

ISSN 1816-210X

ТРУДЫ НГТУ

им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА

Нижний Новгород

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

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

№ 3 (105)

Нижний Новгород 2014

УДК 050(06)
ББК 9я54
Т 78

Т 78 Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексева /
НГТУ им. Р.Е. Алексева. – Нижний Новгород, 2014. № 3 (105). – 314 с.

Выходит 4 раза в год

Главный редактор С.М. Дмитриев

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Н.Ю. Бабанов (зам. гл. редактора), М.В. Ширяев (зам. гл. редактора), Е.Г. Ивашкин (зам. гл. редактора),
О.В. Пугина (отв. редактор), А.В. Крылова (глав. редактор выпуска)

Члены редколлегии: В.Г. Баранов, В.Д. Вавилов, А.М. Грошев, В.М. Галкин, А.Н. Жуков,
А.Б. Дарьенков, В.Е. Колотилин, А.А. Куркин, Д.Н. Лапаев, М.Г. Михаленко, А.Ю. Панов,
В.П. Хранилов, А.Е. Хробостов, Е.А. Чернышов

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Председатель

Федор Михайлович Митенков

(академик РАН, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор ОКБМ Африкантов)

Заместитель председателя

Сергей Михайлович Дмитриев

(д-р техн. наук, проф., ректор НГТУ им. Р.Е. Алексева)

Ответственный секретарь

Владимир Викторович Беляков

(д-р техн. наук, проф., начальник УНИИИР)

ЗАРУБЕЖНЫЕ ЧЛЕНЫ СОВЕТА

Дмитрий Ефимович

Пелиновский

Ласло Палкович

Варлаки Петер

Виджай Кумар

Ялчнер Ахмед К.

PhD, проф. математики, Университет Мак Мастера,
Хамильтон, Онтарио, Канада

проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

проф. Сечени Иштван Университет, Венгрия

д-р философии, проф. – исследователь,

Шив Надар Университет, Индия

д-р, профессор, METU, директор OERC, Турция

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОГО СОВЕТА

Гуляев Юрий Васильевич

Гринберг Руслан Семенович

Бабанов Николай Юрьевич

Ширяев

Михаил Виссарионович

Ивашкин

Евгений Геннадьевич

Митяков Сергей Николаевич

Куркин Андрей Александрович

Воротынцева

Владимир Михайлович

Кондратьев

Вячеслав Васильевич

Рындык Александр Георгиевич

Раевский Сергей Борисович

Кошелев Олег Сергеевич

Кулепов Виктор Федорович

член Президиума РАН, академик, д-р физ.-мат. наук, проф.,
директор Института радиоэлектроники РАН им. В.А. Котельникова

член-кор. РАН, д-р эконом. наук, проф.,

директор Института ФГБУН экономики РАН

канд. техн. наук, доцент, проректор на научной работе НГТУ

канд. техн. наук, доцент, проректор по развитию НГТУ

канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

канд. техн. наук, доцент, проректор по учебной работе НГТУ

д-р физ.-мат. наук, проф., директор ИНЭУ НГТУ

д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой ПМ

д-р хим. наук, проф., зав. кафедрой ФТМКЭТ

член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

член-кор. РАН, д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ВСТ

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой ИР

д-р техн. наук, профессор

д-р техн. наук, проф., зав. кафедрой МТКОДСП

д-р техн. наук, профессор, директор ДПИ (филиал НГТУ)

УДК 050(06)
ББК 9я54

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

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания:
ПИ № ФС 77-56417

© Нижегородский государственный технический
университет им. Р.Е. Алексева, 2014

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

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

№ 3 (105)

Nizhni Novgorod 2014

Editor-in-Chief S.M. Dmitriev

EDITORIAL BOARD

N.Y. Babanov (Deputy Editor-in-Chief), M.V. Shiryaev (Deputy Editor-in-Chief),
Y.G. Ivashkin (Deputy Editor-in-Chief), V.V. Belyakov (Executive Secretary),
O.V. Pugina (Executive Editor), A.V. Krylova (Executive Editor),

Members of Editorial Board: V.G. Baranov, V.D. Vavilov, V.M. Galkin, A.M. Groshev, A.B. Darenkov,
A.N. Zhukov, V.Y. Kolotilin, A.A. Kurkin, D.H. Lapaev, M.G. Mikhalenko,
A.Y. Panov, V.P. Khranilov, A.E. Khrobostov, Y.A. Chernyshov,

EDITORIAL COUNCIL

Chairman

Fedor Mikhailovich Mitenkov

Member of Russian Academy of Sciences
Head of OAO I.I. Afrikantov OKB Mechanical Engineering
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
(Nizhniy Novgorod, Russia)

Vice – chairman

Sergei Mikhailovich Dmitriev

Doctor of technical sciences, professor
Rector of NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Executive Secretary

Vladimir Viktorovich Beliakov

Doctor of technical sciences, professor
Head of NSTU Research and innovative works office
(Nizhniy Novgorod, Russia)

*Dmitri Efimovich
Pelenovski
Laslo Palkovich
Varlaki Peter
Vidzhai Kumar*

Foreign members of Editorial council

PhD, Doctor of mathematical sciences, professor
McMaster University (Ontario, Canada)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
The Széchenyi István University (Győr, Hungary)
PhD, Doctor of philosophical sciences, professor
Shiv Nadar University (India)
professor, head of Ocean Engineering Research Center
Middle East Technical University (Turkey)

Ialchner Akhmed K.

Members of Editorial council

Guliaev Yuri Vasilevich

Member of Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Institute of Radio Engineering and Electronics (IREE) named after Academician V.A. Kotelnikov
(Moscow, Russia)

Grinberg Ruslan Semenovich

Associate member of the Russian Academy of Sciences
Doctor of physical and mathematical sciences, professor
Director of the Institute for International Economic and Political Studies at the Russian Academy
of Sciences
(Moscow, Russia)

Babanov Nikolai Iurevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Shiryaev

Mikhail Vissarionovich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for perspective projects
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ivashkin

Evgeni Gennadevich

Candidate of technical sciences, docent
Vice-rector for teaching and learning enhancement
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Mitiakov Sergei Nikolaevich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kurkin Andrey Aleksandrovich

Doctor of physical and mathematical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Vorotyntsev

Vladimir Mikhailovich

Doctor of chemical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kondratev

Viacheslav Vasilevich

Associate member of the Russian Academy of Sciences,
Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Ryndyk Alexander Georgievich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Raevski Sergei Borisovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Koshelev Oleg Sergeevich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

Kulepov Viktor Fedorovich

Doctor of technical sciences, professor
NSTU (Nizhniy Novgorod, Russia)

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

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНАКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ.....	11
Малахов В.А., Попков К.В., Раевский А.С. Поиск комплексных решений дисперсионной задачи для волн круглого открытого диэлектрического волновода металлической пленкой.....	11
Бобков Н.М. Систематизация терминологии в области конструирования радиоэлектронных систем.....	19
МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ.....	30
Диденкулов О.И., Диденкулова И.И., Пелиновский Е.Н. Параметризация характеристик наката одиночных волн в бухте параболического сечения.....	30
Лощилова Н.А., Куркин А.А. Использование методов механики реагирующих сред для моделирования процесса тушения лесных пожаров стационарным и движущимся источником подачи воды.....	37
Козелков А.С. Эффекты, сопровождающие вхождение астероида в водную среду....	48
ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ.....	78
Жевнерчук Д.В., Лопатин Д.А. Применение агентного подхода к проектированию и реализации моделей самоорганизации конфигурации вычислительных систем.....	78
Моисеев А.Н., Мисевич П.В. Алгоритм аудита работы корпоративных автоматизированных систем.....	86
Никулин Е.А. Конгруэнтные преобразования полиномиальных моделей.....	93
Березин А.В. Разработка мультиагентной системы мониторинга сетевого оборудования.....	102
МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ.....	108
Конищев Б.П., Пигалова Е.А., Курников Н.А. Динамика сварочных деформаций на основе эмпирических данных и применение ряда технологических приемов по снижению деформационных отклонений контура сварной авиационной конструкции	108
Синичкин С.Г. Анализ исходной системы управления для её модернизации на базе программируемого контроллера.....	114
ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА.....	121
Бирюков В.В., Грачев В.А., Лукоянова Т.С., Порошенков А.Ю., Раевский А.С. Влияние паразитных параметров лазерных излучателей на полосу пропускания канала аналоговой волс.....	121

Безносов А.В., Бокова Т.А., А.Д. Зудин, Львов А.В., Соловьёв А.О., Черныш А.С. Пути регулирования термодинамической активности кислорода свинцового теплоносителя.....	130
Ганичев А.Н., Аношкин Ю.И. Анализ возможности использования аппаратов воздушного охлаждения в качестве альтернативного способа отвода тепла от атомной станции малой мощности.....	139
НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ.....	145
Вахидов У.Ш., Согин А.В., Шапкин В.А., Шапкина Ю.В. Численные исследования колебаний узлов автомобилей.....	145
Макаров В.С., Зезюлин Д.В., Беляков В.В. Обзор исследований по влиянию местности на характеристики снежного покрова.....	154
Орлов Л.Н., Тумасов А.В., Багичев С.А. Повышение пассивной безопасности автотранспортных средств.....	163
Долгополов А. А., Мерзликин Ю. Ю., Наумов В. Н., Чижов Д. А. Определение параметров и согласование режимов работы элементов подъемного и движительного комплексов амфибийных транспортных средств и летательных аппаратов с шасси на воздушной подушке.....	173
Погуляев Ю.Д., Байтимеров Р.М., Наумов В.Н., Чижов Д.А., Машков К.Ю. Новая система топливоподачи для дизельного двигателя, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного.....	178
ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ.....	185
Ваганов А.Б., Нгуен Нгок Тан. Динамика неравнообъемных наклонов судна при внезапном изменении нагрузки.....	185
Вешуткин В.Д., Жуков А.Е. Экспериментальные исследования вибрации корпуса судна на тензометрических моделях.....	193
Герасимов С.И., Кузьмин В.А. К проблеме моделирования механического импульса рентгеновского излучения на крупномасштабные тонкостенные конструкции.....	202
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА.....	210
Дарьенков А.Б., Хватов О.С., Юрлов Ф.Ф., Усов Н.В. Технико-экономическое обоснование применения дизель-генераторных электростанций с переменной частотой вращения вала.....	210
Репин А.С., Гуляев В.В., Бурмакин О.А. Динамика систем стартерного электропривода дизеля с емкостными накопителями энергии.....	215
Курицын Д.Б., Соколов В.В. Мониторинг и удаленное управление современным промышленным оборудованием.....	222
МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ.....	228
Гребеньков С.К., Скуднов В.А., Шацов А.А., Клейнер Л.М. Деформационное упрочение низкоуглеродистых мартенситных сталей системы Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb...	228

Макаренко К.В. Оптимизация размерно-топологических параметров графитовой фазы с целью повышения механических свойств чугунов.....	239
Мыльников В.В., Мыльникова М.В., Чернышов Е.А., Шегулов Д.И., Беляев Е.С. Анализ изменения показателей сопротивления усталости сталей и титановых сплавов в зависимости от физических процессов, протекающих на их поверхности.....	247
Скуднов В.А., Харитонов С.В. Структура и физико-механические свойства эливарного сплава 44НХТЮ и технология изготовления упругого элемента цельного гироскопа из одной заготовки.....	253
ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ.....	264
Крохоняткин М.Д. Социальная ответственность бизнеса: возможный механизм реализации.....	264
СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ.....	272
Крылова А.В. Проблемы газификации территорий коттеджных застроек в городской черте и пригородной зоне: социальный аспект.....	272
Шиловская Н.С. От гуманизма к антропоцентризму и обратно.....	278
Ширшин Г.А. Философско-методологические принципы совместного развития науки и практики.....	285
МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ.....	294
Верещагина Е.И. Статистический подход к решению обратной задачи в теории игр....	294
Игошин В.А., Кузин А.М., Баренбойм М.Н. О квазипланиметрии.....	300

