цм}$ – расстояние от оси подвеса до центра масс маятника; G – жесткость упругих подвесов; $K_{эл}$ – коэффициент усиления электронного преобразователя; $K_{ос}$ – коэффициент обратной связи датчика момента обратной связи (ДМОС); α – угол, на который отклоняется маятник при действии ускорения; α_0 – вредное возмущающее воздействие; I – выходной ток акселерометра.

Отношение выходного сигнала к действующему ускорению записывается:

$$\frac{I}{a} = \frac{m \cdot l_{цм} \cdot (1/G) \cdot K_{эл}}{1 + l_{цм} \cdot (1/G) \cdot K_{эл} \cdot K_{ос}}$$

Поскольку $l_{цм} \cdot (1/G) \cdot K_{эл} \cdot K_{ос} \gg 1$, то

$$\frac{I}{a} = \frac{m}{K_{OC}}.$$

Отношение вредного сигнала к действующему ускорению записывается:

$$\frac{I'}{\alpha_0} = \frac{K_{ЭЛ}}{1 + \frac{K_{ЭЛ} \cdot l_{ЦМ} \cdot K_{OC}}{G}} = \frac{G}{l_{ЦМ} \cdot K_{OC}}.$$

Погрешность датчика определится как отношение выходного сигнала, вызванного вредным возмущающим воздействием, к выходному к сигналу от полезного воздействия

$$\Delta = \frac{I'}{I} = \frac{G \cdot \alpha_0}{m \cdot a \cdot l_{ЦМ}}. \quad (1)$$

Из формулы (1) видно, что снижение жесткости упругих подвесов и увеличение чувствительной массы прямо пропорционально снижению погрешности.

Увеличение чувствительной массы ЧЭ нового акселерометра в 3 раза по сравнению с чувствительной массой ЧЭ АТ1104-50 приводит к снижению погрешности акселерометра в 3 раза, а именно, при нестабильности нулевого сигнала АТ1104-50 в 1,5 мг нестабильность нулевого сигнала нового акселерометра равна 0,5 мг.

Величина максимального ускорения акселерометра с ДМОС с параллельным соединением катушек определяется:

$$a_{MAX} = \frac{B \cdot I_{MAX} \cdot L_k}{2(m_{кр} + m_k) + M_M}, \quad (2)$$

где B – индукция в рабочем зазоре, Тл; L_k – длина провода в катушке, м; $m_{кр}$ – масса кронштейна, кг; m_k – масса катушки, кг; $M_M = 0.0504$ кг – масса маятника; I – максимальный ток, протекающий в катушках ДМОС, А.

Используя магнитную систему изделия АТ1108 (рис. 2) с измеренным значением индукции в зазоре $B = 0,37$ Тл, можно рассчитать число витков и массу катушки, для обеспечения диапазона измерения $a_T = 16$ g.

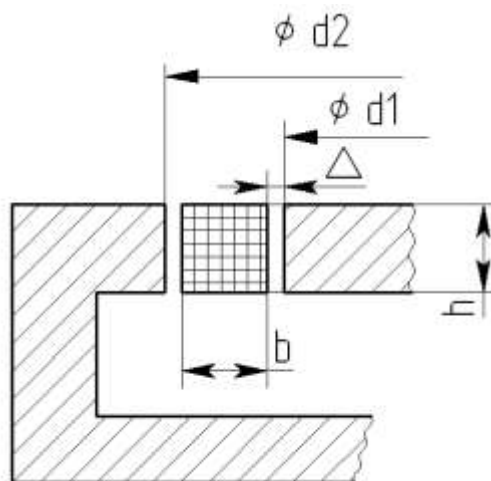


Рис. 2. Магнитная система АТ1108

Диаметр провода ПЭТР – 155 0,04 по ТУ 16-705.048-78 $d_{max} = 0,051$ мм.

Число витков в катушке определяется:

$$N = \frac{h}{d_{\max}} \cdot \frac{b}{d_{\max}} = \frac{1}{0,051} \cdot \frac{0,75}{0,051} = 14 \cdot 19 = 266 \text{ витков,}$$

где h, d_{\max}, b - геометрические размеры магнитной системы, мм.

Средний диаметр катушки определяется:

$$D_{\text{cp}} = d_1 + 2\Delta + \frac{2 \cdot h_k}{2} = 8 + 2 \cdot 0,25 + \frac{2 \cdot 14 \cdot 0,051}{2} = 9,214 \text{ мм.}$$

Средняя длина одного витка:

$$L_{\text{cp}} = 3,14 \cdot D_{\text{cp}} = 3,14 \cdot 9,214 = 28,93 \text{ мм.}$$

Длина провода в катушке:

$$L_k = N \cdot L_{\text{cp}} = 266 \cdot 28,93 = 7,7 \text{ м.}$$

Масса катушки определится:

$$M_k = m_{\text{ПЭТР}} \cdot L_k = 7,7 \cdot 12 \cdot 10^{-6} = 92,4 \cdot 10^{-6} \text{ кг.}$$

где $m_{\text{ПЭТР}}$ - масса 1 метра провода ПЭТР – 155 0,04, кг.

Учитывая максимальную массу катушки и требуемую крутизну выходного сигнала $K_i=3$ мА/г, можно рассчитать максимальную массу кронштейна, на которую устанавливается катушка.

Крутизна выходного сигнала определится:

$$K_i = \frac{I_{\max}}{a_{\max}}, \quad \text{отсюда } I_{\max} = K_i \cdot a_{\max}, \quad (3)$$

Подставим формулу (2) в формулу (3):

$$a_{\max} = \frac{B \cdot K_i \cdot L_k \cdot a_{\max}}{2m_{\text{кр}} + 2m_k + M_K},$$

Отсюда масса кронштейна определится:

$$M_{\text{кр}} = \frac{B \cdot K_i \cdot L_k - 2m_k - M_K}{2} = 0,32 \cdot 10^{-3} \text{ кг,}$$

Максимальный допустимый ток, который может протекать в катушке ДМОС, при максимальном выходном напряжении $U_{\text{вых}} = 8$ В определится:

$$I_{\max} = \frac{U_{\text{Э}} - U_{\text{вых}}}{R_{K_{\Sigma}}},$$

где $U_{\text{Э}} = 11$ В – минимальное напряжение, выдаваемое ЭП.

Поскольку катушки соединены параллельно, то сопротивление катушки будет равно $R_k/2$.

$$I_{\max} = \frac{(U_{\text{Э}} - U_{\text{вых}})/2}{\gamma_{\text{ПЭТР}} L_k},$$

где $\gamma_{\text{ПЭТР}} = 14,23$ Ом/м – сопротивление 1 м провода.

$$I_{\max} = \frac{(11-8)/2}{14.23 \cdot 7.7} = 0.055 \text{ A,}$$

Максимальное ускорение равно:

$$a_{\max} = \frac{0,37 \cdot 0,055 \cdot 7,7}{2 \cdot 0,32 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 92,4 \cdot 10^{-6} + 0,05 \cdot 10^{-3}} = 17,8 \text{ g} > a_T.$$

Поскольку масса чувствительного элемента выросла в три раза, то в три раза уменьшится прочность конструкции.

Для подтверждения возможности увеличения чувствительной массы необходимо проверить на прочность (на срез) ЧЭ, который должен выдерживать ударную нагрузку 150 g.

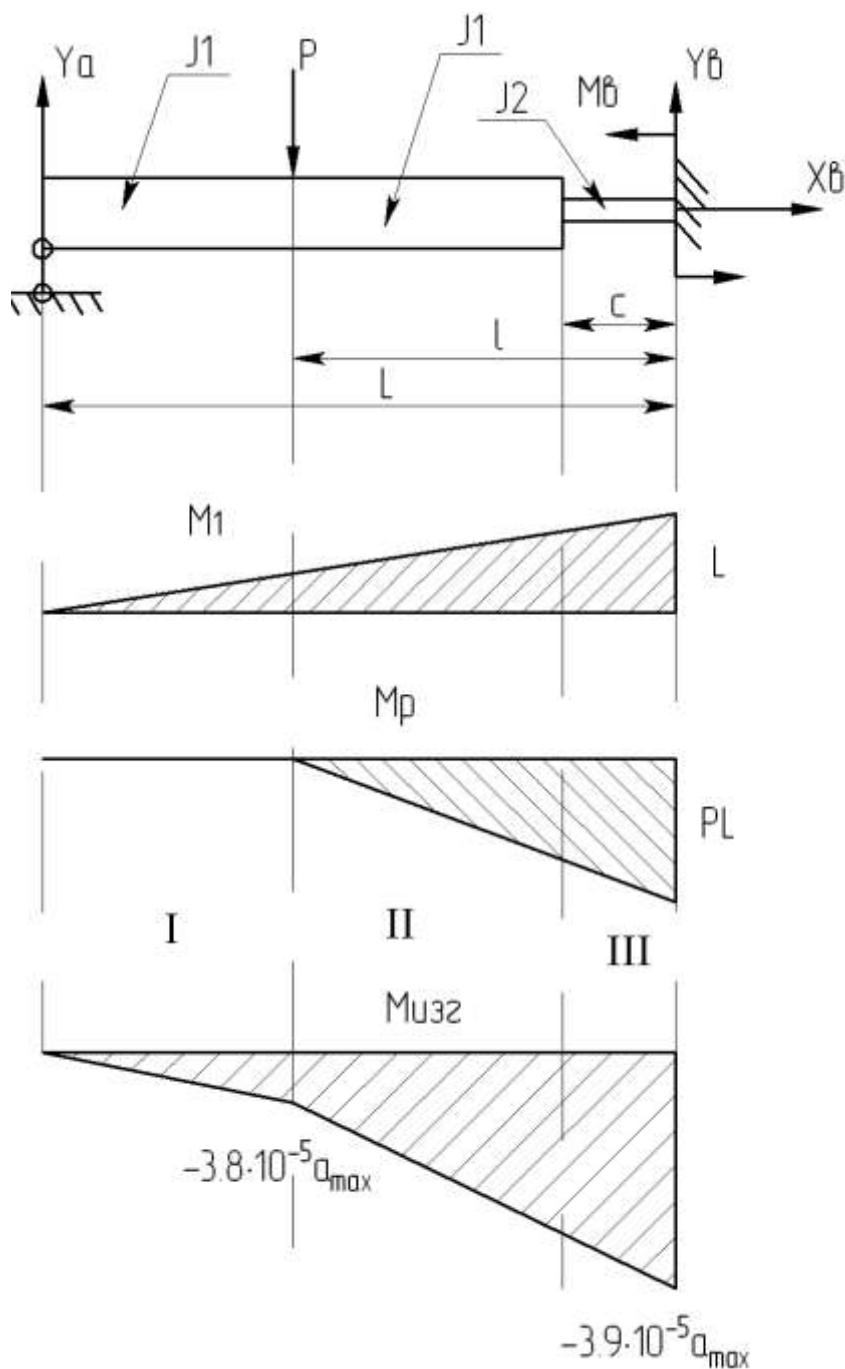


Рис. 3. Эпюры

Для формализации расчетов кристаллический элемент представим в виде балки (рис. 3), один конец которой консольно закреплен, а другой – ограничен в перемещении по одной оси.

Балка имеет одну трехсвязную (консольную) и одну односвязную (шарнирно-подвижную) опору. Статика для плоской системы сил дает три уравнения равновесия, следовательно, система один раз статически неопределима.

В качестве лишней связи примем опору А. Тогда лишней неизвестной является вертикальная сила Y_a . Каноническое уравнение системы имеет вид:

$$\delta_{11} \cdot Y_a + \Delta_{1P} = 0,$$

где δ_{11} - единичное перемещение; Δ_{1P} - грузовое перемещение.

Определение единичного и грузового перемещения будем вести методом Мора.

На рис. 3 построена эпюра изгибающих моментов (M_1) от действия единичной силы. Единичное перемещение найдем, вычислив интеграл Мора на каждом из трех участков балки:

$$\text{I. } M_1^I = x, \quad (x=0 \dots (L-l));$$

$$\text{II. } M_1^{II} = (L-l)+x, \quad (x=0 \dots (l-c));$$

$$\text{III. } M_1^{III} = (L-c)+x, \quad (x=0 \dots c).$$

$$\begin{aligned} \delta_{11} &= \frac{1}{EJ_1} \int_0^{L-l} x^2 dx + \frac{1}{EJ_1} \int_0^{l-c} (L-l+x)^2 dx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^c (L-c+x)^2 dx = \\ &= \frac{L^3 - 3L^2c + 3Lc^2 - c^3}{3EJ_1} + \frac{L^3}{EJ_2} - \frac{L^3 - 3L^2c + 3Lc^2 - c^3}{3EJ_2}. \end{aligned}$$

Аналогично определим перемещение от грузового момента (M_p):

$$\text{I. } M_p^I = 0;$$

$$\text{II. } M_p^{II} = Px, \quad (x=0 \dots (l-c));$$

$$\text{III. } M_p^{III} = P(L-c)+Px, \quad (x=0 \dots c).$$

$$\begin{aligned} \Delta_{P1} &= \frac{1}{EJ_1} \int_0^{l-c} (L-l+x)Pxdx + \frac{1}{EJ_2} \int_0^c (L-c+x)^2 Pdx = \\ &= \frac{P(-l^3 + 3lc^2 - 2c^3 + 3Llc + 3Lc^2)}{6EJ_1} + \frac{L^3P}{3EJ_2} - \frac{P(L^3 - 3L^2c + 3La^2 - c^3)}{3EJ_2}. \end{aligned}$$

С учетом геометрических размеров ЭК ($a=0,4 \cdot 10^{-3}$ м, $c=4,7 \cdot 10^{-3}$ м, $L=9,4 \cdot 10^{-3}$ м, $b=0,7 \cdot 10^{-3}$ м, $h=0,035 \cdot 10^{-3}$ м, $b_1=9 \cdot 10^{-3}$ м, $h_1=3,34 \cdot 10^{-3}$ м), получаем:

$$J_1 = \frac{b_1 h_1^3}{12} = \frac{(3,34 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 9 \cdot 10^{-3}}{12} = 2,94 \cdot 10^{-14} \text{ м}^4,$$

$$J_2 = \frac{bh^3}{12} = \frac{(0,035 \cdot 10^{-3})^3 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}{12} = 7,3 \cdot 10^{-18} \text{ м}^4,$$

$$\delta_{11} = 3,12 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Величина силы, действующей на подвижный узел, определяется:

$$P = m \cdot a,$$

где $m = 0,87 \cdot 10^{-3}$ – масса подвижного узла, кг; $a = 9,81 \cdot a_{\max}$ – ускорение, действующие на подвижный узел, g.

Перемещение от грузового момента:

$$\Delta_{P1} = 2,66 \cdot 10^{-5} a_{\max} \text{ м.}$$

Искомая вертикальная реакция Y_a равна:

$$Y_a = -\frac{2,66 \cdot 10^{-5} a_{\max}}{3,12 \cdot 10^{-3}} = -0,85 \cdot 10^{-2} a_{\max} \text{ Н.}$$

Знак минус указывает на то, что направление реакции выбрано неверно, Y_a направлена вниз.

Для статически определимой системы находим остальные реакции опор и строим эпюру изгибающих моментов $M_{\text{изг}}$ (рис. 3):

$$\begin{aligned} \Sigma M_B &= M_B + 8,52 \cdot 10^{-3} a_{\max} \cdot l - 0,85 \cdot 10^{-2} a_{\max} \cdot L = 0, \\ M_B &= a_{\max} (0,85 \cdot 10^{-2} \cdot L - 8,52 \cdot 10^{-3} \cdot l) = a_{\max} \cdot 3,9 \cdot 10^{-5} \text{ Н/м,} \\ \Sigma F_Y &= (0,85 \cdot 10^{-2} - 8,52 \cdot 10^{-3}) + Y_B = 0 \\ Y_B &= 0,03 \cdot 10^{-5} a_{\max} \text{ Н.} \end{aligned}$$

$$\text{III. } M_{\text{изг}}^{\text{III}} = -M_B = -3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max},$$

$$\text{II. } M_{\text{изг}}^{\text{II}} = -M_B + Y_B l = -3,8 \cdot 10^{-5} a_{\max},$$

$$\text{I. } M_{\text{изг}}^{\text{I}} = -M_B + Y_B L - Y_a l = 0.$$

По эпюре максимальный изгибающий момент в подвесах равен $M_x = 3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max}$.

Определим максимальное ускорение, которое может выдержать чувствительный элемент при ударной нагрузке. Момент сопротивления сечения:

$$W_x = \frac{bh^2}{6} = \frac{(0,035 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 1,4 \cdot 10^{-3}}{6} = 1,63 \cdot 10^{-11}$$

Напряжение, возникающее в сечении подвесов:

$$\sigma_x = \frac{M_x}{W_x} = \frac{3,9 \cdot 10^{-5} a_{\max}}{1,63 \cdot 10^{-11}} = 2,39 \cdot 10^6 a_{\max} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

С учетом допустимого напряжения кремния на срез $[\sigma_{cp}]$, условие прочности сечения подвесов примет вид:

$$1,5 \sigma_x \leq [\sigma_{np}].$$

где 1,5 – коэффициент, учитывающий ударный характер возмущающего воздействия.

Максимальное ударное ускорение, которое может выдержать ЧЭ:

$$a_{\max} = \frac{[\sigma_{np}]}{1,5 \sigma_x} = 195 \text{ g}.$$

Прочностной расчет доказывает возможность увеличения чувствительной массы в n раз, без снижения требований по ударпрочности (150 g). А это позволяет использовать приведенный выше вариант повышения точности акселерометра.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2011*

A.A. Gavrilov, A.N. Shipunov,

**INCREASE OF ACCURACY OF MEASUREMENT INTEGRATED GAGE
OF ACCELERATIONS**

The way of increase in accuracy integrated gage of accelerations with magnetoelectric feedback without decrease in a range and durability characteristics is offered. The increase in inertial weight of the new gage of accelerations in comparison with a prototype leads to increase gage characteristics. In article the mathematical substantiation of the given way is made, calculation a confirming range of measurement and calculation on durability of a sensitive.

Key words: accelerometer, the block diagram, an elastic suspension, measuring range, impact resistance.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК 53.072

В.М. Галкин, Л.Н. Ерофеева, И.Н. Толкачев

ЛОГИСТИЧЕСКОЕ ОТОБРАЖЕНИЕ: НЕКОТОРЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Исследуется с точки зрения R/S анализа логистического отображения $x_{n+1} = a(x_n - x_n^2)$ в интервале хаотичности $3,5699... < a < 1 + \sqrt{8}$. Экспериментально подсчитывается показатель Херста. Приводятся графики и таблицы, иллюстрирующие поведение последовательности $\{x_n\}$. Обнаружено странное поведение ее при $a = 3,74$, не похожее на стохастичность.

Ключевые слова: временной ряд, хаос, показатель Херста, бифуркация, окна периодичности.

Под логистическим отображением далее понимается разностное уравнение

$$x_{n+1} = a(x_n - x_n^2). \quad (1)$$

Если номер n в x_n трактовать как временную переменную, то уравнение может служить в механике примером динамической системы, в биологии описывает модель Ферхюльста роста численности популяции. Наконец, в экономике это пример временного ряда. Временные же ряды появляются при прогнозировании течения финансовых потоков, котировок акций на бирже и т. п.

Особый интерес представляет случай $a \in [0, 4]$, $x_1 \in [0, 1]$, в котором значения x_n при $n > 1$ не покидают интервал $[0, 1]$. Внимание исследователей привлекает поразительные свойства поведения последовательности $\{x_n / n \geq 1\}$ при указанных ограничениях. Отметим некоторые из них, в основном найденные Фейгенбаумом [1, 2].

1. В интервале $[0, 4]$ изменения параметра a выделяются непересекающиеся подинтервалы – так называемые «окна периодичности». Их можно перенумеровать нечетными числами. В m -окне динамические траектории асимптотически периодичны с периодами $m2^k$ ($k \geq 1$). В окне периодичности содержатся точки бифуркации такие, что при переходе через них период предельной траектории удваивается. Для 2 – окна в [1] приводятся следующие значения точек бифуркации

$$a/4 = 0,75; 0,86237...; 0,88602...; 0,8924728...; \quad (2)$$

Конец 2 – окна соответствует значению $a = 3,56994567...$. При $a < 1$ $\lim x_n = 0$, а при $1 < a < 3$ для почти всех траекторий $\lim x_n = 1 - \frac{1}{a}$.

В литературе авторы на методах вычислений точек бифуркаций обычно не останавливаются. Но, так или иначе, все алгоритмы должны использовать следующую идею: для тра-

ектории периода k имеет место система алгебраических уравнений

$$x_2 = a(x_1 - x_1^2), \quad x_3 = a(x_2 - x_2^2), \dots, \quad x_k = a(x_{k-1} - x_{k-1}^2), \quad x_1 = a(x_k - x_k^2) \quad (3)$$

и точка бифуркации есть нижняя грань значений a , при которых система (4) не имеет решений с меньшим периодом, т.е. среди x_1, x_2, \dots, x_k нет одинаковых.

В [5] система (4) изучалась при некоторых k . В частности, найдено, что траектории периода 2 появляются при $3 < a < 1 + \sqrt{6}$, 4 – траектории – при $1 + \sqrt{6} < a < 3,544090359\dots = \sqrt{1+4t}$, где t – корень уравнения 6-й степени

$$4096t^6 - 12288t^5 + 12032t^4 - 12032t^3 + 8432t^2 + 4913 = 0.$$

Начало 3 – окна есть $a = 1 + \sqrt{8}$ и ближайшая точка бифуркации, ведущая к удвоению периода, есть $a = 3,841499013\dots$ – корень уравнения

$$a^6 - 6a^5 + 4a^4 + 24a^3 - 14a^3 - 14a^2 - 36a - 81 = 0.$$

2. Длины интервалов между соседними точками бифуркаций асимптотически образуют геометрическую прогрессию со знаменателем $q = \frac{1}{f}$, где $f = 4,6669201609\dots$ – так называемая постоянная Фейгенбаума. Практическую ценность этого утверждения можно проиллюстрировать на примере 2-окна периодичности: его длина приблизительно равна $(a_2 - a_1)(1 + q + q^2 + \dots) = \frac{a_2 - a_1}{1 - q} \cong 0,1209$, где $a_1 = 1 + \sqrt{6}$ – начало 2 – окна, $a_2 = 3,544090\dots$ – ближайшая к a_1 точка бифуркации. Для конца 2 – окна получаем $a_1 + 0,1209 \approx 3,57$

3. В интервалах между окнами периодичности траектории демонстрируют хаотичность своего поведения. Именно это обстоятельство больше всего поражает в столь простой модели, как логистическая. Хаотичность проявляется в том, что траектории сильно зависят от выбора начального значения x_1 . Траектории, соответствующие «близким» начальным значениям, в дальнейшем становятся весьма отличающимися друг от друга. Приводимые в книгах рисунки (например, в [1]), на наш взгляд, не очень наглядно иллюстрируют хаотичность. На прилагаемых далее графиках свойство хаотичности проявляется более явно.

В этой статье логистическое отображение (1) рассматривается как временной ряд и исследуется с точки зрения так называемого R/S – анализа [4]. В R/S отправной точкой является

$$x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, \quad (4)$$

разумеется, не обязательно хаотический. Из его отрезка x_1, x_2, \dots, x_n строится конечная последовательность

$$y_1, y_2, \dots, y_n. \quad (5)$$

В ней $y_i = x_1 + x_2 + \dots + x_i - i\bar{x}$, $\bar{x} = \frac{1}{n}(x_1 + x_2 + \dots + x_n)$. Далее в (5) выделяются $M = \max_i y_i$ и $m = \min_i y_i$. Разность $M - m$ обозначается через R . Полагая

$S^2 = \frac{1}{n} \left[(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2 \right]$ составляем частное R/S . Собственно, R/S – анализ занимается изучением зависимости R/S от n [4].