CONTENTS

RADIO ENGINEERING, TELECOMMUNICATION SYSTEMS, AERIALS AND SHF DEVICES.....	11
Malakhov V. A., Popkov K.V., Raevskii A.S. The search of complex solutions dispersion tasks of waves of the round open dielectric waveguide with a metal film.....	11
Bobkov N. M. Design engineering of radioelectronic systems terminology systematization...	19
MECHANICS OF FLUID, GAS AND PLASMA	30
Didenkulov O.I., Didenkulova I.I., Pelinovsky E.N. Parameterization of run-up characteristics of solitary waves in the bay of parabolic cross-section.....	30
Loshilova N.A., Kurkin A.A. Using the methods of mechanics of reacting media for modeling the suppression of forest fires with stationary and with moving source of water supply.....	37
Kozelkov A.S. Effects, accompanying entering of asteroid in the water medium.....	48
INFORMATION SCIENCE AND CONTROL SYSTEMS.....	78
Zhevnerchuk D.V., Lopatin D. A. Application of agent-based approach to design and implementation of the computer system configuration self-organization models.....	78
Moiseev A.N., Misevich P.V. Algorithm of audit of corporate automated system,s work.....	86
Nikulin E.A. Congruent transformation of polynomial models.....	93
Berezin A.V. Development of network equipment	102
MECHANICAL ENGINEERING AND AUTOMATION	108
Konishchev B.P., Pigalova E.A., Kurnikov N.A. Dynamics of welding strains on the basis of empirical data and application of technological receptions of decrease strain deviations of welded contour of aviation constructions.....	108
Sinichkin S.G. Analysis of the original control system for its modernization on the base of programmable controller.....	114
NUCLEAR POWER ENGINEERING AND APPLIED PHYSICS	121
Biryukov V.V., Grachev V.A., Lukoyanova T.S., Poroshenkov A.Y., Raevskii A.S. The influence of parasitic parameters laser oscillators on bandwidth of analog fiber transmission line.....	121
Beznosov A.V., Bokova T.A., Zudin A.D., Lvov A.V., Soloviev A.O., Chernysh A.S. Ways of regulating the thermodynamic activity oxygen lead coolant.....	130
Ganichev A.N., Anoshkin J.I. Analysis of possibility of use air-cooled heat exchangers as an alternative method of removing heat from low-power nuclear power plant.....	139

LAND-BASED TRANSPORT SYSTEMS	145
Vachidov U. Sh., Sogin A.V., Shapkin V.A., Shapkina J. V. Numerical study vibrations car units.....	145
Makarov V.S., Zezyulin D.V., Belyakov V.V. Review of the researches on terrain influence on snow cover characteristics.....	154
Orlov L.N., Tumasov A.V., Bagichev S.A. Improving of passive safety of motor vehicles... 163	163
Dolgoplov A.A., Merzlikin Y.Y., Naumov V.N., Chizhov D.A. Parameter determination and coordination of operating modes of lifting equipment and propulsion elements of amphibious vehicles and aircrafts with hovercraft.....	173
Pogulyaev Y.D., Baytimerov R.M., Naumov V.N., Chizhov D.A., Mashkov K.Y. New fuel delivery system for diesel engine allowing to control the pre-injection pressures and injection pressures after the main.....	178
	185
PROBLEMS OF SHIPBUILDING AND OCEAN TECHNOLOGY.....	
Vaganov A.B., Nguyen Ngoc Than. The dynamics of a vessel's movement at a sudden change of the load on it.....	185
Veshutkin V. D., Zhukov A. E. The experimental investigation of the vibration of the ship's hull on strain gauge models.....	193
Gerasimov S. I., Kuzmin V. A. Problem of modeling of the mechanical impulse of x-radiation on the thin-walled constructions.....	202
	210
ELECTRICAL ENGINEERING AND POWER INDUSTRY	
Daryenkov A.B., Khvatov O.S., Yurlov F.F., Usov N.V. Technical-economic basis of the use of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation of shaft... 210	210
Repin A.S., Gulyaev V.V., Burmakin O.A. Dynamic modes of diesel's electrical starting systems with capacitor stores of energy.....	215
Kuritsyn D.B., Sokolov V.V. Monitoring and remote control of modern industrial equipment.....	222
	228
METALLURGY AND SCIENCE MATERIALS	
Grebenkov S. K., Shatsov A.A., Skudnov V.A., Kleiner L.M. Metal science, heat and plastic treatment of metals Strengthening of low carbon martensitic steels of system Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb.....	228
Makarenko K.V. Optimization dimension-topological parameters of graphite phase in order to increase mechanical properties of cast iron	239
Mylnikov V.V., Mylnikova M. V., Chernyshov E.A., Shetulov D.I., Belyaev E.S. The analysis of change of indicators of fatigue resistance of steels and titanium alloys, depending on physical processes occurring on the surface.....	247
Skudnov V.A., Kharitonov S.V. Structure and Physics – Mechanical Properties of 44HXTIO Elinvar Alloy and Technigues of Manufacturing the Elastic Element of One- 253	253

Piece Gyroscop (of PБГ-MX - and PБГ-7-type) from One Blank.....	264
ECONOMICS, INNOVATIONS AND MANAGEMENT	
Krokhonyatkin M.D. Social responsibility of business: the possible mechanism of implementation.....	264
	272
SOCIAL SCIENCES, EDUCATIONAL INNOVATIONS, PR-TECHNOLOGIES.....	
Krylova A.V. The problems of gasification of the territories villa communities in urban and suburban areas: the social aspect.....	272
	278
Shilovskaya N. S. From humanism to anthropocentrism and back.....	
Shirsin G.A. Philosophical and methodological principles of science and practice joint development.....	285
MATHEMATICAL METHODS IN NATURAL, TECHNICAL ANDSOCIAL SCIENCES	294
Vereshchagina E.I. Statistical approach to the solving of the inverse problem of the games theory.....	294
	300
Igoshin V.A., Kuzin A.M., Barenboim M.N. About quasiplanimetry.....	

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК.681.783;68.137

В.А. Малахов¹, К.В. Попков², А.С. Раевский¹

ПОИСК КОМПЛЕКСНЫХ РЕШЕНИЙ ДИСПЕРСИОННОЙ ЗАДАЧИ ДЛЯ ВОЛН КРУГЛОГО ОТКРЫТОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ВОЛНОВОДА С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛЕНКОЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ООО «Современные технологии мониторинга», Н. Новгород²

Рассмотрен комбинированный метод поиска комплексных решений дисперсионных задач на примере круглого открытого диэлектрического волновода с металлической нанопленкой. Приведены результаты расчетов дисперсионных характеристик плазмон-поляритонных волн, распространяющихся в круглом диэлектрическом волноводе с металлической нанопленкой. Найдены комплексные решения дисперсионной задачи для рассматриваемой направляющей электродинамической структуры без учета потерь и с учетом потерь в металле.

Ключевые слова: металлическая нанопленка, дисперсионная задача, комплексные решения, плазмон-поляритонные волны.

Введение

Если краевая задача для направляющей электродинамической структуры является несамосопряженной, то даже при отсутствии диссипации энергии решения дисперсионного уравнения, наряду с действительными и мнимыми, могут быть комплексными [1]. В структурах с потерями все решения дисперсионного уравнения комплексные.

Так как комплексные решения дисперсионных уравнений соответствуют наиболее общим решениям несамосопряженных краевых задач, то необходимо разработать действенный метод поиска комплексных корней, позволяющий избежать появления ложных решений. В статье рассматривается поиск комплексных решений дисперсионной задачи на примере открытого диэлектрического волновода с металлической пленкой. Для этого применяется предложенный авторами комбинированный метод поиска комплексных решений дисперсионной задачи [2, 3].

Комбинированный метод поиска корней является комбинацией метода Мюллера и метода вариации фазы, что позволяет использовать только лучшие стороны обоих методов, а именно: быстроту метода Мюллера и возможность идентификации ложных корней методом вариации фазы [4].

Комбинированный метод поиска комплексных корней

Рассмотрим более подробно суть комбинированного метода поиска комплексных корней. На определенной частоте f_i область поиска по комплексному волновому числу $\beta = \beta_1 + i\beta_2$ разбивается на $K = N \cdot M$ подобластей (рис. 1) на интервале $\beta \in [\beta_{\text{нач}}, \beta_{\text{кон}}]$. На рис. 1 кружками показаны подобласти, в которых существуют решения.

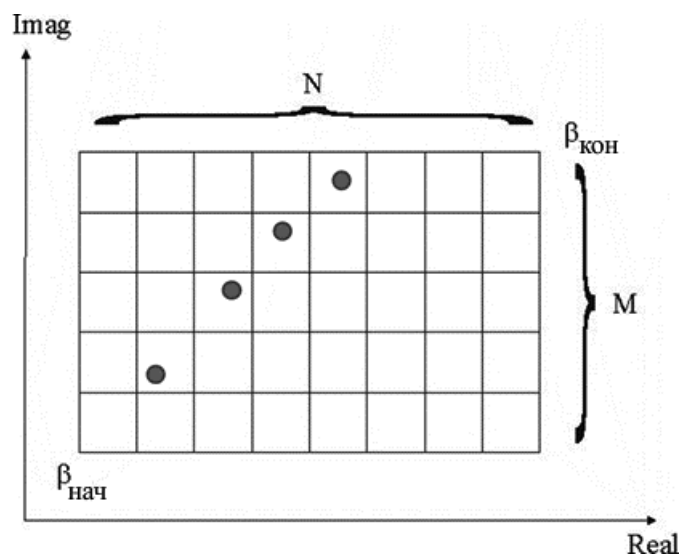


Рис. 1

В каждой прямоугольной подобласти последовательно выбираются три начальные точки, например, как показано на рис. 2, а далее методом Мюллера проверяется наличие корня.

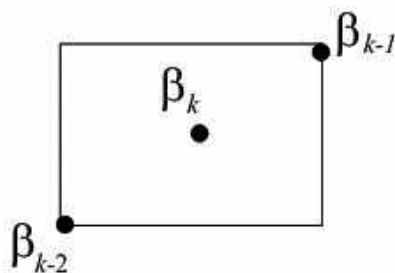


Рис. 2

Если предполагаемое решение в исследуемой подобласти найдено, то обходом по контуру, используя метод вариации фазы, проверяется, является ли найденное решение истинным корнем или локальным минимумом. Если методом вариации фазы подтверждается истинность найденного решения, оно записывается в память. Возможен также вариант поиска, когда сначала методом вариации фазы определяется наличие в данной подобласти решения, которое затем уточняется методом Мюллера и записывается в память. После этого происходит переход к следующей подобласти.

Когда анализ всех K подобластей закончен, происходит переход на следующую частоту $f_{i+1} = f_i + h_i$ и описанные действия повторяются до тех пор, пока не пройден заданный частотный диапазон.

Комбинированный метод поиска лишен недостатков, присущих методу Мюллера и методу вариации фазы. Он позволяет использовать быстроту нахождения комплексных корней методом Мюллера и однозначность идентификации комплексного корня методом вариации фазы.

В табл. 1 приведены результаты замеров времени при поиске комплексных корней одного и того же дисперсионного уравнения различными методами на персональном компьютере с процессором Intel® i7 950 с тактовой частотой 3.07 ГГц, размер ОЗУ – 6 Гб. Результаты были округлены в большую сторону. Для каждого метода в определенном частотном диапазоне найдено одинаковое количество комплексных корней дисперсионного уравнения волн рассматриваемой ниже структуры.

Таблица 1

Название метода	Время расчета, мин	Точность расчета
Метод половинного деления	17	0,00001
Метод Мюллера	5	0,00001
Метод вариации фазы	21	0,00001
Комбинированный метод	7	0,00001

Из табл. 1 видно, что наилучшие быстродействие показал метод Мюллера, но наравне с истинными решениями были получены ложные корни, которые метод Мюллера не исключает. Наибольшее время было затрачено при расчете методом вариации фазы, однако этот метод обладает свойством точной идентификации наличия или отсутствия корня в заданной области.

Метод половинного деления обладает достаточно большим временем поиска комплексных корней и кроме истинных решений выдает ложные (полюса).

Комбинированный метод показал быстродействие, близкое к методу Мюллера, но, в отличие от него, благодаря использованию метода вариации фазы, он выдает только истинные решения.

На основе комбинированного метода поиска комплексных корней была создана подпрограмма расчета дисперсионных характеристик исследуемых в диссертации направляющих структур в интегрированной среде разработки Microsoft Visual Studio 2010, на языке C++, и получено свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ[5]. Рассмотрим поиск комплексных корней на примере круглого открытого диэлектрического волновода с металлической пленкой.

Круглый открытый диэлектрический волновод с металлической пленкой

Рассматриваемая направляющая электродинамическая структура приведена на рис. 3.