Величину R/S ввел в 1951 году Херст, обрабатывая данные по разливам Нила за ряд лет. По-видимому, руководствуясь формулами из теории броуновского движения, Херст предположил, что при больших n имеет место следующая асимптотика

$$R/S \sim \text{const } n^h. \quad (6)$$

Показатель h принято называть показателем Херста. Из определения следует, что этот показатель принимает значение из интервала $[0,1]$.

В своей практике экономисты некритически используют для прогнозирования следующие утверждения относительно показателя h . Если члены временного ряда независимые случайные величины (т.е. фактически мы имеем дело с множеством реализаций некоторого случайного процесса), то $h = \frac{1}{2}$. Обратно, если при обработке экспериментальных данных получается

$h \approx \frac{1}{2}$, то считается, что члены временного ряда независимы. При $h > \frac{1}{2}$ прогнозируется тенденция к возрастанию членов временного ряда, когда таковая выявлена при наблюдении его отрезка.

При $h < \frac{1}{2}$ прогнозируется противоположная тенденция. Теоретическое изучение показателя Херста крайне затрудняется экзотическим выбором R/S в качестве статистики, резко отличающейся от классических полиномиальных (математическое ожидание, дисперсия и т.п.).

Эвристические соображения, на которых мы здесь не останавливаемся, приводят к

предположению, что асимптотики R/S и $D(y) = \frac{1}{2} \left[(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + \frac{\left(y_n - \frac{1}{y} \right)^2}{n} \right]$, ес-

ли они существуют и имеют вид (8), должны иметь один и тот же показатель h . Здесь $\bar{y} = \frac{1}{n}(y_1 + \dots + y_n)$. Если предположение верно, то показатель Херста должен быть равен нулю, если у временного ряда существует предел $\lim x_n$ или он асимптотически периодичен. Для логистического отображения это означает, что численные эксперименты следует проводить для интервалов хаотичности. В этой работе исследовался первый интервал хаотичности $3,5699 < a < 1 + \sqrt{8}$. Ниже приводятся иллюстрированные и графики и таблицы. Буквой b обозначен x_1 – начальный член логистического отображения.

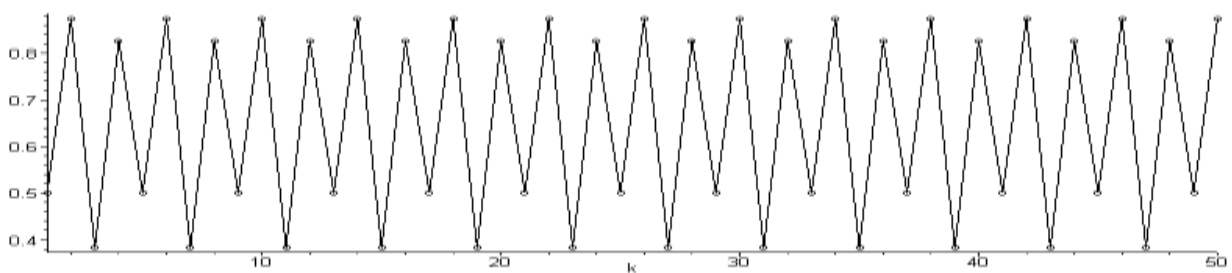


Рис. 1. ($a=3.5; n=50; b=0.5$)

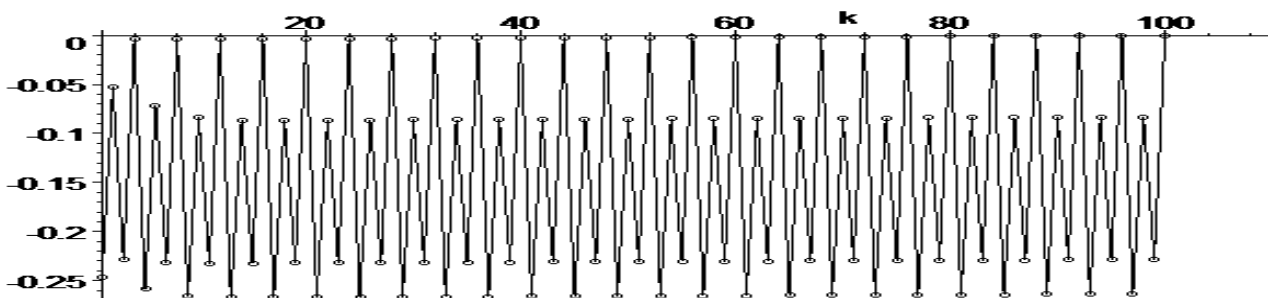


Рис. 2. ($a=3.5; n=100; b=0.4$)

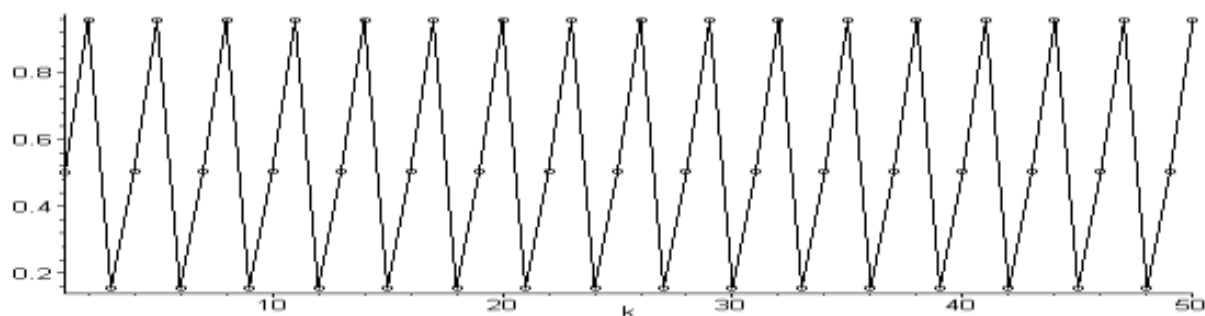
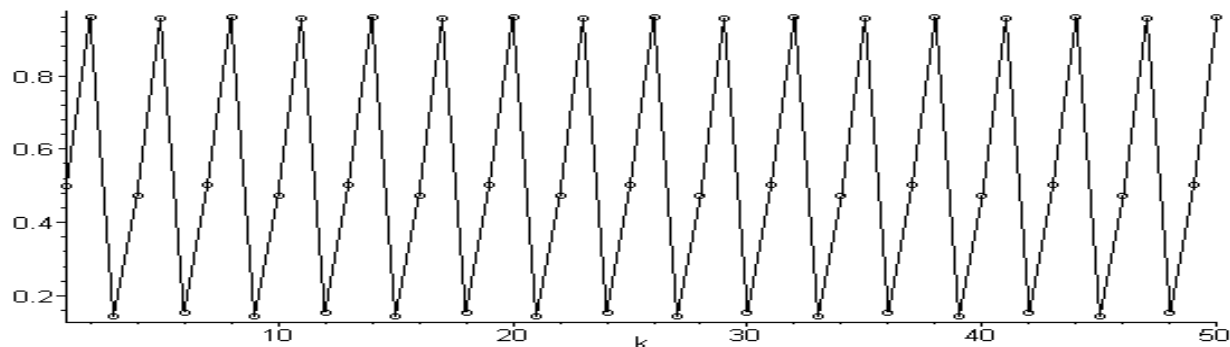
Рис. 3. ($a=3.83$; $n=50$; $b=0.5$)Рис. 4. ($a=3.845$; $n=50$; $b=0.5$)

Рис. 1–4 изображают типичные примеры графического изображения последовательности x_1, x_2, \dots, x_n для значений a из окон периодичности. Рис. 1 и рис. 2 иллюстрируют 4 -ю периодичность, рис. 3 и рис. 4 соответственно 3 - и 6 - периодичность.

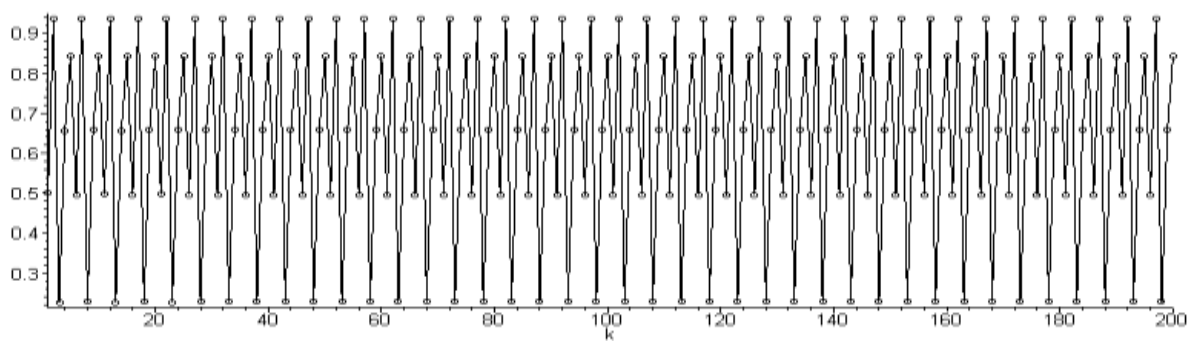
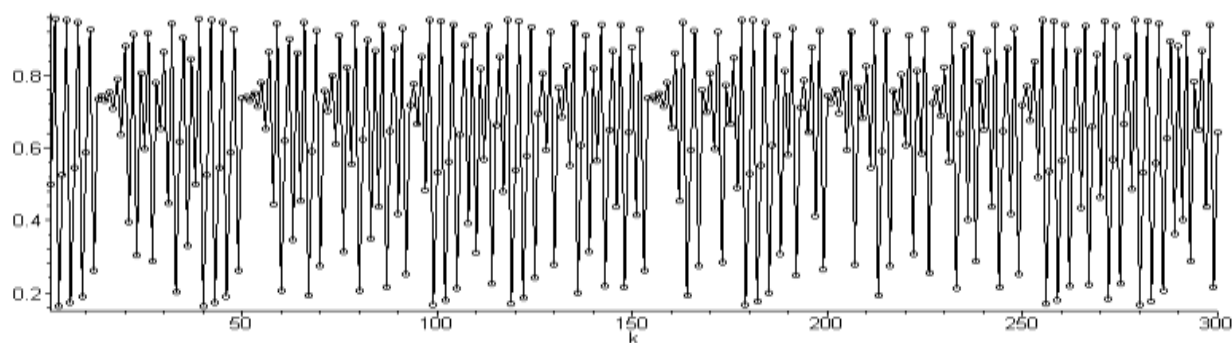
Рис 5. ($a=3.74$; $n=200$; $b=0.5$)Рис. 6. ($a=3.82$; $n=300$; $b=0.5$)

Рис. 6 демонстрирует хаотичность поведения последовательности x_1, x_2, \dots, x_n . Рис. 5 оказался для авторов совершенно неожиданным. Поскольку здесь $a = 3,74$ входит в интервал хаотичности, то следовало ожидать, что соответствующий график должен иметь то же характер, что и на рис. 6. Однако он скорее относится по типу к графикам рис. 1–4.

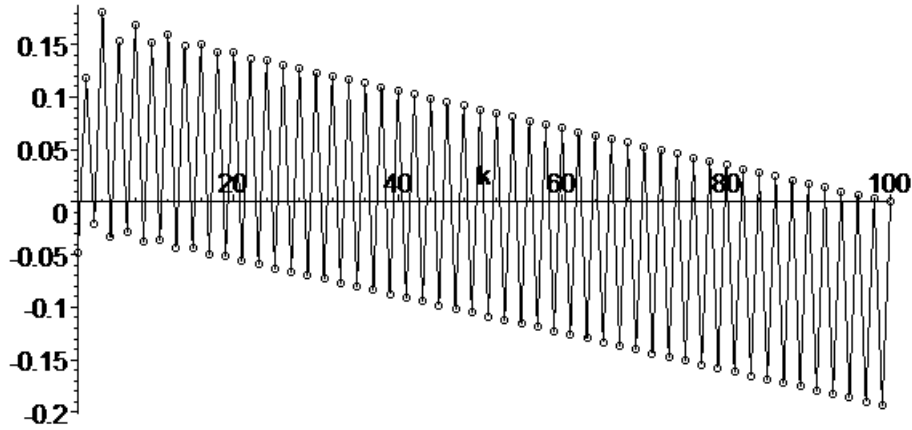


Рис. 7. ($a=3.4; n=100; b=0.6$)

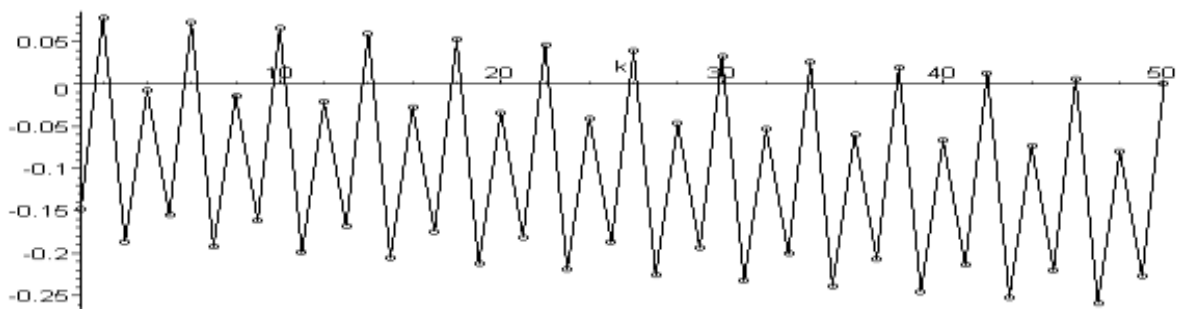


Рис. 8. ($a=3.5; n=50; b=0.5$)

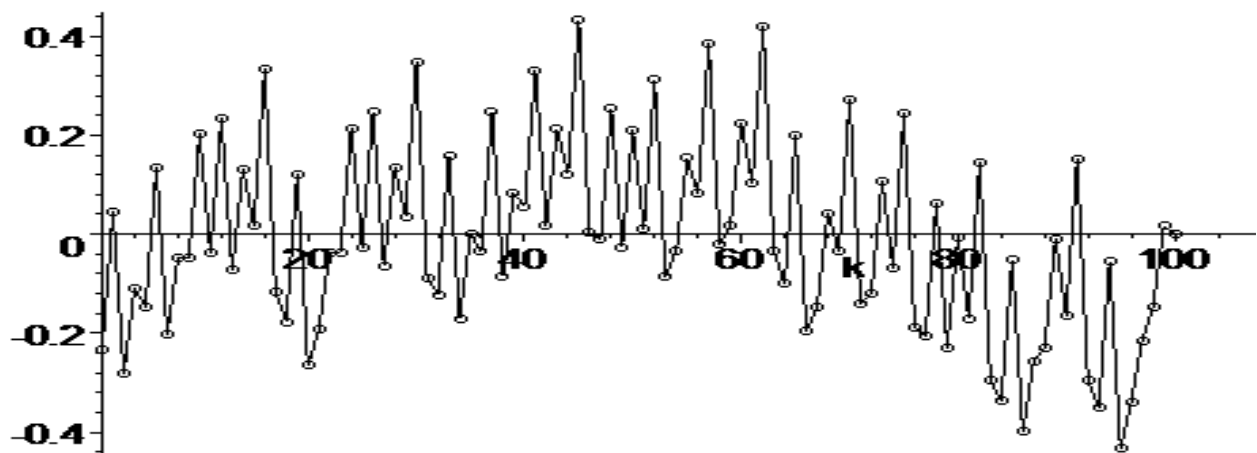


Рис. 9. ($a=3.8; n=100; b=0.4$)

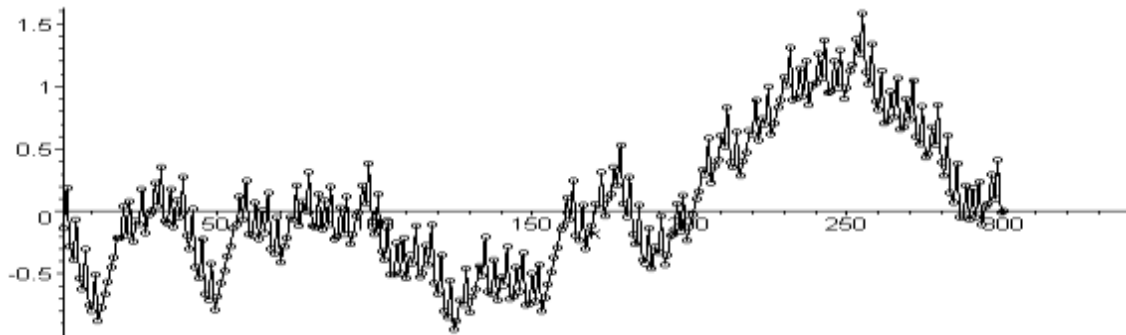


Рис. 10. ($a=3.82; n=300; b=0.5$)

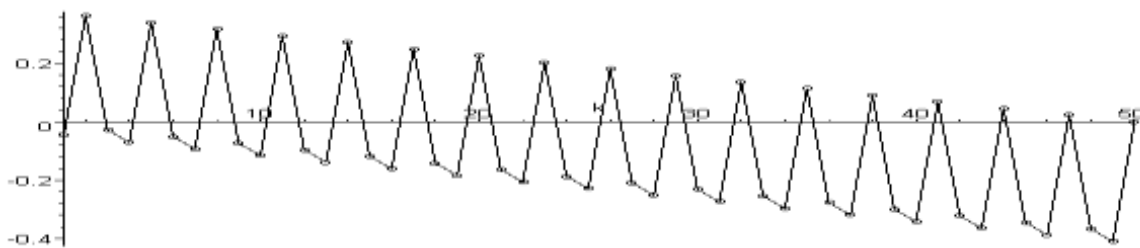


Рис. 11. ($a=3.83; n=50; b=0.5$)

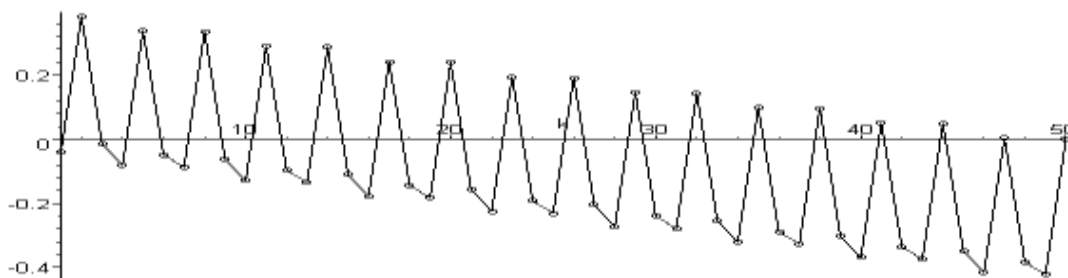


Рис. 12. ($a=3.845; n=50; b=0.5$)

Рис. 7–12 изображают последовательность y_1, y_2, \dots, y_n для различных $a, n, b = x_1$.

На них также хорошо видна разница между стохастическими траекториями и траекториями из окон периодичности.

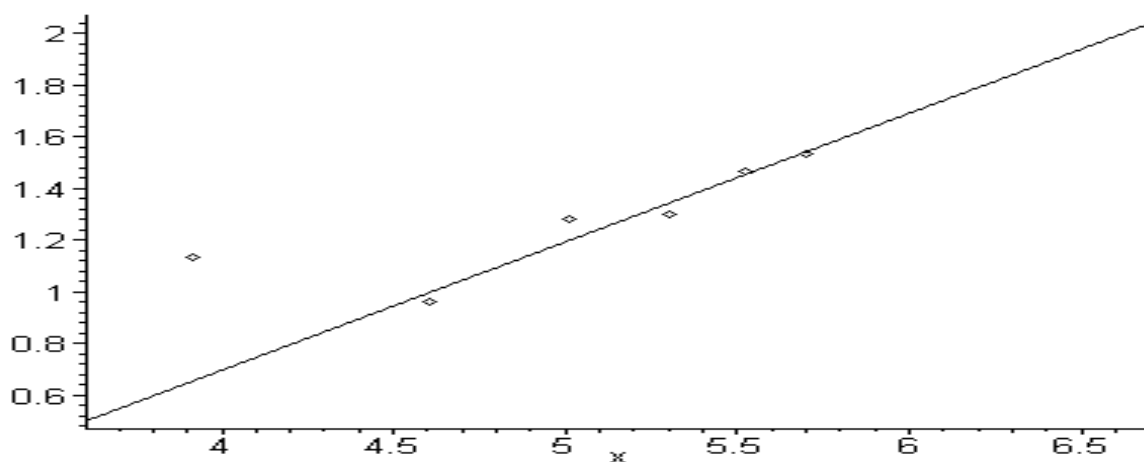


Рис. 13. ($b=0.4; a=3.66$)

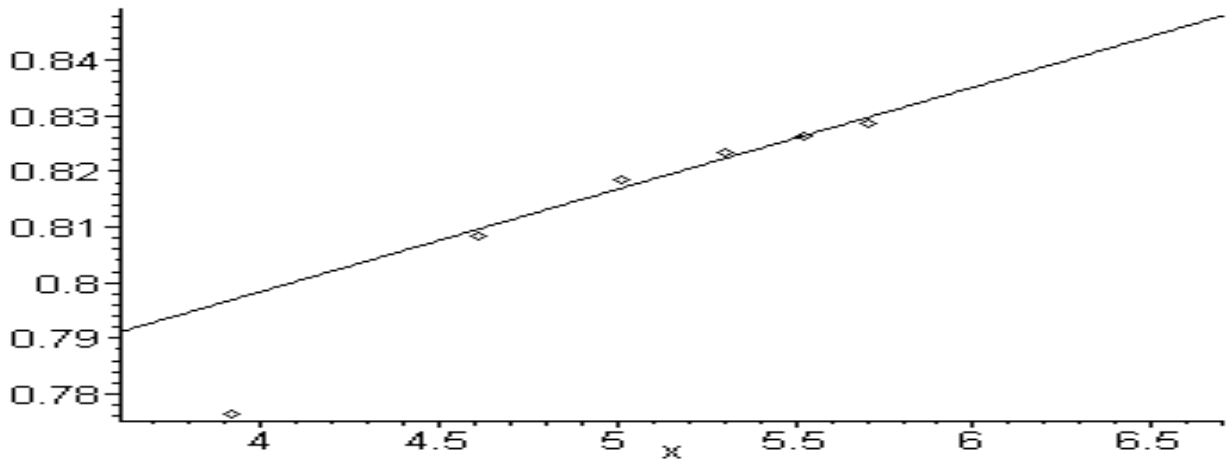


Рис. 14. ($b=0.4$; $a=3.74$)

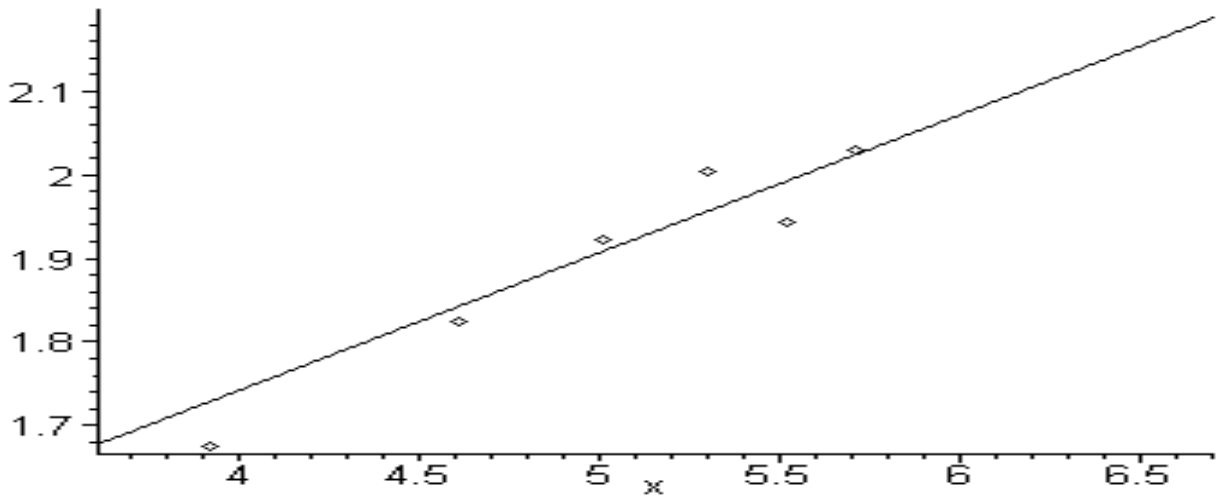


Рис. 15. ($b=0.4$; $a=3.78$)