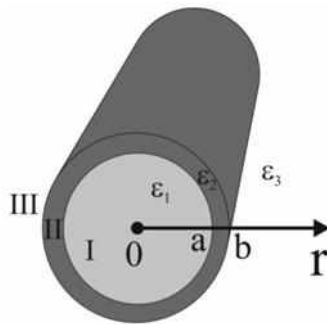


Рис. 3

Для рассматриваемой структуры ставится краевая задача на уравнении Гельмгольца:

$$\Delta \Pi_z^{e,m} + \epsilon \mu \omega^2 \Pi_z^{e,m} = 0. \tag{1}$$

Решения уравнения Гельмгольца для каждой из трех областей:

- I область (диэлектрический стержень)

$$\begin{cases} \Pi_{z1}^e = A_1 J_n(\alpha_1 r) \cos n \varphi e^{-i\beta z}; \\ \Pi_{z1}^m = B_1 J_n(\alpha_1 r) \sin n \varphi e^{-i\beta z}; \end{cases} \tag{2}$$

- II область (металлическая пленка)

$$\begin{cases} \Pi_{z2}^e = [A_2 J_n(\alpha_2 r) + B_2 Y_n(\alpha_2 r)] \cos n \varphi e^{-i\beta z}; \\ \Pi_{z2}^m = [\bar{A}_2 J_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y_n(\alpha_2 r)] \sin n \varphi e^{-i\beta z}; \end{cases} \tag{3}$$

- III область (внешняя бесконечная среда)

$$\begin{cases} \Pi_{z3}^e = A_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \cos n \varphi e^{-i\beta z}; \\ \Pi_{z3}^m = B_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \sin n \varphi e^{-i\beta z}, \end{cases} \quad (4)$$

где $\alpha_{1,2,3}$ – поперечные волновые числа первой, второй и третьей областей, которые связаны с продольным волновым числом β соотношением:

$$\varepsilon_{1,2,3} \mu_{1,2,3} \omega^2 = \alpha_{1,2,3}^2 + \beta^2, \quad (5)$$

где J_n, Y_n – функции Бесселя первого и второго рода, $H_n^{(2)}$ – функции Ханкеля второго рода.

Комплексная диэлектрическая проницаемость $\varepsilon_2 = \varepsilon_r + i\varepsilon_i$ второй области для металлической пленки в оптическом диапазоне в соответствии с теорией Друде-Зоммерфельда рассчитывается по формуле [6]:

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon_{r0} - \omega_p^2 / \omega^2; \quad (6)$$

$$\varepsilon_i(\omega) = \varepsilon_{i0} + \Gamma \omega_p^2 / \omega^3, \quad (7)$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi n_e e^2 / m_e} \approx 1.43 \cdot 10^{16} \text{ c}^{-1}$ – плазменная частота электронного газа; ε_{r0} – константа, учитывающая межзонные переходы в металле, обычно варьируется от 1 до 10, Γ – коэффициент затухания, учитывающий потери ($\Gamma \approx 10^{14} \text{ c}^{-1}$), $\varepsilon_{i0} = 0$.

Выражая через вектора Герца компоненты векторов напряженности электрического и магнитного поля, получаем

- I область:

$$E_{z1} = \alpha_1^2 A_1 J_n(\alpha_1 r) \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{z1} = \alpha_1^2 B_1 J_n(\alpha_1 r) \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{r1} = \left[-i\beta \alpha_1 A_1 J'_n(\alpha_1 r) - \frac{i\omega \mu_1 n}{r} B_1 J_n(\alpha_1 r) \right] \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{r1} = \left[-\frac{i\omega \varepsilon_1 n}{r} A_1 J_n(\alpha_1 r) - i\beta \alpha_1 B_1 J'_n(\alpha_1 r) \right] \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{\varphi 1} = \left[\frac{i\beta n}{r} A_1 J_n(\alpha_1 r) + i\omega \mu_1 \alpha_1 B_1 J'_n(\alpha_1 r) \right] \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{\varphi 1} = \left[-i\omega \varepsilon_1 \alpha_1 A_1 J'_n(\alpha_1 r) - \frac{i\beta n}{r} B_1 J_n(\alpha_1 r) \right] \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

- II область:

$$E_{z2} = \alpha_2^2 [A_2 J_n(\alpha_2 r) + B_2 Y_n(\alpha_2 r)] \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{z2} = \alpha_2^2 [\bar{A}_2 J_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y_n(\alpha_2 r)] \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{r2} = -i \left\{ \beta \alpha_2 [A_2 J'_n(\alpha_2 r) + B_2 Y'_n(\alpha_2 r)] + \frac{\omega \mu_2 n}{r} [\bar{A}_2 J_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y_n(\alpha_2 r)] \right\} \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{r2} = -i \left\{ \frac{\omega \varepsilon_2 n}{r} [A_2 J_n(\alpha_2 r) + B_2 Y_n(\alpha_2 r)] + \beta \alpha_2 [\bar{A}_2 J'_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y'_n(\alpha_2 r)] \right\} \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{\varphi 2} = i \left\{ \frac{\beta n}{r} [A_2 J_n(\alpha_2 r) + B_2 Y_n(\alpha_2 r)] + \omega \mu_2 \alpha_2 [\bar{A}_2 J'_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y'_n(\alpha_2 r)] \right\} \sin n \varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{\varphi 2} = -i \left\{ \omega \varepsilon_2 \alpha_2 [A_2 J'_n(\alpha_2 r) + B_2 Y'_n(\alpha_2 r)] + \frac{\beta n}{r} [\bar{A}_2 J_n(\alpha_2 r) + \bar{B}_2 Y_n(\alpha_2 r)] \right\} \cos n \varphi e^{-i\beta z};$$

- III область:

$$E_{z3} = \alpha_3^2 A_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \cos n\varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{z3} = \alpha_3^2 B_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \sin n\varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{r3} = \left[-i\beta \alpha_3 A_3 H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) - \frac{i\omega \mu_3 n}{r} B_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right] \cos n\varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{r3} = \left[-\frac{i\omega \varepsilon_3 n}{r} A_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) - i\beta \alpha_3 B_3 H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) \right] \sin n\varphi e^{-i\beta z};$$

$$E_{\varphi 3} = \left[\frac{i\beta n}{r} A_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) + i\omega \mu_3 \alpha_3 B_3 H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) \right] \sin n\varphi e^{-i\beta z};$$

$$H_{\varphi 3} = \left[-i\omega \varepsilon_3 \alpha_3 A_3 H_n^{(2)'}(\alpha_3 r) - \frac{i\beta n}{r} B_3 H_n^{(2)}(\alpha_3 r) \right] \cos n\varphi e^{-i\beta z};$$

Подставляем компоненты поля в граничные условия:

- 1) $E_{z1}|_{r=a} = E_{z2}|_{r=a}$
- 2) $E_{\varphi 1}|_{r=a} = E_{\varphi 2}|_{r=a}$
- 3) $H_{\varphi 1}|_{r=a} = H_{\varphi 2}|_{r=a}$;
- 4) $H_{z1}|_{r=a} = H_{z2}|_{r=a}$
- 5) $E_{z2}|_{r=b} = E_{z3}|_{r=b}$
- 6) $E_{\varphi 2}|_{r=b} = E_{\varphi 3}|_{r=b}$
- 7) $H_{\varphi 1}|_{r=b} = H_{\varphi 2}|_{r=b}$;
- 8) $H_{z1}|_{r=b} = H_{z2}|_{r=b}$

(8)

Получаем систему из восьми однородных уравнений относительно неизвестных амплитудных коэффициентов. Чтобы система имела нетривиальные решения, её определитель должен быть равен нулю.

Расчеты дисперсионных характеристик волн произведены при $\varepsilon_{r0} = 6$ для серебряной пленки [7].

На рис. 4 изображены дисперсионные характеристики четной 1 и нечетной 2 поверхностных плазмон-поляритонных волн (ППВ) и комплексной волны 3 без учета потерь в пленке для структуры со следующими параметрами: радиус диэлектрического стержня $a=100$ нм, толщина пленки 10 нм, $\varepsilon_1 = 2.84$, $\varepsilon_3 = 1$.

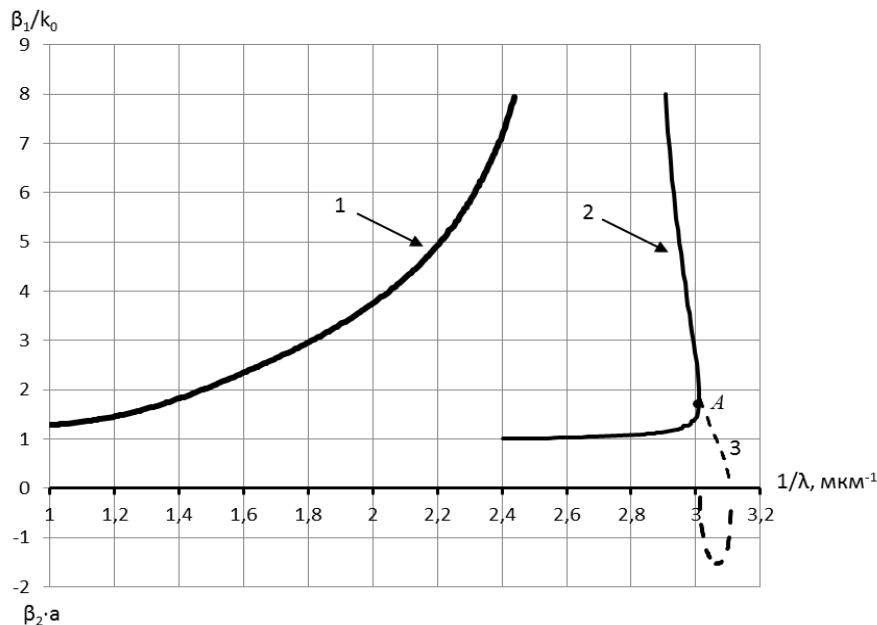


Рис. 4

На дисперсионной характеристике нечетной волны имеется двузначный участок, а в точке A образуется комплексная волна (показана пунктиром).

С учетом комплексности диэлектрической проницаемости металла дисперсионные характеристики и характеристики затухания волн для структуры со следующими параметрами: радиус диэлектрического стержня $a=100$ нм, толщина пленки 10 нм, (общий радиус 110 нм) $\varepsilon_1 = 2.84$, $\varepsilon_3 = 1$, приведены на рис. 5.

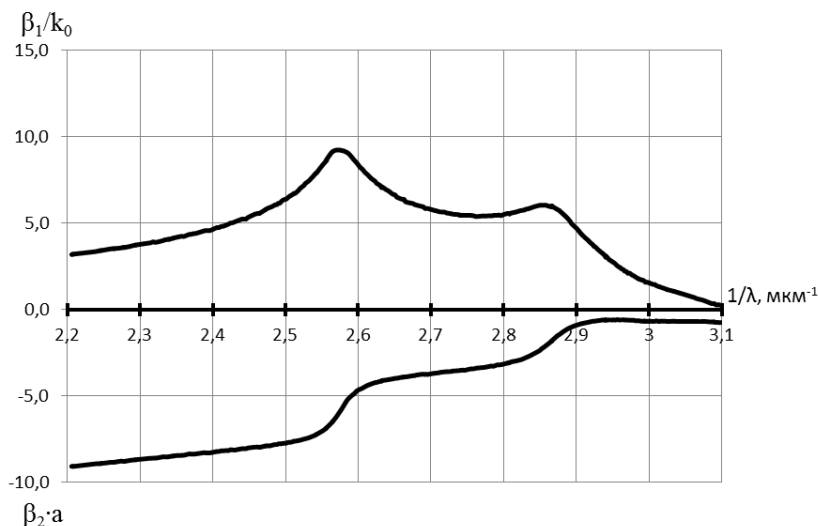


Рис. 5

Дисперсионная характеристика ППВ волны имеет два максимума, когда металлическая пленка окружена диэлектриками с разными диэлектрическими проницаемостями. Большой максимум (рис. 5) расположен на частоте, на которой $|\varepsilon_2|=|\varepsilon_1|=2.84$, а меньший максимум на частоте когда $|\varepsilon_2|=|\varepsilon_3|=1$. Разрывов в характеристике нет, а участок, соответствующий комплексной волне в среде без потерь, является продолжением дисперсионной характеристики ППВ волны на высоких частотах. Такая трансформация наблюдалась и в рассмотренных выше структурах.

На рис.6 изображена зависимость модуля компоненты электрического поля E_z от координаты r для электродинамической структуры с пленкой толщиной 10 нм, радиусом внутреннего слоя $a=100$ нм, $1/\lambda \approx 2,54$ мкм⁻¹, вблизи большого максимума.