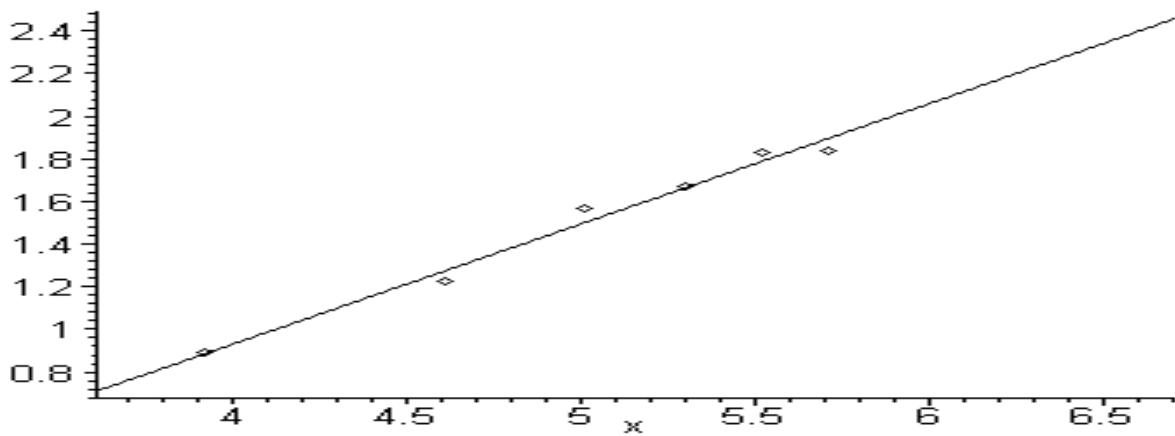
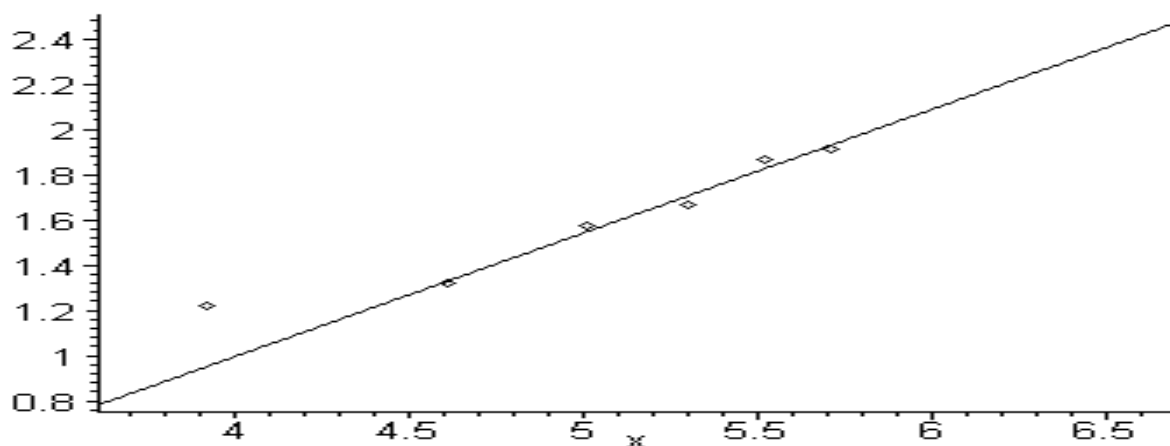


Рис. 16. ($b=0.4$; $a=3.8$)

Рис. 17. ($b=0.4$; $a=3.82$)

Уравнение линейной регрессии, получаемое при построении графиков из рис. 13–17 имеет вид $\ln\left(\frac{R}{S}\right) = h(a)\ln n + c$, в котором $h(a)$ и есть приближенное значение показателя Херста в предположении его существования.

Табл. 1, 2, 3 приводят эти значения. Здесь опять следует обратить внимание на случай $a = 3,74$, в котором $h(a) \neq 0$.

Таблица 1

Зависимость $h=h(a)$ ($b=0,4$)												
a	3,6	3,62	3,64	3,66	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76	3,78	3,8	3,82
h	0,254	0,335	0,212	0,497	0,193	0,352	0,277	0,018	0,274	0,165	0,564	0,546

Таблица 2

Зависимость $h=h(a)$ ($b=0,5$)												
a	3,6	3,62	3,64	3,66	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76	3,78	3,8	3,82
h	-0,232	0,323	0,327	0,257	0,614	0,128	0,521	0,162E-08	0,494	0,648	0,641	0,463

Таблица 3

Зависимость $h=h(a)$ ($b=0,6$)												
a	3,6	3,62	3,64	3,66	3,68	3,7	3,72	3,74	3,76	3,78	3,8	3,82
h	-0,393	0,027	0,121	0,327	0,154	0,293	0,271	-4,894E-04	0,258	0,211	0,461	0,395

Библиографический список

1. Берже, П. Порядок в хаосе. О детерминистском подходе к турбулентности / П. Берже, И. Помо, К. Видаль. – М.: Изд. «Мир», 1991.
2. Лихтенберг, А. Регулярная и стохастическая динамика / А. Лихтенберг, М. Либерман. «Меркурий Пресс». 2000.
3. Мун, Ф. Хаотические колебания / Ф. Мун. – М. Изд.: «Мир», 1990.

4. Петерс, Э. Фрактальный анализ финансовых рынков / Э. Петерс. – М.: Интернет – Трейдинг», 2004.
5. Галкин, В.М. Хаос и две задачи Рамануджана. Прогрессивные технологии в машино- и приборостроении / В.М. Галкин [и др.]. – Н. Новгород - Арзамасс, 2010.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2011*

V.M. Galkin, L.N. Erofeeva, I.N. Tolkachev

LOGISTIC MAPPING: SOME EXPERIMENTAL DATA

Logistic mapping $x_{n+1} = a(x_n - x_n^2)$ is investigating from the R/S – analysis viewpoint for $3,5699 < a < 1 + \sqrt{8}$. The Hurst's exponent is calculated experimentally. The graphics and the tables that are illustrating the behaviour of the sequence $\{x_n\}$ are given. Strange behaviour of the $\{x_n\}$ for $a = 3,74$ is discovered.

Key words: time series, Chaos, Hurst exponent, bifurcation, periodicity box.

УДК 523

О.Б. Щуко¹, С.Д. Щуко²

ЗАВИСИМОСТЬ СТРУКТУРЫ ВЕЩЕСТВА ТРАНСНЕПТУНОВОГО НЕБЕСНОГО ТЕЛА ОТ СОДЕРЖАНИЯ РАДИОНУКЛИДОВ

Научно-исследовательский радиофизический институт¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²

Для "ледяного" тела Пояса Койпера методами математического моделирования определено предельное содержание радионуклидов в аккреционном материале, обеспечивающее возможность существования тела в настоящее время и возможность образования в его недрах жидкого ядра H_2O .

Ключевые слова: математическое моделирование, Солнечная система, транснептуновые тела, радионуклиды, уравнение теплопроводности, фазовые переходы H_2O .

Постановка задачи

Для определения возможности существования в настоящее время жидкой воды в веществе транснептунового небесного тела исследуется методами математического моделирования процесс распространения тепла в неоднородном веществе сложной структуры.

В настоящей работе рассматривается сферически симметричное небесное тело в процессе его формирования за время θ и дальнейшего существования до настоящего времени τ .

На этапе формирования радиус тела $R(t)$ растет от радиуса R_0 , так называемого "зародыша", до современного его радиуса R_f за счет аккреции на поверхность вещества прото-солнечной туманности, состоящего из мелких пылевых частиц и тонко фракционированного конденсата H_2O в виде аморфного льда. В дальнейшем, в течение времени $(\tau - \theta)$, радиус тела не меняется.

Заметим при этом, что процесс распространения тепла в рассматриваемом теле определяется не только изменяющимися размерами тела, но и изменяющейся во времени интенсивностью внутренних источников тепла, а также зависящими от температуры физическими характеристиками вещества. Наличие льда H_2O в первичном веществе небесного тела может приводить к его структурным изменениям, определяемым различными фазовыми переходами H_2O .

Распространение тепла в веществе небесного тела

Постоянно действующим внешним источником тепла является инсоляция. Не умаляя общности рассуждений и выводов, можно положить, что параметры орбиты рассматриваемого небесного тела сохранялись постоянными с момента формирования до настоящего времени. В таком случае солнечная постоянная Q_{sun} и равновесная температура T_{eq} оставались также постоянными, определяющими температуру аккреционного вещества и тем самым температуру приповерхностных слоев формирующегося тела.

Постоянно действующим источником внутреннего тепла небесного тела являются радионуклиды ^{26}Al , ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U , содержащиеся в пылевых частицах аккреционного вещества.

Скорость генерации тепла $V_n(t)$ n -м радионуклидом ($n = \overline{1,5}$), распределенным в одном килограмме твердого пылевого вещества, определяется соотношением

$$V_n(t) = E_n \xi_n 2^{-t/\tau_n},$$

где τ_n – период полураспада n -го радионуклида, ξ_n – начальное ($t=0$) содержание его в одном килограмме пылевого вещества, E_n – генерация тепла одним килограммом нуклида за один год.

Тогда выражение для удельной мощности n -го радионуклида имеет вид

$$W_n(t) = V_n m_1,$$

где m_1 – удельная масса вещества твердых частиц, а общая удельная мощность радионуклидов

$$W(t) = \delta \sum_{n=1}^5 W_n(t), \tag{1}$$

где δ – параметр, определяющий моделируемое содержание нуклидов в твердом веществе аккреционного материала ($0 \leq \delta \leq 1$).

Это тепло являлось основной причиной изменения структуры вещества небесного тела за счет фазовых переходов H_2O вплоть до образования жидкой воды и ее нагрева.

Перенос тепла в сферически симметричном теле описывается дифференциальным уравнением относительно температуры небесного тела, $T = T(r, t)$. Здесь r – пространственная координата, отсчитываемая вдоль радиуса от центра тела $r = 0$, а t – временная координата, отсчитываемая от момента начала формирования тела $t = 0$.

Температура T тогда является решением нелинейной краевой задачи теплопроводности:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 k \frac{\partial T}{\partial r} \right) + W(t) - Q(r, T), \tag{2}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=R} = (1 - A) Q_{sun} - \varepsilon_{IR} \sigma T^4, \tag{3}$$

$$k \frac{\partial T}{\partial r} \Big|_{r=0} = 0, \tag{4}$$

$$T(r, 0) = T_{eq}. \tag{5}$$

Здесь $0 \leq r \leq R$, $R_0 \leq R \leq R_f$, $0 \leq t \leq \tau$, ρ – плотность, c – эффективная теплоемкость, k – эффективная теплопроводность вещества, $W(t)$ – суммарная объемная мощность источников радиогенного тепла, $Q(r, T)$ – количество тепловой энергии, расходуемой на фазовые переходы H_2O в единице объема вещества за единицу времени, A – среднее оптическое альbedo поверхности тела, Q_{sun} – усредненный по поверхности и периоду вращения поток солнечной радиации, ε_{IR} – излучательная способность вещества поверхности в IR диапазоне, σ – постоянная Стефана-Больцмана.

Заметим при этом, что физические характеристики вещества, определяющие решение T краевой задачи (2) – (5), не только являются функциями времени t , но и существенно зависят от самой температуры T .

Такая задача не имеет аналитического решения и поэтому решается численно методом конечных разностей с итерациями [1 – 5].

Структура вещества небесного тела и его физические характеристики

Вещество небесного тела представляет собой пористую дисперсную систему, формирующуюся из твердых пылевых частиц и аморфного льда H_2O . В процессе тепловой эволюции аморфный лед H_2O в результате фазовых переходов преобразуется в кристаллический

лед, жидкую воду и пар, возможно сосуществующие в одном и том же локальном объеме. При этом объемные доли H_2O в разных состояниях различны при сохранении общей массы в единице объема. Таким образом, вещество небесного тела в единице объема может содержать неизменную удельную массу m_1 твердого пылевого вещества и изменяющиеся во времени массы H_2O в различных фазовых состояниях: $m_2(t)$ – аморфный лед, $m_3(t)$ – кристаллический лед, $m_4(t)$ – жидкая вода, $m_5(t)$ – пар. Тогда плотность (удельная масса) ρ вещества тела может быть представлена в виде

$$\rho(t) = m_1 + \sum_{j=2}^5 m_j(t).$$

Эффективная удельная теплоемкость c и теплопроводность k вещества рассматриваемого тела определяются соответствующими значениями c_j и k_j этих параметров для его компонент:

$$c = \sum_{j=1}^5 d_j c_j, \quad k = \sum_{j=1}^5 d_j k_j,$$

где d_j – удельная массовая доля j -ой компоненты вещества.

При этом заметим, что теплоемкость и теплопроводность компонент вещества зависят от локальной температуры тела T : $c_j = c_j(T)$, $k_j = k_j(T)$ (таб.).

Таблица 1

Зависимость теплоемкости и теплопроводности компонент вещества от температуры T [6–9]

	Теплоемкость $c(T)$ ($J kg^{-1} K$)	Теплопроводность $k(T)$ ($J m^{-1} K^{-1} s^{-1}$)
Пыль	$\alpha_0 + \alpha_1\sqrt{T} + \alpha_2 T + \alpha_3 T\sqrt{T} + \alpha_4 T^2$	2.4
Аморфный лед	$90. + 7.49 T$	$0.028 + 0.00234 T \quad (T < 150 K)$
Кристаллич. лед	$90. + 7.49 T$	$567/T \quad (150 K < T < 273 K)$
Жидкая вода	$0.028 + 0.00234 T + 800. T^2$	$0.5524 + 0.0166 T$
Пар	$1690. + 0.00053 T + 800. T^2$	22.

При температурах и давлениях, характерных для рассматриваемых небесных тел, часть тепловой энергии расходуется на фазовые переходы H_2O , содержащейся в веществе небесного тела.

Так в одном и том же объеме вещества при нагревании происходит сублимация аморфного льда, его кристаллизация, сублимация кристаллического льда и его плавление, нагрев образовавшейся воды, сопровождающийся ее испарением, то есть происходит изменение локальных удельных масс m_2, m_3, m_4 и m_5 компонент вещества в зависимости от температуры T .

Изменение удельной массы $m_2(t, T)$ аморфного льда при локальной температуре T определяется уравнением

$$\frac{dm_2}{dt} + \lambda_c(T)m_2 = 0$$

где $m_2(0, T_{eq}) = m_{20}$, $\lambda_c(T) = 0.333 \cdot 10^{21} \cdot \exp\left(-\frac{5370}{T}\right) year^{-1}$ [10],

а m_{20} – первоначальная удельная масса аморфного льда в веществе небесного тела.

Поскольку при температурах кристаллизации $m_2(t) + m_3(t) = m_{20}$, то тем самым определяется удельная масса кристаллического льда m_3 .

Отсюда следует, что ледяная компонента вещества небесного тела при температурах ниже 80 K представлена только аморфным льдом, при температурах выше 130 K – только кристаллическим льдом, при $80\text{ K} \leq T \leq 130\text{ K}$ в одном и том же объеме существуют оба типа льда.

Отметим, что из-за различия плотностей аморфного и кристаллического льда различны и занимаемые ими объемы при одной и той же массе.

При этом удельный расход тепла $q_{cr}(t, T)$ на кристаллизацию льда определяется соотношением

$$q_{cr} = H_{cr} \lambda_c(T) m_2,$$

где $H_{cr} = 0.9 \cdot 10^5\text{ J kg}^{-1}$ [11].

Процесс плавления кристаллического льда в локальном объеме начинается с момента времени t_m , когда локальная температура достигает значения температуры плавления T_m ($\sim 273\text{ K}$). При этом вся энергия расходуется на процесс плавления, локальная же температура остается неизменной, равной T_m . Если в процессе тепловой эволюции поступающего тепла достаточно для полного расплавления кристаллического льда, то в этом объеме с течением времени создается новая структура вещества, состоящая из жидкой воды и взвешенных в ней твердых пылевых частиц. Если же энергии недостаточно, то процесс плавления прекращается и компонента H_2O представлена в объеме как кристаллическим льдом, так и жидкой водой с локальными удельными массами $m_3(t, T)$ и $m_4(t, T)$ соответственно. Изменение массы льда определяется уравнением:

$$\frac{dm_3}{dt} + \frac{W(t)}{H_m} = 0,$$

при $m_3(t_m, T_m) = m_{20}$.

Здесь $W(t)$ – удельная мощность радиогенных источников тепла, $H_m = 0.332 \cdot 10^6\text{ J kg}^{-1}$ – скрытая теплота плавления кристаллического льда [9]. Удельная масса жидкой воды определяется тогда соотношением

$$m_4(t, T_m) = m_{20} - m_3(t, T_m).$$

Процесс сублимации льда (аморфного и кристаллического), а так же испарения жидкой воды происходит при любых температурах и давлениях. Образующийся при этом пар заполняет долю локального объема, свободную от негазовых компонент вещества.

Изменение удельной массы водяного пара $m_5(t, T)$ в процессе сублимации (испарения) описывается уравнением

$$\frac{dm_5}{dt} + S_p \sqrt{\frac{\mu}{2\pi R_g T}} (P_v(m_5, T) - P_w(m_3, m_4, T)) = 0,$$

при $m_5(0, T_{eq}) = 0$.

Здесь S_p – отношение удельной площади контактов негазовой компоненты H_2O и водяного пара к ее удельному объему; μ – молярная масса H_2O ; R_g – универсальная газовая постоянная; $P_v(m_5, T)$ – удельное давление водяного пара массой m_5 при температуре T , определяемое уравнением Клапейрона-Клаузиуса; $P_w(T)$ – давление насыщенного пара над ледяной и водной поверхностью в одном и том же объеме, определяемое соотношением

$$P_w(m_3, m_4, T) = \frac{m_3}{m_3 + m_4} A_c \exp\left(-\frac{B_c}{T}\right) + \frac{m_4}{m_3 + m_4} A_\ell \exp\left(-\frac{B_\ell}{T}\right),$$

где $A_c = 3.56 \cdot 10^{12}\text{ Pa}$, $A_\ell = 4.7 \cdot 10^{10}\text{ Pa}$, $B_c = 6142\text{ K}$, $B_\ell = 4960\text{ K}$ [12].

Отметим, что как только в локальном объеме давление пара P_v достигнет значения P_w , так сейчас же процесс сублимации прекращается и все поступающее тепло идет на нагрева-

ние вещества или на плавление льда.

Удельный расход тепла $q_{sub}(t, T)$ на сублимацию (испарение) H_2O определяется соотношением

$$q_{sub} = H_{sub} \frac{dm_5}{dt},$$

где $H_{sub}(T) = (2.888 \cdot 10^6 - 1.116 \cdot 10^3 T) \text{ Jkg}^{-1}$ [13].

Поскольку рассмотренные фазовые переходы H_2O происходят при разной температуре, то в различные моменты времени t расход энергии на эти переходы также различен. Тогда количество тепловой энергии $Q(t, T)$, расходуемой на фазовые переходы H_2O в единице объема вещества за единицу времени, определяется соотношениями:

$$Q(t, T) = \begin{cases} q_{sub}(t, T) & \text{при } T \leq 80 \text{ K} \\ q_{cr}(t, T) + q_{sub}(t, T) & \text{при } 80 \text{ K} < T \leq 130 \text{ K} \\ q_{sub}(t, T) & \text{при } 130 \text{ K} < T < 273 \text{ K} \\ W(t) & \text{при } T = 273 \text{ K} \\ q_{sub}(t, T) & \text{при } 273 \text{ K} < T. \end{cases}$$

Модели процессов формирования и тепловой эволюции небесного тела

Процессы формирования, тепловой эволюции и динамические изменения структуры недр КВО с момента его образования вплоть до настоящего времени рассматриваются здесь, для определенности, на примере транснептунового тела КВО (20000) Varuna. Для этого тела с достаточной точностью экспериментально определены средние астрофизические параметры: гелиоцентрическое расстояние $a = 42.95 \text{ AU}$, эксцентриситет орбиты $e = 0.074$, орбитальный период $P_{var} = 282 \text{ years}$, диаметр $D_{var} = 900 \text{ km}$, плотность вещества $d = 1100 \text{ kg/m}^3$, red albedo поверхности $A = 0.07$ [14, 15].

Здесь принято, что в каждой единице объема первичного вещества тела содержится 11% вещества твердых пылевых частиц (284 kg) и 68% аморфного льда (816 kg), что обеспечивает среднюю плотность d тела.

Рассматривается динамика структуры внутренних областей небесного тела в зависимости от количественного содержания радионуклидов ^{26}Al , ^{40}K , ^{232}Th , ^{235}U и ^{238}U в пылевой компоненте аккреционного вещества. В качестве исходных значений этого содержания приняты их значения для земных горных пород и метеоритов [16–20], пересчитанные на момент начала формирования Солнечной системы. Заметим при этом, что общая интенсивность радиогенных источников тепла зависит от моделируемого параметра δ (формула (1)). При этом допустимыми считались только те модели, при которых температура внутренних областей не превышала 370 K , что гарантировало возможность существования тела в настоящее время. Это допущение ограничивает значения параметра δ промежутком $0.005 < \delta < 0.5$.

На рис. 1 приведена зависимость от параметра δ температуры T_{max} центральной части небесного тела в настоящее время при $\theta = 4.5 \text{ Myr}$ для двух моделей. Кривая (1) соответствует модели аккреционного вещества, содержащего все рассматриваемые здесь нуклиды, а кривая (2) – все нуклиды, кроме ^{26}Al . Начальная восходящая часть кривых показывает, что при соответствующих параметрах модели вещество КВО в настоящее время содержит H_2O только в виде льда. Горизонтальная часть указывает, что в центральной области тела существует лед и жидкая вода. Следующая же часть кривых соответствует моделям, при которых КВО имеет жидкое ядро.

На рис. 2 приведены распределения по глубине границ областей вещества различной структуры в настоящее время в зависимости от параметра δ при наличии всех рассматриваемых

мых нуклидов. Кривая *I* – граница приповерхностной области (а) аморфного льда; кривая *II* – граница области (b) кристаллического льда кубической сингонии; кривая *III* – граница области (c) кристаллического льда гексагональной сингонии; кривая *IV* отделяет область (d) – смесь кристаллического льда и жидкой воды, от области (e) – области жидкой воды со взвешенными в ней частицами твердого пылевого вещества.