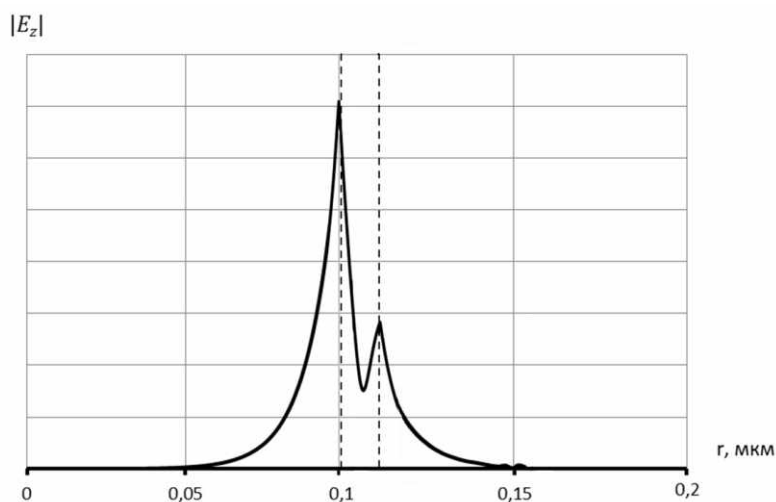


Рис. 6

Распределение $|E_z|$ от координаты r соответствует распределению компоненты электрического поля $|E_z|$ нечетной ППП волны. Так же как и в рассмотренных в данной главе структурах вблизи главного максимума значения $|E_z|$ со стороны границы металл-диэлектрик больше, чем поле со стороны границы металл-воздух.

На рис. 7, а приведены дисперсионные характеристики, а на рис. 7, б – характеристики затухания ППВ в диэлектрическом стержне с металлической нанопленкой: $a=5$ нм, $b=10$ нм, $\epsilon_1 = 2.84$, $\epsilon_3 = 1$, для нанопленки $\epsilon_{r,0} = 6$ (материал серебро), соотношение размеров слоев составляет $\frac{b-a}{b} = 0,5$. Характеристики, обозначенные цифрами от 1 до 6, соответствуют характеристикам плазмон-поляритонных волн металлического стержня с номерами 1 – 6 (рис. 7).

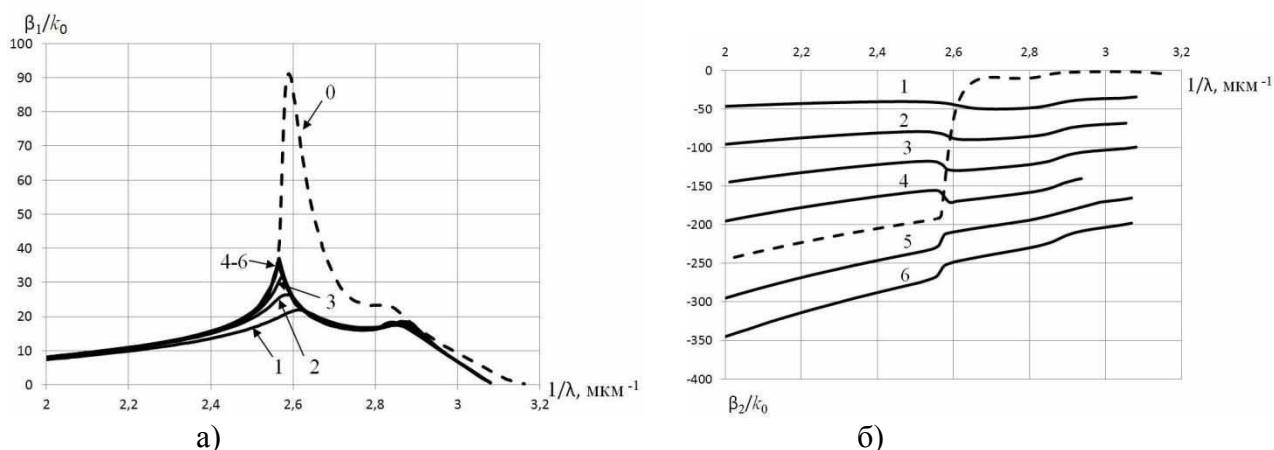


Рис. 7

Для этих волн так же, как и для аналогичных волн круглого металлического наностержня [8], существует связь между номером волны и количеством максимумов модуля компоненты поля $|E_z|$ в металлическом слое. Для первой волны имеется один максимум в металлическом слое, для второй – два и так далее.

Выводы

В статье продемонстрированы методика и возможность использования предложенного комбинированного метода для поиска комплексных решений дисперсионных задач. Показано существования в открытом диэлектрическом волноводе с металлической нанопленкой без потерь комплексных волн. Приведены дисперсионные характеристики плазмон-поляритонных волн круглого открытого диэлектрического волновода с металлической нанопленкой с учетом потерь в металле.

Библиографический список

1. **Раевский, А.С.** Комплексные волны / А.С. Раевский, С.Б. Раевский. – М.: Радиотехника, 2010. – 224 с.
2. **Бабкин, А.А.** О решениях дисперсионного уравнения волн круглого диэлектрического волновода, покрытого поглощающей пленкой / А.А. Бабкин [и др.] // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2010. Т.13. № 2.– С. 36–41.
3. **Бабкин, А.А.** Применение комбинированного метода поиска комплексных корней к решению дисперсионного уравнения волн круглого диэлектрического волновода, покрытого поглощающей пленкой / А.А. Бабкин, В.А. Малахов, К.В. Попков, А.С. Раевский // Физика и техниче-

- ские приложения волновых процессов: тезисы докладов IX Международной научно-технической конференции. – Челябинск. 2010. С. 23.
4. **Бритов, И.Е.** Целенаправленный поиск комплексных волн в направляющих электродинамических структурах / И.Е.Бритов, А.С. Раевский, С.Б. Раевский // Антенны. 2003. В. 5(72). С. 64–71.
 5. **Малахов, В.А.** Программа нахождения комплексных решений дисперсионных уравнений / В.А. Малахов, А.С. Раевский // Государственный реестр программ для ЭВМ. Свидетельство № 2010615410 от 23.08.2010 г. – 11 с.
 6. **Климов, В.В.** Наноплазмоника / В.В. Климов. – М.: Изд. Физматлит, 2010. – 480 с.
 7. **Федянин, Д.Ю.** Поверхностные плазмон-поляритоны с отрицательной и нулевой групповыми скоростями, распространяющиеся по тонким металлическим пленкам / Д.Ю. Федянин [и др.] // Квантовая электроника. 2009. Т. 39. № 8. С. 745–750.
 8. **Малахов, В.А.** Плазмон-поляритонные волны в цилиндрических направляющих структурах / В.А. Малахов, К.В. Попков, А.С. Раевский // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. 2013. Т. 16. № 2. С. 29–34.

*Дата поступления
в редакцию 08.07.2014*

V. A. Malakhov¹, K.V.Popkov² A.S. Raevskii¹

THE SEARCH OF COMPLEX SOLUTIONS DISPERSION TASKS OF WAVES OF THE ROUND OPEN DIELECTRIC WAVEGUIDE WITH A METAL FILM

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
LLC "Modern technologies of monitoring", N. Novgorod²

Purpose: The search of complex solutions dispersion tasks of waves of guiding electrodynamic structures, using the combined method.

Design/methodology/approach: Using a combined method of searching for the calculation of complex roots of the dispersion characteristics of the round open dielectric waveguide with metal film.

Findings: The existence of complex waves in open dielectric waveguide with a metal nanofilm lossless is shown. The dispersion characteristics of the plasmon-polariton waves round open dielectric waveguide with a metal nanofilm taking into account losses in the metal are discussed.

Research limitations/implications: These results provide a starting point for the development of search techniques complex solutions of dispersion problems for various electrodynamic structures.

Originality/value: An original method of finding the complex roots.

Key words: metal nanofilm, the dispersion problem, complex solutions of dispersion problems, plasmon-polariton waves.

УДК 001.4:621.396.6

Н. М. Бобков

СИСТЕМАТИЗАЦИЯ ТЕРМИНОЛОГИИ В ОБЛАСТИ КОНСТРУИРОВАНИЯ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СИСТЕМ

Открытое акционерное общество «Федеральный научно-производственный центр «Нижегородский научно-исследовательский приборостроительный институт «Кварц» имени А. П. Горшкова»
(ОАО «ФНПЦ «НИИПИ «Кварц» имени А. П. Горшкова)

Цель статьи – обратить внимание авторов учебников (ученых, преподавателей) на проблемы профессиональной лексики учебников по конструированию и привлечь их к работе по ее совершенствованию.

Статья содержит предложения по упорядочению использования некоторых встречающихся в литературе по конструированию профессионализмов. Основной раздел статьи представляет собой небольшой словарь, в котором даны взаимосвязанные определения понятиям, выражаемыми известными словами. Введены и несколько новых терминов. Номенклатура терминов определена при рассмотрении вопросов конструирования РЭС, но большинство терминов являются общетехническими.

Ключевые слова: разработка технических систем, конструирование, проектирование, терминология конструирования, принципы проектирования, принципы базирования

Введение

Наличие в знаниях системы понятий и терминов является одним из критериев научности этого знания. В конструировании такой системы нет [1], что свидетельствует о фактическом отсутствии науки о конструировании. Это отрицательно сказывается на качестве подготовки конструкторов в учебных заведениях [2, 3]. Научная терминология необходима в первую очередь в учебниках по конструированию, в которых эта наука должна излагаться в наиболее понятном и комплексном виде. Пока же такие учебники не только не имеют собственной терминологии конструирования, но нередко искажают и терминологию, заимствованную из ЕСКД [4, 5].

В отличие от словарей [6, 7] и других, в которых даются определения всем значениям многозначных профессионализмов, в словаре статьи приводится только одно значение. В этом и только в этом значении данный профессионализм предлагается использовать в качестве термина в работах по конструированию. Значения подбирались так, чтобы выполнялись требования документов [8, 9] по однозначности терминов и отсутствию синонимов. Определения в основном разделе статьи обозначены буквой *D* с порядковым номером: *D1, D2 ...*. В примечаниях в конце статьи приведены и другие встречающиеся в литературе по конструированию значения многозначных слов. Так как однозначность терминов – одно из основных требований, предъявляемых к научной терминологии, – слова в значениях, приведенных в примечаниях, в работах по конструированию использоваться не должны.

Термины и определения некоторых понятий конструирования

Сокращения

ЕСКД – Единая система конструкторской документации

КД – конструкторская документация

РЭС – радиоэлектронная система

СРПП – Система разработки и постановки продукции на производство

ТЗ_{ОКР} – техническое задание на опытно-конструкторскую работу

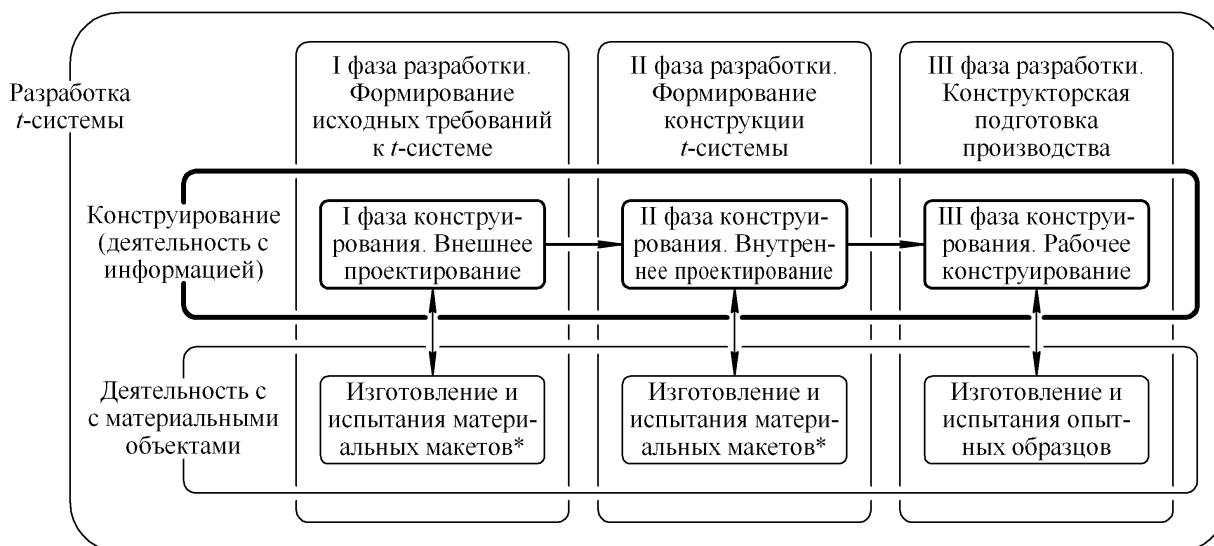
T-система – техническая система

D1. Техническая система (t-система) – многокомпонентное, структурно-организованное целое, искусственно созданное человеком из материалов и процессов природы на основе действующих в ней закономерностей с учетом достижений науки и техники с целью реализации определенных функций труда и жизнедеятельности человека [10].

Одним из видов *t*-систем являются изделия в значении, установленном в ЕСКД [11].

D2. Конструкция t-системы – система заранее (т. е. до изготовления самой *t*-системы) продуманных свойств *t*-системы, характеризующая состав, назначение, взаимное расположение, форму, размеры, материалы и взаимосвязи элементов *t*-системы [12]¹⁾.

Конструкция *t*-системы есть идеальная (не материальная) модель этой *t*-системы. В начале конструирования – это интуитивная модель. В процессе конструирования она уточняется и преобразуется в знаковую, при «бумажном» способе оформления КД – графическую. Как модель конструкция используется в мысленных экспериментах, проводимых при разработке *t*-системы, с целью оценки соответствия ее предъявляемым требованиям. С точки зрения теории познания конструкция есть мысленный образ *t*-системы, созданный продуктивным творческим воображением конструктора. Понятие «конструкция» является важнейшей категорией науки о конструировании.



* а также, материальных моделей и экспериментальных образцов

Рис. 1. Фазы разработки и конструирования *t*-системы

D3. Конструктивное решение – любая подсистема или любой элемент конструкции *t*-системы.

D4. Радиоэлектронная система (РЭС) – *t*-система, в основу функционирования которой положены принципы радиотехники и/или электроники²⁾.

Если РЭС представляет собой изделие по ЕСКД, она может называться *радиоэлектронным изделием*.

D5. РЭС-сооружение – радиоэлектронное изделие, рассматриваемое (изучаемое, проектируемое) как геометрически неизменяемая механическая система, подверженная воздействию силовых нагрузок и обладающая для их восприятия механическими прочностью, жесткостью и устойчивостью [13].

D6. Несущая система РЭС – входящая в РЭС-сооружение *t*-система, воспринимающая и передающая к точкам крепления или точкам опоры РЭС усилия от веса и инерции частей РЭС, обеспечивающая заданное пространственное расположение частей РЭС при внеш-

них воздействующих факторах с характеристиками, находящимися в пределах допустимых значений³⁾.

Если несущая система представляет собой изделие по ЕСКД, она может называться *несущим изделием*.

D7. Разработка t-системы – процесс создания образцов и КД, необходимой для изготовления *t-системы*.

Общий порядок разработки *t-систем* установлен стандартами СРПП. Разработку можно разделить на три фазы (рис. 1) [10, 14].

D8. Конструирование – часть разработки *t-системы*, включающая в себя исследование потребности в *t-системе* и рыночного спроса на нее, определение потребительских и производственных характеристик, разработку конструкции и КД, необходимой для организации промышленного производства.

В отличие от разработки, конструирование *t-системы* не включает в себя работы, непосредственно связанные с изготовлением *t-системы* и ее испытаниями.

D9. Проектирование – часть конструирования *t-системы*, включающая в себя исследование потребности в *t-системе* и рыночного спроса на нее, определение потребительских и производственных характеристик, разработку конструкции и проектной КД на *t-систему*⁴⁾.

Технические решения, принятые при проектировании, обеспечивают основные характеристики новой *t-системы*. При качественном выполнении проектирования дальнейшее конструирование представляет собой менее творческий (по сравнению с проектированием) процесс разработки рабочей КД, который для несложных изделий практически сводится к рутинному детализованию.

D10. Внешнее проектирование – процесс формирования исходных требований к *t-системе*, включающий в себя выявление потребности в *t-системе* и рыночного спроса на нее, определение потребительских и производственных характеристик, установление условий эффективного использования *t-системы*, оформление ТЗ_{ОКР}⁴⁾.

D11. Внутреннее проектирование – процесс поиска, обоснования и принятия конструктивных решений, обеспечивающих соответствие разрабатываемой *t-системы* установленным в ТЗ_{ОКР} характеристикам⁴⁾.

D12. Рабочее конструирование – процесс разработки производственной, эксплуатационной и ремонтной КД на *t-систему* по результатам проектирования⁴⁾.

D13. Компоновка t-системы – подсистема конструкции *t-системы*, характеризующая совокупность внешних форм и взаимного расположения частей *t-системы*.

D14. Компонование t-системы – одна из операций проектирования *t-системы*, заключающаяся в разработке (составлении, формировании) компоновки *t-системы*⁵⁾.

D15. Прототип – наиболее близкий по основным характеристикам (функциональному назначению, конструкции, производственным и другим данным) аналог разрабатываемой *t-системы*, основные составные части и/или конструктивные решения которого используются в разрабатываемой *t-системе*.

D16. Принцип проектирования по прототипу (принцип прототипа) – принцип проектирования, заключающийся в использовании в новой *t-системе* хорошо зарекомендовавших себя конструктивных решений и составных частей существующих *t-систем*.

Принцип прототипа используется, например, при модифицировании, модернизации и совершенствовании *t-систем*. При разработке принципиально новых *t-систем* этот принцип тоже используется:

- при проектировании тех составных частей новой *t-системы*, у которых имеются прототипы;
- совершенствовании на последующих стадиях работы удачных конструктивных решений и составных частей, созданных на начальных стадиях.

Существуют два метода проектирования на основе принципа прототипа (рис. 2). При первом методе в проектируемой t -системе применяются материальные объекты – составные части прототипа, который для этого случая можно обозначить символом-словом « i -прототип». I -прототип обеспечивает разработку новой t -системы за счет дополнительного присоединения, снятия, замены или изменения пространственного сочетания различных составных частей. I -прототип в целом или его основные части включаются в спецификацию новой t -системы как примененные изделия и изготавливаются по своему комплексу конструкторских документов.

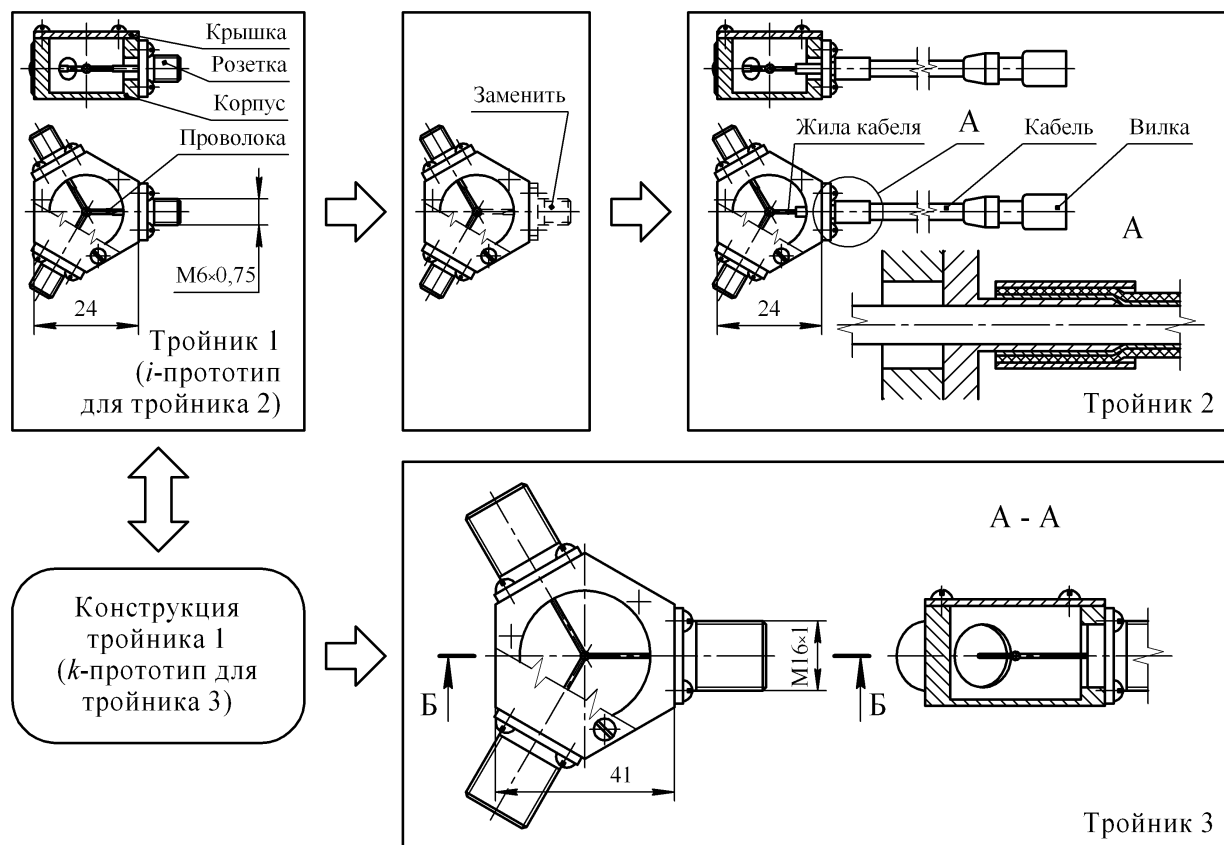


Рис. 2. Различие двух методов проектирования на основе принципа прототипа

При втором методе из прототипа в проектируемой t -системе применяются нематериальные объекты – конструктивные решения, составляющие конструкцию t -системы-прототипа (k -прототипа). K -прототип определяет количественные и качественные характеристики новой t -системы относительно размеров, форм, материалов, составных частей и их соединений между собой. КД, содержащая информацию о k -прототипе, используется не для изготовления по ней изделий, а как образец для разработки КД новой t -системы, по которой последняя и должна изготавливаться.

D17. Типовое изделие – прототип, основные составные части которого обязательны для применения при разработке некоторой совокупности (семейства, ряда) t -систем⁶⁾.

D18. Типовая конструкция – конструкция прототипа, основные конструктивные решения которого обязательны для применения при разработке некоторой совокупности (семейства, ряда) t -систем⁶⁾.

Обязательность использования составных частей (конструктивных решений) – признак, по которому типовое изделие (типовую конструкцию) отличают от остальных прототипов.

D19. ТНС РЭС (ТНС) – система типовых несущих изделий и/или типовых конструкций несущих систем РЭС⁶⁾.

D20. Принцип группового проектирования – принцип проектирования, заключающийся в одновременном (параллельном) проектировании нескольких взаимно унифицированных t -систем.

D21. Агрегат – составная часть (деталь или сборочная единица) t -системы, занимающая высший уровень в иерархическом строении t -системы [15].

Составные части в виде наборов предметов – комплексы, комплекты – агрегатами не считаются. Если в рассматриваемую t -систему A входят комплексы и/или комплекты, то агрегатами t -системы A считаются сборочные единицы и детали, занимающие высший уровень в иерархическом строении этих наборов (рис. 3).

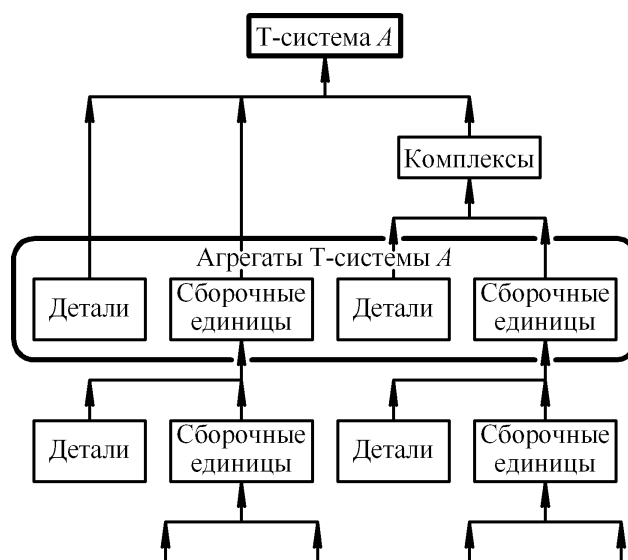


Рис. 3. К определению понятия «агрегат»

D22. Принцип агрегатного проектирования – комплексный подход к проектированию t -системы, при котором она рассматривается как представитель некоторого семейства разнообразных t -систем, унифицированных по основным агрегатам, и компоуется путем изменения количества, сочетания и взаимного расположения агрегатов [15].

T -системы, входящие в семейство, и составляющие их агрегаты могут быть освоены в производстве, находиться в разработке или только планироваться к разработке. Когда разрабатываемая t -система составляется из уже разработанных агрегатов, ее конструирование заключается в выпуске только основного комплекта КД, поскольку на агрегаты документация уже существует.

D23. Модуль-агрегат (модуль) – представитель набора агрегатов t -системы, разных по выполняемым функциям, но взаимозаменяемых по геометрической форме и размерам.

D24. Электронный модуль – модуль-агрегат РЭС, в основу функционирования которого положены принципы радиотехники и электроники.