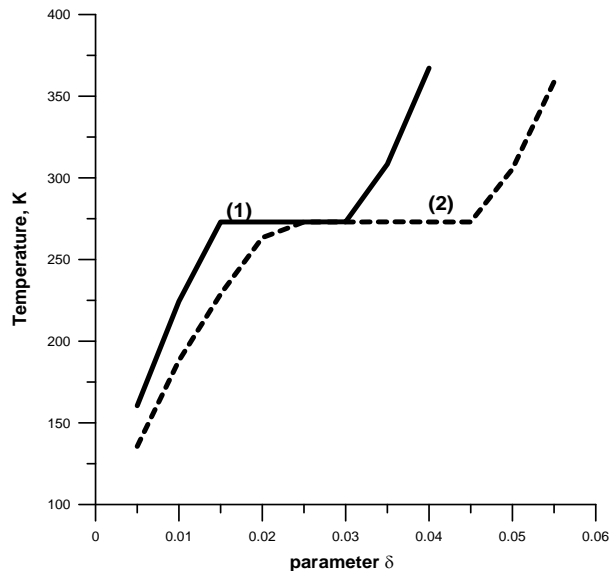


Рис. 1. Зависимость от параметра δ температуры T_{\max} центральной части небесного тела в настоящее время при $\theta = 4.5$ Муг для двух моделей

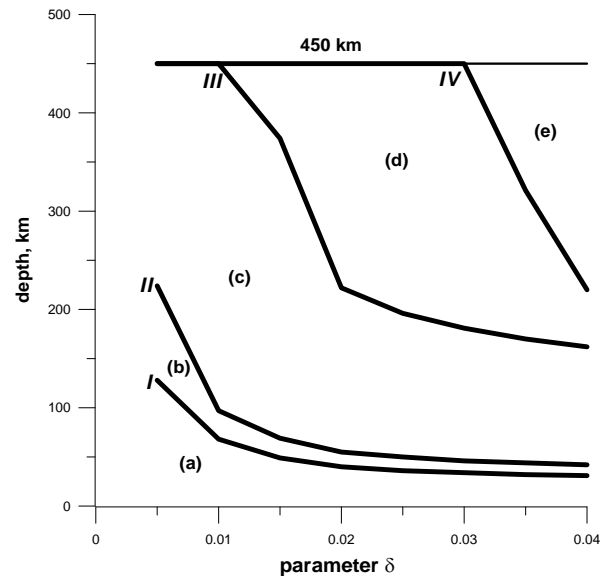


Рис. 2. Распределение по глубине границ областей вещества различной структуры в настоящее время в зависимости от параметра δ при наличии всех рассматриваемых нуклидов для времени формирования $\theta = 4.5$ Муг

Выводы

Методами теоретического моделирования проведены исследования воздействия радиогенных источников тепла на динамику внутренней структуры “ледяного” небесного тела Пояса Койпера с момента его формирования до настоящего времени. Определены значения моделируемого параметра, при которых небесное тело может содержать в настоящее время обширные области, в которых H_2O находится в различных фазовых состояниях.

Библиографический список

1. Самарский, А.А. Теория разностных схем / А.А. Самарский. – М.: Наука, 1977. – 426 с.
2. Самарский, А.А. Методы решения сеточных уравнений / А.А. Самарский, Е.С. Николаев. – М.: Наука, 1978. – 592 с.
3. Shchuko, O.B. Martian underground water detection / O.B. Shchuko [et all.] // GEOMARS 2001, LPI Contrib., LPI, Houston, USA. P. 91–95.
4. Shchuko, O.B. Mercury: can any ice exist at subpolar regions? Adv. Space Res., 2004, 33/12, 2156–2160.
5. Shchuko, O.B., Coradini, A., Orosei, R., Shchuko, S.D. Varuna: thermal evolution.. Adv. Space Res., 2006, 38, 1946–1951.
6. Troitsky, V.S. Influence of the temperature dependence of lunar material properties on the spectrum of the Moon’s radio emission / V.S. Troitsky, A.B. Burov, T.N. Alyoshina // Icarus, 1968, 8 (3), 423–433.
7. Klinger, J. Influence of a phase transition of ice on the heat and mass balance of comets. Science, 1980, 209, 271–272.
8. Klinger, J. Some consequences of a phase transition of water ice on the heat balance of comet nuclei. Icarus, 1981, 47, 320–324.

9. **Берч, Ф.** Справочник для геологов по физическим константам / Ф. Берч, Дж. Шерер, Г. Спайсер. – М.: ИЛ, 1949. – 303 с.
10. **Schmitt, B.** Thermal and physico-chemical processes in cometary nuclei, in: Benest, D., Froeschlé, C. (Eds.). Interrelations between Physics and Dynamics for Minor Bodies in the Solar System (Ecole de Goutelas 1991), Editions Frontières, 1992. Pp. 265-307.
11. **Chormley, J.A.** Enthalpy changes and heat capacity changes in the transformation from high surface area amorphous ice to stable hexagonal ice. J. Chem. Phys., 1968, 48, 503-508.
12. **Prialnik, D.** Growth and evolution of small porous icy bodies with an adaptive-grid thermal evolution code / D. Prialnik, R. Merk // Icarus, 2008, 197, 211–220.
13. **Delsemme, A.H.** Physico-chemical phenomena in comets / A.H. Delsemme, D.C. Miller // Planet.Space Sci., 1971, 19, 1229-1257.
14. **Jewitt, D.** The size and albedo of the Kuiper-belt object (20000) Varuna / D. Jewitt, H. Aousel, A.Evans // Nature, 2001, 411, 446-447.
15. **Jewitt, D.** Physical properties of trans-Neptunian object (20000) Varuna / D. Jewitt, S.S. Sheppard // Astron. J., 2002, 123, 2110-2120.
16. Изотопы: Свойства, получение, применение / В.Ю. Баранов. – М.: Физматлит, 2005. – 910 с.
17. **Куликов, И.С.** Изотопы и свойства элементов: справочник / И.С. Куликов. – М.: Metallurgia, 1990. – 120 с.
18. **Хойл, Ф.** Ядерная астрофизика / Ф. Хойл [и др.]. – М.: Мир, 1986. – 519 с.
19. **Мухин, К.Н.** Экспериментальная ядерная физика. В двух томах. Т. 1. Физика атомного ядра. / К.Н. Мухин. – 3-е изд. – М., Атомиздат, 1974. – 584 с.
20. **Wasserburg, G.J., Papanastassiou D.A.** Some short-lived nuclides in the early solar system – a connection with the placental ISM / in: Barnes, C.A., Clayton, D.D., Schramm, D.N. (Eds.), Essays in Nuclear astrophysics., Cambridge University Press, 1982, 77-140.

*Дата поступления
в редакцию 20.10.2011*

O.B. Shchuko, S.D. Shchuko

THE DEPENDENCE TRANS-NEPTUNE CELESTIAL BODY MATTER STRUCTURE ON RADIONUCLIDES ABUNDENCE

Thermal evolution of icy trans-Neptunian body has been studied by mathematical simulation methods. The dependence of the radial temperature distribution on the initial radionuclide content has been determined. The range of the radionuclide content which secures the existence of liquid water in the body's interior has been found.

Key words: mathematical simulation, Solar system, trans-Neptunian body, radioactive nuclide, thermal conductivity equation, phase transition of H₂O.

УДК 512.542+512.544

Я.Н. Нужин

ПОРОЖДАЮЩИЕ МУЛЬТИПЛЕТЫ ИНВОЛЮЦИЙ

Сибирский федеральный университет

Приводится краткий обзор результатов о порождающих множествах инволюций с определенными свойствами конечных простых групп и линейных групп над кольцом целых чисел Z . С использованием неравенства Скотта находится минимальное число порождающих инволюций $i(G)$ группы G , произведение которых равно единице, в случаях, когда G совпадает с одной из следующих групп $PSL_3(2^n)$, $PSU_3(2^{2n})$, $SL_6(Z)$.

Ключевые слова: конечная простая группа, линейная группа, кольцо целых чисел, порождающие тройки инволюций.

Порождающие мультиплеты простых групп

В силу известного результата У. Фейта и Дж. Томпсона любая конечная группа нечетного порядка разрешима. Поэтому конечная простая неабелева группа содержит инволюции и порождается любым классом сопряженных инволюций. С другой стороны, минимальное число порождающих инволюций конечной простой неабелевой группы не меньше тройки. В 1978 г. А. Вагнер [1] заметил, что для группы $PSU_3(9)$ минимальное число порождающих инволюций равно 4. Впоследствии оказалось, что она является единственной конечной простой неабелевой группой, не порождаемой тремя инволюциями, см. работы Г. Миллера [2], Ф. Дала Вольта [3], Г. Малле, Дж. Саксла, Т. Вейгеля [4] и автора [5]. В [4] также была сформулирована задача.

А. Для каждой конечной простой неабелевой группы G найти минимум числа сопряженных порождающих инволюций $i_c(G)$ таких, что их произведение равно 1.

Задача А и следующая записаны автором статьи в "Коуровской тетради" [6, вопрос 14.69].

Б. Для каждой конечной простой неабелевой группы G найти минимум числа порождающих инволюций $i(G)$ таких, что их произведение равно 1.

Очевидно, $i(G) \leq i_c(G)$ и, если группа порождается тремя (сопряженными) инволюциями, то $i(G) \leq 6$ (соответственно $i_c(G) \leq 6$). С другой стороны, из простоты группы G легко следует, что $i(G) \geq 5$. Таким образом, для любой конечной простой неабелевой группы G

$$5 \leq i(G) \leq 6, \text{ при } G \neq PSU_3(9).$$

Для группы $G = PSU_3(9)$, в которой один класс сопряженных инволюций, В.В. Латышев с использованием пакета GAP установил равенства $i_c(G) = i(G) = 7$ и даже указал явно в матричном виде такие семерки порождающих инволюций.

Задачи А и Б тесно связаны со следующим, уже решенным, вопросом В.Д. Мазурова [6, вопрос 7.30].

В. Какие конечные простые группы порождаются тремя инволюциями, две из которых перестановочны?

Действительно, если группа G порождается тремя (сопряженными) инволюциями α , β , γ , такими, что $\alpha\beta = \beta\alpha$, то в качестве пятерки порождающих инволюций, произведение которых равно 1, можно взять $\alpha\beta, \gamma, \gamma, \beta, \alpha$ и тогда $i(G) = 5$ (соответственно $i_c(G) = 5$).

Согласно классификационной теореме конечные простые группы исчерпываются следующими группами: циклические группы простого порядка, знакопеременные группы, группы лиева типа над конечными полями, 26 спорадических групп.

Для знакопеременных групп и групп лиева типа над конечными полями ответ на вопрос В дал автор данной статьи [5], [7–10]. Спорадические группы рассматривались рядом авторов различными методами, особых успехов здесь достиг А.В. Тимофеенко, его программы и компьютеры большой мощности позволили явно указать порождающие тройки инволюций, две из которых коммутируют, для 24 спорадических групп в их подстановочном представлении. В.Д. Мазуров [11] единообразно методами теории характеров получил ответ на вопрос В для всех спорадических групп.

Конечная простая группа G порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны, тогда и только тогда, когда она отлична от следующих групп:

1) *знакопеременные группы:*

$$A_6, A_7, A_8;$$

2) *группы лиева типа над полем характеристики 2:*

$$PSL_3(q), PSU_3(q), PSL_4(q), PSU_4(q);$$

3) *группы лиева типа над полем нечетной характеристики:*

$$PSL_3(q), PSU_3(q), PSL_2(7), PSL_2(9), PSp_4(3);$$

4) *спорадические группы:*

$$M_{11}, M_{22}, M_{23}, McL.$$

Для нахождения числа $i(G)$ остается исследовать исключительные группы из указанного выше списка. Первый результат в данном направлении получила в 1999 г. Т.В. Дубинкина [12], установив равенства

$$i(PSL_3(2^n)) = i(PSU_3(2^{2n})) = 6.$$

Заметим, что группы $PSL_3(2^n)$ и $PSU_3(2^{2n})$ имеют по одному классу сопряженных инволюций, поэтому для них $i = i_c$.

В 2001 г. для исключительных знакопеременных и спорадических групп число $i(G)$ было найдено А.В. Тимофеенко [13] и В.А. Шмидтом [14] с использованием пакета GAP. Оказалось, что $i(A_6) = 5$ и $i(G) = 6$, если G является одной из групп

$$A_7, A_8, M_{11}, M_{22}, M_{23}, McL.$$

В диссертации Дж.М. Уорда 2009 года [15] (см. также [6, примечания к вопросу 14.69]) число $i_c(G)$ найдено для знакопеременных, спорадических групп и для групп $PSL_n(q)$, при нечетном q , а для $n \geq 4$ при дополнительном ограничении $q \neq 9$, кроме того, для $n = 6$ еще и при $q \not\equiv 3 \pmod{4}$. Сформулируем его результаты.

Число i_c равно 6 для групп M_{11} , M_{12} , M_{22} , M_{23} , McL , для остальных спорадических групп оно равно 5.

Число i_c равно 6 для групп A_7 , A_8 , A_{12} , для остальных знакопеременных групп A_n при $n \geq 5$ оно равно 5.

Заметим, что по сравнению с числом i среди знакопеременных и спорадических групп количество групп, для которых число i_c равно 6, увеличилось на два; это группы A_{12} и M_{12} .

Число i_c равно 5 для групп $PSL_n(q)$ при $n \geq 4$, $n \neq 6$ и нечетном $q \neq 9$.