D25. Принцип модульного проектирования – принцип проектирования, заключающийся в таком применении принципа агрегатного проектирования, когда агрегаты унифицируются по геометрическим параметрам (форме и размерам) так, чтобы обеспечить максимальное заполнение компоновочного пространства t -системы.

Модульные t -системы выделяются из агрегатных немодульных t -систем геометрической упорядоченностью и согласованностью формы и размеров агрегатов, геометрической и размерной совместимостью и взаимозаменяемостью агрегатов, причем агрегатов не обязательно совместимых и взаимозаменяемых функционально.

D26. Базирование – придание заготовке или изделию требуемого положения относительно выбранной системы координат [16].

D27. База – поверхность или выполняющее ту же функцию сочетание поверхностей, ось, точка, принадлежащая заготовке или изделию и используемая для базирования [16].

D28. База основная – совокупность участков общей поверхности детали (сборочной единицы), при помощи которых определяется положение этой детали (сборочной единицы) в *t*-системе, составной частью которой деталь (сборочная единица) является⁷⁾.

D29. База рабочая – совокупность участков рабочей поверхности детали (сборочной единицы), при помощи которых определяется положение других составных частей *t*-системы относительно данной детали (сборочной единицы)⁷⁾.

D30. Базовый агрегат – агрегат, с которого начинают сборку *t*-системы, присоединяя к нему другие агрегаты этой *t*-системы.

D31. Кинематический принцип базирования – принцип базирования, заключающийся в применении высших точечных кинематических пар в соединениях и статически определимых механических систем (рис. 4, а, з)⁸⁾.

D32. Полукинематический принцип базирования – принцип базирования, заключающийся в применении высших линейных кинематических пар в соединениях и статически определимых механических систем (рис. 4, б, д)⁸⁾.

D33. Силовой принцип базирования – принцип базирования, заключающийся в применении низших кинематических пар в соединениях и допустимости применения статически неопределимых механических систем (рис. 4, в, е)⁸⁾.

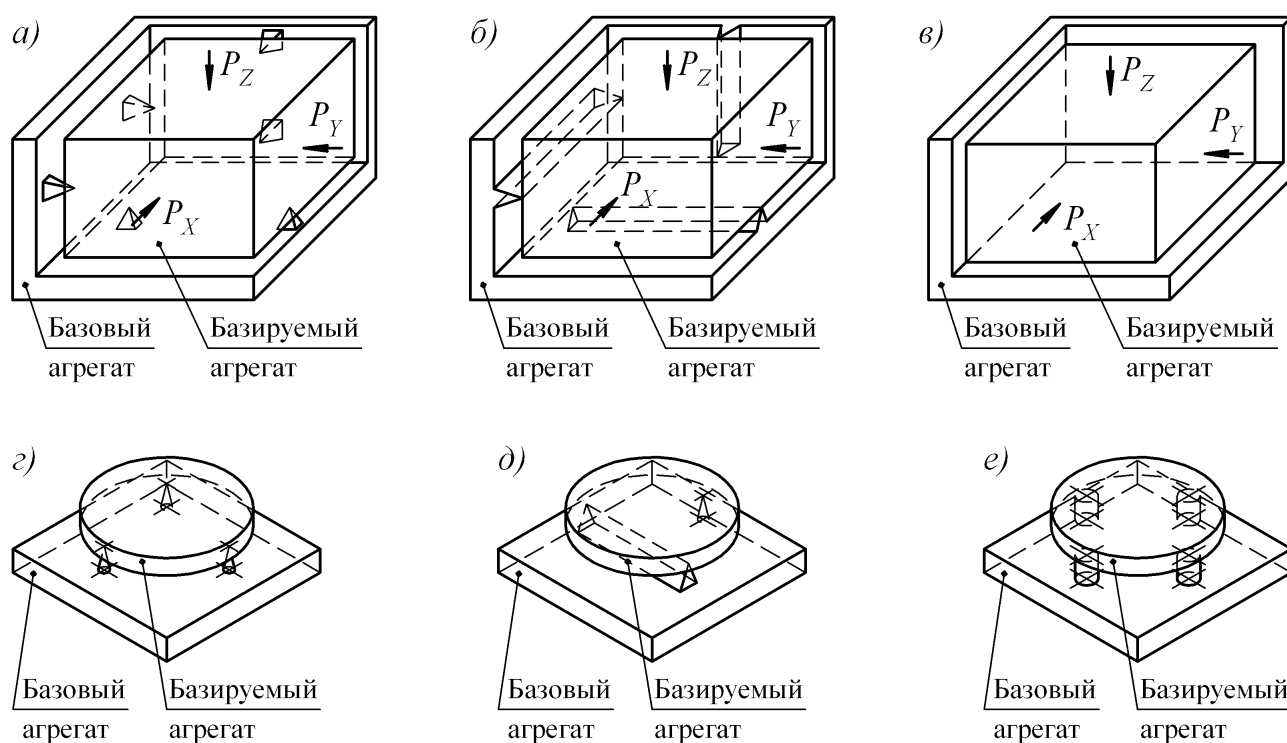


Рис. 4. Кинематический (а, з), полукинематический (б, д) и силовой (в, е) принципы базирования

Примечания

¹⁾ Существующие определения понятий, выражаемых словом «конструкция», можно разделить на две группы, примерно соответствующие двум определениям из словаря [7]: 1) совокупность признаков изделия, характеризующая его состав, взаимное расположение и связь частей, форму и взаимное расположение поверхностей деталей и соединений, их состояние, размеры, материалы и информационную выразительность (например, конструкция машины – равноценно понятию устройство машины в смысле, как она устроена); 2) сооружения и части сооружений, механические соединения частей, несущие части машин и т. п. (например, сварные конструкции, металлоконструкции,

железобетонные конструкции и др. устройства в смысле названия изделий, предметов). В первом значении конструкция – абстрактное отражение некоторой t -системы (нематериальный объект), во втором – некоторая t -система (материальный объект). Значение слова «конструкция» по определению $D2$ соответствует первому значению этого слова по словарю [7].

Нередки случаи, когда «конструкция» представляет собой лишнее слово-паразит, например:

- основание – элемент конструкции печатной платы, на поверхности или на поверхности и в объеме которого расположен проводящий рисунок или система проводящих рисунков печатной платы [17];
- конструкция детали должна иметь форму, обеспечивающую ориентированную установку в накопителях [18];

Без ущерба для ясности слово «конструкция» из этих формулировок можно убрать:

основание – элемент печатной платы, на поверхности или на поверхности и в объеме которого расположен проводящий рисунок или система проводящих рисунков печатной платы;
деталь должна иметь форму, обеспечивающую ориентированную установку в накопителях.

²⁾ Термин «радиоэлектронная система» по определению $D4$ следует использовать вместо термина «радиоэлектронное средство» по стандарту [19]. По этому стандарту радиоэлектронное средство (изделие и его составные части, в основу функционирования которых положены принципы радиотехники и электроники) является родовым понятием для понятия «радиоэлектронная система». Но любое РЭС (радиоэлектронная система, радиоэлектронный комплекс, радиоэлектронное устройство, радиоэлектронный функциональный узел) представляет собой радиоэлектронную систему, если термин «система» понимать как в работах по системному конструированию техники. Слово «система», выражающее широкое общенаучное понятие, нельзя использовать для наименования узкоотраслевого понятия. Требованию системности соответствует следующее соотношение между понятиями: система $\rightarrow t$ -система \rightarrow радиоэлектронная система \rightarrow радиоэлектронное изделие.

³⁾ Используемые в литературе по конструированию РЭС термины «конструкция РЭС» [20] и «несущая конструкция РЭС» [21] не соответствует термину «конструкция t -системы» по определению $D2$. Под конструкцией РЭС следует понимать систему заранее продуманных свойств РЭС, характеризующую состав, назначение, взаимное расположение, форму, размеры, материалы и взаимосвязи элементов РЭС. Термин «конструкция РЭС» в значении по учебнику [20] в большинстве случаев может быть заменен новым термином «РЭС-сооружение». Вместо термина «несущая конструкция» лучше использовать его известный синоним «несущая система» [22, 23].

⁴⁾ В некоторых публикациях слово «проектирование» используется как синоним слова «разработка», а словом «конструирование» называют часть процесса проектирования (в смысле – разработки), в других наоборот словом «проектирование» называют часть процесса конструирования. Есть работы, в которых словом «проектирование» называют процесс, предшествующий конструированию. В литературе внешним проектированием называют не фазу конструирования, а всю первую фазу разработки, внутренним проектированием – совокупность второй и третьей фаз разработки. Третью фазу разработки часто называют рабочим проектированием.

В ЕСКД [24] конструкторские документы в зависимости от стадии разработки подразделяются на проектные и рабочие (рис. 5, *а*). Терминологии ЕСКД соответствует соотношение между конструированием и проектированием, изображенное на рис. 5, *б*. Процесс проектирования t -систем – это часть (этап, фаза) процесса их конструирования. Конструирование, в свою очередь, есть часть разработки t -систем.

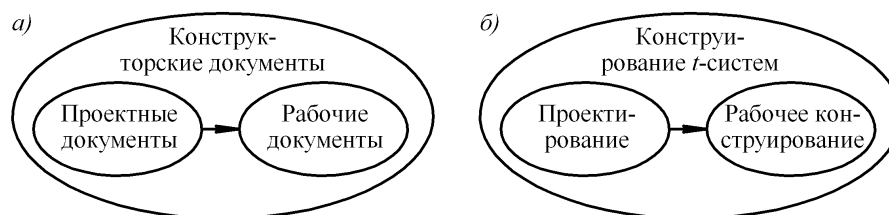


Рис. 5. Соотношение между видами конструкторских документов по ЕСКД и соответствующее соотношение между фазами работ по конструированию t -систем

⁵⁾ В книгах по конструированию РЭС и процесс – компонование – и результат этого процесса – компоновку – называют одним словом «компоновка».

⁶⁾ В работе [25] дано следующее определение: *типовое (базовое) изделие* – конкретный тип изделия, основные составные части которого применяют при конструировании ряда изделий. По определениям из рекомендаций [26] *базовое изделие* – конкретное изделие, основные составные части которого обязательны для применения при конструировании изделий ряда; *базовая конструкция изделия* – конструктивное решение, предназначенное для применения в конструкциях изделий ряда.

По рекомендациям [27] *базовое изделие* – изделие, являющееся конструктивной основой для создания его модификаций. Понятие «базовое изделие» по этим рекомендациям – объединение понятий «базовое изделие» и «базовая конструкция изделий» по рекомендациям [26].

В составе термина «базовая несущая конструкция» по стандарту [21] объединение понятий «базовое изделие» и «базовая конструкция изделий» по рекомендациям [26] называется *базовой конструкцией*.

Термины «базовое изделие», «базовая конструкция» и «базовая несущая конструкция» по [21, 26, 27] относятся к терминологии унификации [28].

В стандарте [29] *базовая деталь (базовая сборочная единица)* – деталь (сборочная единица), с которой начинают сборку изделия, присоединяя к ней другие детали и сборочные единицы. Согласно ЕСКД детали и сборочные единицы – виды изделий, и объединение понятий «базовая деталь» и «базовая сборочная единица» логично называть базовым изделием, несмотря на то, что в стандарте [29] этого термина нет. Такое базовое изделие – составная часть более сложного изделия, служащая для базирования и закрепления других составных частей последнего (носитель баз по стандарту [16]).

Термин «базовое изделие» в этом значении целесообразно относить к терминологической системе базирования.

В нормативной и технической литературе можно встретить и другие термины с прилагательным «базовый» (базовый образец, базовый агрегат, базовая поверхность и т. д.). Термин «базовая несущая конструкция» имеет несколько синонимов: «унифицированные типовые конструкции (УТК)» [30], «универсальные типовые конструкции (УТК)» [31], «типовые несущие конструкции» [32, 33].

Чтобы избежать путаницы в понятиях при одновременном рассмотрении вопросов базирования и унификации прилагательное «базовый» в терминах «базовое изделие», «базовая конструкция», «базовая несущая конструкция» по документам [21, 26, 27] предлагается заменить прилагательным «типовой».

Из практики применения БНК и анализа стандартов на них видно, что БНК в значении по стандарту [20] в зависимости от конкретных условий в предложенных здесь терминах следует называть *типовыми несущими изделиями РЭС* и *типовыми конструкциями несущих систем РЭС*. Для обозначения объединения этих понятий предлагается аббревиатура ТНС. Это сокращение – замена сокращений БНК (базовые несущие конструкции) и УТК (унифицированные или универсальные несущие конструкции).

⁷⁾ Теория базирования изучается как раздел технологии машиностроения [34, 35], и стандарт [16] учитывает потребности, в основном, этой отрасли знания. Недостаток стандарта – неудобная для науки о конструировании классификация поверхностей изделий. Поверхности деталей в стандарте делятся на: исполнительные – поверхности, при помощи которых деталь выполняет свое служебное назначение; основные базы – поверхности, при помощи которых определяется положение данной детали в изделии; вспомогательные базы – поверхности, при помощи которых определяется положение присоединяемых деталей относительно данной; свободные – поверхности, не соприкасающиеся с поверхностями других деталей.

По этим определениям получается, например, что поверхность А кронштейна (рис. 6, а) – основная база, поверхность Б – вспомогательная база. Но служебное назначение кронштейна состоит в базировании некоторого изделия, поверхность Б является основной исполнительной поверхностью, и ее стандартное наименование «вспомогательная база» – неправильно ориентирующий термин.

Поверхность А волновода (рис. 6, б) не соприкасается с поверхностями других деталей и по стандарту [16] должна относиться к свободным, но в волноводе эта поверхность выполняет функцию, для которой волновод предназначен, т. е. является исполнительной. Поверхности Б и В волновода – безусловно, базы, но какую из них считать основной, а какую – вспомогательной зависит от того, с какой из них начнется установка волновода при монтаже.

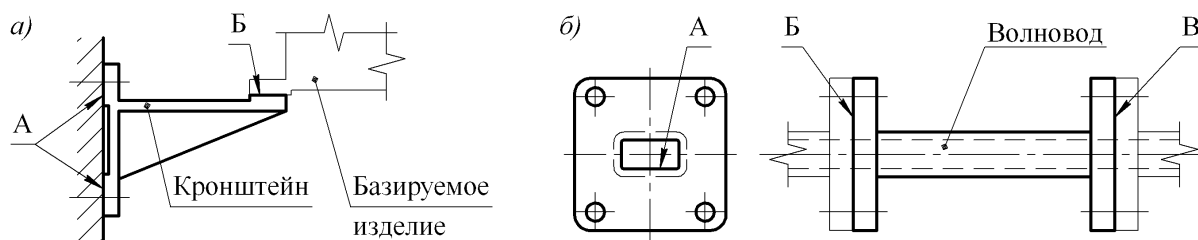


Рис. 6. Примеры поверхностей кронштейна (а) и волновода (б)

В классификации поверхностей, приведенной в учебнике [35] (рис. 7, а), некоторые из этих недостатков устранены, но и эта классификация не для конструирования. Не подходит для задач конструирования и классификация поверхностей деталей по их функциональной роли в сборочных соединениях (рис. 7, б) [36]. Поверхность А волновода (рис. 6, б) является функциональной, но несопрягающейся.

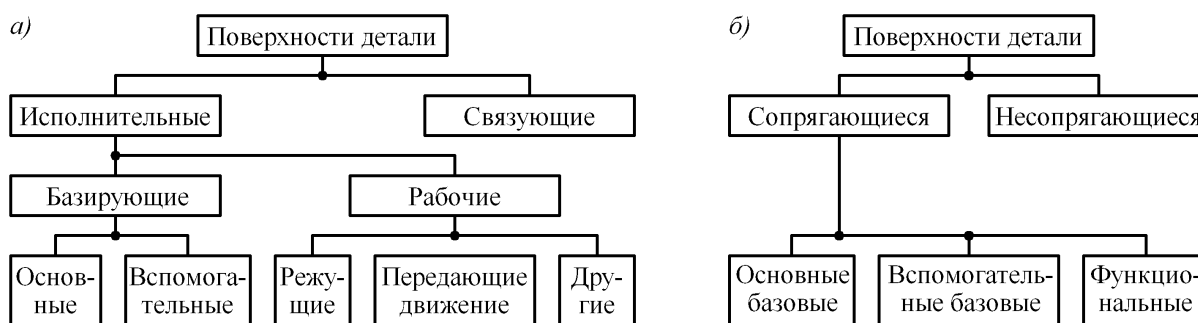


Рис. 7. Некоторые схемы классификации поверхностей деталей

В науке о конструировании поверхности деталей (а также и некоторых сборочных единиц), по мнению автора, лучше классифицировать в соответствии со схемой на рис. 8.

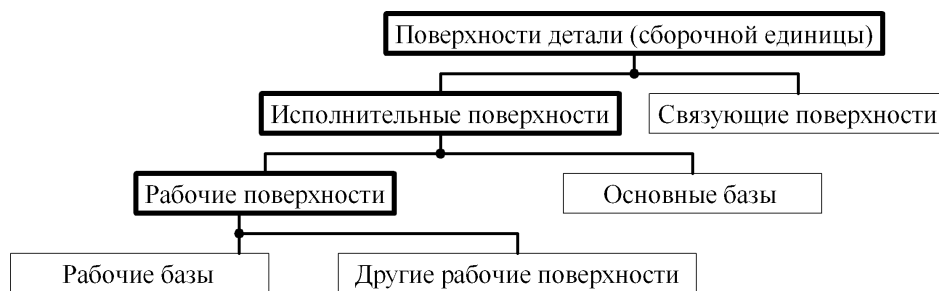


Рис. 8. Классификация поверхностей изделий для задач конструирования

В процессе выполнения деталью или сборочной единицы своего служебного назначения ее исполнительные поверхности находятся в полезном взаимодействии с окружающей средой: соприкасаются (сопрягаются) с другими изделиями, проводят электрический ток, отражают или поглощают световые лучи, электромагнитные поля и т. д.

Вспомогательные базы, по стандарту [16], предназначены для выполнения деталью или сборочной единицей одной из ее функций, потому их следует относить к рабочим поверхностям.

«Свободные поверхности», по стандарту [16], совсем не свободные. Термин «связующая поверхность» из [35] правильнее отражает назначение этих поверхностей – объединить исполнительные поверхности в единую замкнутую пространственную поверхность, ограничивающую тело детали или сборочной единицы.

⁸⁾ Кинематический, полукинематический и силовой принципы базирования в литературе (например, в [23, 37]) неудачно, по мнению автора, называют кинематическим (или геометрическим), полукинематическим и машиностроительным методами конструирования. Поскольку приводимые в

литературе определения методов содержат только самые общие положения (идеи), а не конкретные указания или рекомендации к действиям, правильнее использовать термин «принцип». Прилагательное «машиностроительный» в наименовании одного из «методов» не согласуется с общетехническим их применением. Область использования этих принципов – базирование, т. е. более узкая, чем конструирование вообще.

Библиографический список

1. **Бобков, Н. М.** Основы конструирования. Проблемы терминологии // Вестник машиностроения. 2002. № 9.
2. **Бобков, Н. М.** Что такое конструирование радиоэлектронных средств? // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2008. № 1, 2.
3. **Бобков, Н. М.** Вуз или колледж? О качестве подготовки конструкторов радиоэлектронных средств // Стандарты и качество. 2011. № 10.
4. **Бобков, Н. М.** ЕСКД и СРПП в учебных конструкторских разработках // Стандарты и качество. 1999. № 6.
5. **Бобков, Н. М.** Применение положений стандартов ЕСКД в публикациях по конструированию: Типичные ошибки // Стандарты и качество. 2004. –№ 8.
6. Новый политехнический словарь / под ред. А. Ю. Ишлинский. – М.: «Большая Российская энциклопедия», 2000.
7. **Крайнев, А. Ф.** Механика. Фундаментальный словарь / А. Ф.Крайнев. – М.: Машиностроение, 2001.
8. Краткое методическое пособие по разработке и упорядочению научно-технической терминологии. – М.: Наука, 1979.
9. Р 50.1.075 – 2011. Рекомендации по стандартизации. Разработка стандартов на термины и определения.
10. **Амиров, Ю. Д.** Стандартизация и проектирование технических систем / Ю. Д. Амиров. – М.: Изд-во стандартов, 1985.
11. ГОСТ 2.101 – 68. ЕСКД. Виды изделий.
12. **Бобков, Н. М.** Категории науки о конструировании // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2010. № 1, 2.
13. **Бобков, Н. М.** Радиоэлектронные средства как строительные сооружения // Системы и средства связи, телевидения и радиовещания. 2010. № 1, 2.
14. **Бобков, Н. М.** О конструкторской терминологии национальных стандартов // Стандарты и качество. 2012. № 9.
15. **Бобков, Н. М.** Агрегатное и модульное проектирование технических систем // Справочник. Инженерный журнал. 2009. № 5.
16. ГОСТ 21495 – 76. Базирование и базы в машиностроении. Термины и определения.
17. ГОСТ Р 53386 – 2009. Платы печатные. Термины и определения.
18. РД 50-703 – 91. Инструкция. Конструкции базовые несущие радиоэлектронных средств. Технологические требования.
19. ГОСТ Р 52003 – 2002. Уровни разукрупнения радиоэлектронных средств. Термины и определения.
20. **Кофанов, Ю. Н.** Теоретические основы конструирования, технологии и надежности радиоэлектронных средств: учебник для вузов / Ю. Н. Кофанов. – М.: Радио и связь, 1992.
21. ГОСТ Р 51676 – 2000. Конструкции несущие базовые радиоэлектронных средств. Термины и определения.
22. Детали и механизмы металлорежущих станков. В 2-х т. Т. 1. Общие основы конструирования: направляющие и несущие системы. – М.: Машиностроение, 1972.
23. **Кулагин, В. В.** Основы конструирования оптических приборов: учеб. пособие / В. В. Кулагин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982.
24. ГОСТ 2.102 – 68. ЕСКД. Виды и комплектность конструкторских документов.
25. **Постыка, В. М.** Научно-методические проблемы стандартизации и пути их решения / В.М. Постыка. – М.: Изд-во стандартов, 1989.
26. Р 50-54-103 – 88. Рекомендации. Модульные и базовые конструкции изделий. Основные положения.
27. Р 50-605-80 – 93. Рекомендации. СРПП. Термины и определения.

28. ГОСТ 23945.0 – 80. Унификация изделий. Основные положения.
29. ГОСТ 23887 – 79. Сборка. Термины и определения.
30. ГОСТ 20504 – 81. Система унифицированных типовых конструкций агрегатных комплексов ГСП. Типы и основные размеры.
31. Справочник конструктора РЭА: общие принципы конструирования / под ред. Р. Г. Варламова. – М.: Сов. радио, 1980.
32. Конструирование приборов: [пер. с нем.]: В 2-х кн. / под ред. В. Краузе. – М.: Машиностроение, 1987. Кн. 1
33. Диденко, К. И. Унификация и стандартизация типовых конструкций для приборов автоматизации, контроля и управления / К. И. Диденко, Ю. В. Розен, В. Г. Хромов // Стандарты и качество. 1989. № 4.
34. Маталин, А. А. Технология машиностроения: учебник / А. А. Маталин. – Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1985.
35. Базров, Б. М. Основы технологии машиностроения: учебник / Б. М. Базров. – М.: Машиностроение, 2005.
36. Моисеев М. П. Экономика технологичности конструкций / М. П. Моисеев. – М.: Машиностроение, 1973.
37. Базовый принцип конструирования РЭА / Е. М. Парфенов [и др.]; под ред. Е. М. Парфенова. – М.: Радио и связь, 1981.

*Дата поступления
в редакцию 08.07.2014*

N. M. Bobkov

DESIGN ENGINEERING OF RADIOELECTRONIC SYSTEMS TERMINOLOGY SYSTEMATIZATION

Institute of electronic measurements “Kvarz” n.a. A. P. Gorshkov

Purpose: To draw attention of the textbooks on engineering systems construction authors (scientists, professors) and to invite them to the work on design engineering terminology improving.

Methodology: Current terminology analysis for logic compliance, polysemy and synonymy elimination.

Results: development of a terminology system, consisting of basic design engineering definitions. The system can serve as the basis for the science of radio-electronic devices engineering terminology development.

Significance: Educational materials quality improvement due to the developed terminology application.

Key words: Development of technical systems, Design, Construction, Terminology of construction, Principles of designing, Principles of locating.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМЫ

УДК 551.46

О.И. Диденкулов¹, И.И. Диденкулова^{1,2}, Е.Н. Пелиновский^{1,3}

ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК НАКАТА ОДИНОЧНЫХ ВОЛН В БУХТЕ ПАРАБОЛИЧЕСКОГО СЕЧЕНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Институт кибернетики, Таллинский технологический университет, Таллин, Эстония²,
Институт прикладной физики РАН, Н. Новгород³

Исследован накат колоколообразных импульсов различной формы в линейно-наклоненной бухте параболического сечения. Рассчитаны следующие параметры: максимальная высота наката волн на берег, максимальная скорость движения уреза, а также параметр обрушения волн. Показано, что данные параметры наката для различных импульсов с одинаковой высотой и длиной с приемлемой точностью совпадают. Это позволяет определять экстремальные характеристики наката волн без учета формы подходящей к берегу волны, зная лишь ее амплитуду и характерную длину.