Если q нечетно, то $i_c(PSL_3(q)) = 5$ при $n \equiv 1 \pmod{3}$ и $i_c(PSL_3(q)) = 6$ при $n \equiv 0$ или $2 \pmod{3}$.

В группах $PSL_2(q)$ один класс сопряженных инволюций, поэтому для них $i = i_c = 5$ при $q \neq 7, 9$, а если $q = 7, 9$, то $i = i_c = 6$ в силу изоморфизмов $PSL_2(7) \square PSL_3(2)$, $PSL_2(9) \square A_6$ и указанных выше результатов.

Таким образом, задача А еще далека от полного решения, а задачу Б осталось рассмотреть только для групп

$$PSL_4(2^m), PSU_4(2^{2m}), PSU_3(p^{2m}), p > 2$$

(с учетом изоморфизма $PSp_4(3) \square PSU_4(4)$).

Порождающие мультиплеты линейных групп над Z

Здесь рассматриваются аналоги вопросов Б и В для групп SL_n , PSL_n , GL_n , PGL_n над кольцом целых чисел Z .

Группу G будем называть $(2, 2, 2)$ -порожденной ($(2 \times 2, 2)$ -порожденной), если она порождается тремя инволюциями (соответственно тремя инволюциями, две из которых перестановочны).

В 1890 г. Р. Фрике и Ф. Клейн [16] установили, что группа $PSL_2(Z)$ является свободным произведением групп порядка 2 и 3. Группа $SL_2(Z)$ имеет единственную инволюцию $diag(-1, -1)$. Поэтому группы $SL_2(Z)$ и $PSL_2(Z)$ не порождаются никаким множеством инволюций. М. Тамбурини и П. Цука [17] показали, что группа $SL_n(Z)$ при $n \geq 14$ является $(2 \times 2, 2)$ -порожденной. Автор [18] доказал, что группа $PSL_n(Z)$ тогда и только тогда $(2 \times 2, 2)$ -порождена, когда $n \geq 5$. В [19] методом работы [18] установлен аналогичный результат и для группы $GL_n(Z)$. Порождающие множества инволюций линейных групп размерности 2 и 3, 4 рассматривались соответственно в [20] и [21].

Суммируя приведенные выше результаты и учитывая, что в [18] порождающие инволюции группы $PSL_n(Z)$ при $n \neq 2(2r+1)$ выбирались из $SL_n(Z)$, получаем следующее утверждение.

Для групп SL_n , PSL_n , GL_n , PGL_n над кольцом целых чисел ответы на вопросы об их $(2, 2, 2)$ и $(2 \times 2, 2)$ -порождаемости, а также на вопрос о минимальном числе порождающих инволюций, произведение которых равно 1, известен, исключая лишь группы SL_6 и SL_{10} . Результаты собраны в табл. 1.

Таблица 1

G	$(2,2,2)$	$(2 \times 2, 2)$	$i(G)$
SL_2	–	–	–
PSL_2	–	–	–
GL_2	+	–	6
PGL_2	+	+	5
$SL_n, PSL_n, GL_n, PGL_n, n = 3, 4$	+	–	6
$SL_n, n \geq 5, n \neq 6, 10$	+	+	5
SL_6, SL_{10}	?	?	?
$PSL_n, GL_n, PGL_n, n \geq 5$	+	+	5

В следующем параграфе доказывается, что $i(SL_6(Z)) \geq 6$ и, следовательно, группа $SL_6(Z)$ не является $(2 \times 2, 2)$ -порожденной.

Аналоги вопросов Б и В представляют интерес для всех групп Шевалле над над кольцом целых чисел. В частности, в "Коуровской тетради" автором записан следующий вопрос.

Какие присоединенные группы Шевалле (нормального типа) над кольцом целых чисел Z порождаются тремя инволюциями, две из которых перестановочны? ([6, вопрос 15.67])

Неравенство Скотта и его применение

Пусть неприводимая подгруппа G общей линейной группы $GL_n(K)$ над полем K порождается элементами g_1, \dots, g_k с условием $g_1 \dots g_k = 1$. Через $d(g_i)$ обозначим размерность подпространства неподвижных элементов $V_n(g_i) = \{v \in V_n \mid g_i v = v\}$, где V_n — линейное пространство размерности n над полем K . В силу результата Л.Л. Скотта [22, теорема 1] выполняется неравенство

$$d(g_1) + \dots + d(g_k) \leq (k-2)n. \quad (1)$$

Следующий результат получен в [12], здесь приводится короткое его доказательство с применением неравенства (1).

Теорема 1. $i(PSL_3(2^n)) = i(PSU_3(2^{2n})) = 6$.

Доказательство. Группы $SL_3(2^n)$ и $GL_3(2^n)$ имеют по одному классу сопряженных инволюций с представителем

$$g = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Очевидно, $d(g) = 2$. Отсюда любая неприводимая подгруппа из $GL_3(2^n)$ не может порождаться пятью инволюциями, произведение которых равно единице, в силу неравенства (1). Центр группы $GL_3(2^n)$ нечетен, поэтому для групп $PSL_3(2^n)$, $PSU_3(2^{2n})$ число $i(G)$ равно пяти тогда и только тогда, когда оно равно пяти для некоторых их (неприводимых) прообразов в $GL_3(2^n)$. Остается заметить, что для конечной простой группы G , отличной от $PSU_3(9)$, справедливы неравенства $5 \leq i(G) \leq 6$. Теорема доказана.

Теорема 2. $i(SL_6(Z)) \geq 6$.

Доказательство. Любая инволюция из $SL_6(Z)$ сопряжена в группе $GL_6(C)$ (над полем комплексных чисел) с одной из следующих трех инволюций:

$$a = \text{diag}(-1, -1, 1, 1, 1, 1),$$

$$b = \text{diag}(-1, -1, -1, -1, 1, 1),$$

$$c = \text{diag}(-1, -1, -1, -1, -1, -1).$$

Ясно, что если элементы g_1, \dots, g_k из $GL_6(C)$ порождают неприводимую подгруппу, то элементы $\pm g_1, \dots, \pm g_k$ также будут порождать неприводимую подгруппу. Очевидно, $d(a) = 4$, $d(b) = 2$, $d(c) = 0$, $d(bc) = 4$. Поэтому $d(g_1) + \dots + d(g_5) \geq 20$, если g_1, \dots, g_5 являются инволюциями из $SL_6(C)$ и их произведение равно единице. Если подгруппа, порожденная элементами g_1, \dots, g_5 неприводима, то правая часть неравенства (1) равна 18. Таким образом, $i(SL_6(Z)) \geq 6$. Теорема доказана.

Из теоремы 2 вытекает

Следствие. Группа $SL_6(Z)$ не порождается тремя инволюциями, две из которых перестановочны.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, грант №09-01-00717.

Библиографический список

1. **Wagner, A.** The minimal number involutions generating some threedimensional groups / A. Wagner // Boll. Un. Mat. Ital. 1978. Vol. A 15, .5. P. 431–439.
2. **Miller, G.** On the groups generated by two operators / G. Miller // Bull. Amer. Math. Soc. 1901. Vol. 7. P. 424–426.
3. **Dala Volta, F.** Gruppi sporadici generati da tre in involuzion / F. Dala Volta // RILS A 119. 1985. P. 65–87.
4. **Malle, G.** Generation of classical groups / G. Malle, J. Saxl, T. Weigel // Geom. Dedicata. 1994. Vol. 22, .2. P. 675–685.
5. **Nuzhin, Ya.N.** Generating elements of simple groups and their applications / Ja.N. Nuzhin // Proceedings of III International Conference on algebra of memory M.I.Kargapolov (23-28 August, 1993) – Berlin – New-York: Walter de Gruyter, 1996. P. 101–120.
6. Коуровская тетрадь (Нерешенные вопросы теории групп). – 17-е изд., дополненное. – Новосибирск: ИМ СО РАН, 2010.
7. **Нужин, Я.Н.** Порождающие тройки инволюций групп Шевалле над конечным полем характеристики 2 // Алгебра и логика. 1990. Т. 29, 2. С. 192–206.
8. **Нужин, Я.Н.** Порождающие тройки инволюций знакопеременных групп // Математические заметки. 1990. Т. 51, 4. С. 91–95.
9. **Нужин, Я.Н.** Порождающие элементы групп лиева типа над конечным полем нечетной характеристики. I // Алгебра и логика. 1997. Т. 36, 1. С. 77–96.
10. **Нужин, Я.Н.** Порождающие элементы групп лиева типа над конечным полем нечетной характеристики. II // Алгебра и логика. 1997. Т. 36, 4. С. 422–440.
11. **Мазуров, В.Д.** О порождении спорадических простых групп тремя инволюциями, две из которых перестановочны // Сиб. мат. журн. 2003. Т. 44, 1. С. 193–198.
12. **Дубинкина (Моисеенкова), Т.В.** Об одном свойстве групп $PSL_3(2^n)$, $PSU_3(2^{2n})$ // Вестник Красноярского гос. техн. ун-та. – Красноярск: КГТУ, 1999. Вып. 16. С. 19–34.

13. Тимофеев, А.В. О строго вещественных элементах конечных групп // Фунд. и прикл. матем. 2005. Т. 11, 2. С. 209–218.
14. Шмидт, В.А. О порождающих множествах инволюций знакопеременных и спорадических групп // Материалы XXXIV науч. студ. конф.: сб. ст. – Красноярск: КГУ, 2001. С. 139–144. (J.Ward, PhD Thesis, QMW, 2009)
15. Ward, J.M. Generation of simple groups by conjugate involutions / J.M. Ward. PhD Thesis. – Queen Mary college, University of London, 2009.
16. Fricke, R. Vorlesungen über die Theorie der Elliptischen Modul Funktionen / R. Fricke, F. Klein. – В. 1,2. – Leipzig: Teubner, 1890, 1892.
17. Tamburini, M.C. Generation of Certain Matrix Groups by Three Involutions, Two of Which Commute / M.C. Tamburini, P. Zucca // J. of Algebra. 1997. Vol. 195, 2. P. 650–661.
18. Нужин, Я.Н. О порождаемости группы $PSL_n(\mathbb{Z})$ тремя инволюциями, две из которых перестановочны // Владикавказский матем. журнал. 2008. Т. 10. Вып. 1. С. 68–74.
19. Ахмедова, Ш.А. Порождающие мультиплеты группы $GL_n(\mathbb{Z})$ / Ш.А. Ахмедова, Я.Н. Нужин // Алгебра, логика и приложения: труды межд. алгебраической конф. – Красноярск. 2010. С. 70.
20. Нужин, Я.Н. Порождающие тройки инволюций размерности 2 над кольцом целых чисел / Я.Н. Нужин, И.А. Тимофеев // Владикавказский матем. журнал. 2009. Т. 11. Вып. 4. С. 59–62.
21. Моисеев, Т.В. Порождающие мультиплеты инволюций групп $SL_n(\mathbb{Z})$ и $PSL_n(\mathbb{Z})$ // Труды института математики и механики УрО РАН. Т. 16. №3. 2010. С. 195–198.
22. Scott, L.L. Matrices and cohomology // Ann. of Math. V. 5. 1977. С. 195–198.

Дата поступления
в редакцию 20.10.2011

Ya.N. Nuzhin

GENERATING MULTIPLES INVOLUTIONS

We give a brief overview of the results about generating sets of involutions with certain properties of finite simple groups and linear groups over the ring of integers \mathbb{Z} . Using the Scott inequality it is found the minimal number of involutions $i(G)$ of a group G , whose product is equal to unit, when G coincides with one of the groups $PSL_3(2^n)$, $PSU_3(2^{2n})$, $SL_6(\mathbb{Z})$.

Key words: Finite simple group, linear group, ring of integers, generating triples of involutions.

**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

№ 4 (91)

Редакторы: **Н.Н. Максимова, О.В. Пугина**

Редакция:

603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
тел.: 8-312-436-73-72, rio@nntu.nnov.ru

Подписано в печать 28.11.2011. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 43,5. Уч.-изд. л. 40. Тираж 300 экз. Заказ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексева.
Типография НГТУ.

Адрес университета и полиграфического предприятия:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24.

Индекс 10312
Объединенный каталог «Пресса России»