Ключевые слова: нелинейная теория мелкой воды, накат волн на берег, бухты параболического сечения.

Введение

Анализ процесса наката морских волн на берег представляет собой одну из наиболее важных практических проблем океанологии. Расчеты наката морских волн на берег необходимы для оценки зоны затопления побережья и воздействия на портовые и береговые сооружения. Особенно разрушительными оказываются длинные волны, проникающие далеко на побережье, такие как цунами и штормовые нагоны.

В теоретическом плане хорошо изучен накат длинных необрушенных волн на плоский откос. Еще в 1958 г. Кэрриер и Гринспан [1] получили аналитическое решение нелинейных уравнений мелкой воды для случая откоса постоянного уклона, что позволило исследовать накат на берег длинных необрушенных волн различной формы. В то же время форма волны, подходящей к берегу, как правило, неизвестна. Иногда о ней можно судить по регистрациям в открытом океане с помощью буев системы ДАРТ или по заранее рассчитанным сценариям цунами, но эта информация не является полной. Поэтому крайне важно иметь экспресс-оценки, способные по первичным данным о приближающейся волне цунами, таким как ее высота и период, дать достоверную оценку дальности затопления и скорости водного потока.

Следуя этой идее, в работах [2, 3] было исследовано влияние формы падающей на плоский откос волны на характеристики наката на берегу (максимальную высоту, скорость и параметр обрушения). В частности, показано, что разница в форме для всех симметричных импульсов колокообразной формы (синусоидальный импульс, солитон, Лоренцев импульс и др.) несущественна для характеристик наката и может быть параметризована.

Однако оценки, сделанные для плоского откоса, не всегда являются оптимальными. Так, во время цунами 2009 г. на Самоа и Японского цунами 2011 г. цунами распространялось в бухтах U-образной формы, и наблюдаемая высота наката волн в этих бухтах существенно

превысила оценки, сделанные по формулам для плоского откоса [4]. В то же время в работе [5] показано, что оценки, сделанные с учетом поперечного сечения бухты Паго-Паго, находятся в хорошем совпадении с наблюдениями цунами 2009 г. на Самоа. Отсюда следует необходимость отдельного рассмотрения цунами в таких бухтах и разработке для них соответствующих экспресс-оценок, что и сделано в данной работе для случая линейно наклоненной бухты параболического сечения.

Динамика длинных волн в бухте параболического сечения

Рассмотрим линейно наклоненную бухту параболического сечения (рис. 1).

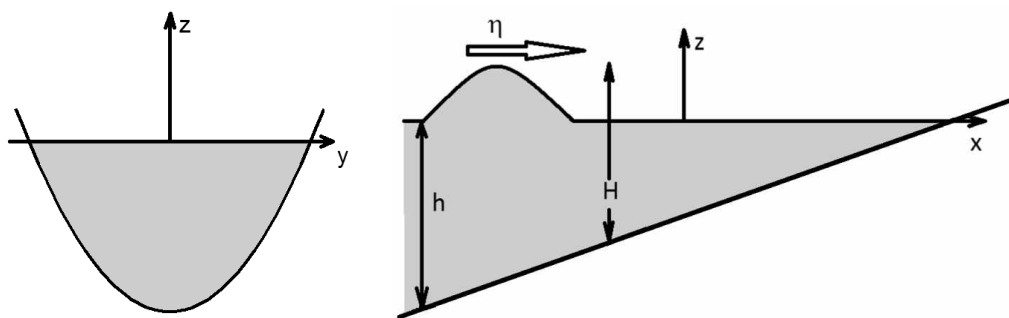


Рис. 1. Поперечное сечение и продольная проекция бухты

Геометрия задачи, показанная на рис. 1, описывается следующей формулой:

$$z(x, y) = -h(x) + \frac{y^2}{y_0} = -\alpha x + \frac{y^2}{y_0}, \quad (1)$$

где $h(x)$ – это невозмущенная глубина вдоль центральной оси канала; α – угол склона вдоль основной оси канала; g – гравитационная постоянная. Ось x направлена от берега, а y_0 – эффективная ширина канала.

Отметим, что выбор формы бухты неслучаен. Такая форма бухт достаточно часто встречается в природе как для фьордов, так и для подводных каньонов.

Уравнения теории мелкой для условий бухты параболического сечения в приближении узости бухты имеют вид [6]

$$\frac{\partial H}{\partial t} + u \frac{\partial H}{\partial x} + \frac{2H}{3} \frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + g \frac{\partial H}{\partial x} = g\alpha, \quad (2)$$

где $H(x,t) = \eta(x,t) + h(x)$ – полная глубина бассейна вдоль центральной оси канала; $\eta(x,t)$ – смещение водной поверхности; $u(x,t)$ – усредненная по поперечному сечению скорость водного потока.

Уравнения (2) отличаются от классических одномерных уравнений мелкой воды [7, 8] только наличием дополнительного коэффициента $2/3$ в первой уравнении, обусловленного параболической формой поперечного сечения канала.

Система нелинейных гиперболических уравнений (2) с помощью римановых инвариантов, имеющих следующую форму для волн в параболическом канале:

$$I_{\pm} = u \pm \sqrt{6gH} - g\alpha, \quad (3)$$

и преобразования годографа может быть сведена к линейному волновому уравнению

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial \lambda^2} - \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \sigma^2} - \frac{2}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = 0, \quad (4)$$

где все искомые переменные могут быть выражены через функцию Φ :

$$u = \frac{1}{\sigma} \frac{\partial \Phi}{\partial \sigma}, \quad \eta = -\frac{1}{g} \left(\frac{u^2}{2} - \frac{1}{3} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right), \quad (5)$$

$$x = \frac{1}{g\alpha} \left(\frac{u^2}{2} + \frac{\sigma^2}{6} - \frac{1}{3} \frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} \right), \quad t = \frac{u - \lambda}{g\alpha}. \quad (6)$$

Вывод уравнений (5), (6) подробно изложен в [6]. Из (5), (6) также становится понятен смысл величины σ , которая всегда положительна и напрямую связана с полной глубиной вдоль центральной оси канала $\sigma = \sqrt{6gH}$. Таким образом, уравнение (4) должно решаться на полуоси $\sigma \geq 0$.

Напомним, что уравнения (4)–(6) описывают динамику волн в канале для величин, усредненных по поперечному сечению канала. В то же время пространственное распределение водной поверхности можно найти из (1):

$$y(x, t) = \pm \sqrt{y_0 H(x, t)}. \quad (7)$$

Естественные граничные условия для описания наката волн на берег - это ограниченность скорости и смещения водной поверхности на бесконечности и на берегу. Начальные условия для функции Φ зависят от начальных условий для скорости и смещения. Если скорость в начальный момент времени равна нулю $u(x, t=0) = 0$, то в начальный момент времени $t = 0$ соответствует $\lambda = 0$ и начальные условия для функции Φ

$$\Phi|_{\lambda=0} = 0, \quad (8)$$

$$\partial \Phi / \partial \lambda|_{\lambda=0} = -3g\eta[x(\sigma, 0)] = \sigma^2 / 2 - 3g\alpha x(\sigma)|_{\lambda=0}, \quad (9)$$

где $x(\sigma)|_{\lambda=0}$ - это начальное состояние водной поверхности, которую можно найти, зная полную глубину в начальный момент времени $H(x, 0)$ и пользуясь $\sigma = \sqrt{6gH}$.

Решение волнового уравнения для соответствующих начальных и граничных условий может быть представлено в следующем виде:

$$\Phi(\sigma, \lambda) = \frac{[\Theta(\lambda + \sigma) - \Theta(\lambda - \sigma)]1(\lambda - \sigma) + [\Theta(\lambda + \sigma) - \Theta(\sigma - \lambda)]1(\sigma - \lambda)}{\sigma}, \quad (10)$$

где $1(\dots)$ - это функция Хевисайда, а

$$\Theta(\zeta) = \frac{\zeta^4}{16} - \frac{3}{2} g\alpha \int_0^{\zeta} \sigma x(\sigma)|_{\lambda=0} d\sigma. \quad (11)$$

Формулы (10), (11) позволяют описать нелинейную динамику подвижного уреза в явном виде. Главное отличие от случая плоского откоса, описанного в работах [1, 2, 7–9], состоит в том, что при распространении волн вдоль наклоненного канала параболического сечения они не испытывают распределенного отражения от донного профиля, т.е. все отражение происходит только непосредственно от берега (уреза).

Таким образом, все изменения, включая трансформацию формы волны и ее свойств, происходят в непосредственной близости уреза. Это свойство типично для всех безотражательных геометрий, подробно рассмотренных в работах [9–11], и приводит к значительному усилению волн на берегу.

Накат волн в бухте параболического сечения

Накат волн в бухте параболического сечения в линейной постановке задачи описывается простой формулой, зависящей от производной по времени от падающей на откос волны η_{in} [6]:

$$R = 4 \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{L}{\sqrt{gh_0}} \frac{d\eta_{in}}{dt}, \quad (12)$$

где L – расстояние, которое проходит волна до берега; h_0 – глубина бассейна на расстоянии L до берега.

Горизонтальная скорость воды на урзе $U(t)$ может быть найдена по формуле

$$U(t) = \frac{1}{\alpha} \cdot \frac{dR}{dt}, \quad \text{где} \quad \alpha = \frac{h_0}{L}. \quad (13)$$

Отметим, что хотя формулы (12), (13) описывают высоту волн на берегу в линейной задаче, они являются базовыми для расчета характеристик наката в нелинейной задаче [6]. Важно подчеркнуть, что, как показано в данной работе, максимумы высот и скоростей наката волн в линейном и нелинейном приближении совпадают. Поскольку здесь мы будем интересоваться исключительно максимальными значениями характеристик наката, то будет достаточно найти максимумы функций (12), (13).

Одним из важнейших параметров, характеризующих накат длинных волн на берег, является параметр обрушения Br , который < 1 для необрушенных волн и ≥ 1 для обрушенных и выражается через производную по времени от скорости волны на урзе в линейном приближении:

$$Br = \frac{1}{g\alpha} \max \left[\frac{dU}{dt} \right]. \quad (14)$$

Параметризация формул для характеристик наката

В качестве падающих на берег волн было рассмотрено несколько семейств колоколообразных импульсов солитоноподобной

$$\eta_{in}(t) = A \operatorname{sech}^n(t/T), \quad n = 1, 2, \dots, 20, \quad (15)$$

синусоидальной

$$\eta_{in}(t) = A \cos^n\left(\frac{\pi t}{T}\right), \quad n = 3, 4, \dots, 20, \quad (16)$$

а также лоренцевой формы

$$\eta_{in}(t) = \frac{A}{(1 + (t/T)^2)^n}, \quad n = 1, 2, \dots, 20. \quad (17)$$

Для анализа возможности параметризация характеристик наката этих импульсов были введены численные коэффициенты μ_R , $\mu_{U\pm}$ и μ_{Br} , зависящие от формы волны, и формулы (12) - (14) для экстремальных характеристик наката волн были соответственно преобразованы в

$$R_{\max} = \mu_R R_0, \quad R_0 = 4\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{AL}{\sqrt{gh_0 T_{eff}}}, \quad (18)$$

$$U_{\max} = \mu_{U+} U_0, \quad U_{\min} = \mu_{U-} U_0, \quad U_0 = 4\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{AL}{\alpha \sqrt{gh_0 T_{eff}^2}}, \quad (19)$$

$$Br = \mu_{Br} Br_0, \quad Br_0 = 4\sqrt{\frac{3}{2}} \frac{AL}{g\alpha^2 \sqrt{gh_0 T_{eff}^3}}, \quad (20)$$

где T_{eff} – это эффективная длительность импульса, определяемая по уровню 2/3 от максимальной высоты падающего импульса, что соответствует философии "значительной волны" в океанографии; R_{\max} - максимальная высота наката; U_{\max} , U_{\min} – максимальные скорости наката и отката соответственно. Отметим, что максимальная глубина отката в рассматриваемой U-образной бухте совпадает по модулю с R_{\max} , поэтому отдельно ее не обсуждаем.

Таким образом, все влияние формы подходящих к берегу волн оказалось сосредоточено в параметрах μ_R , $\mu_{U\pm}$ и μ_{Br} . Расчет этих параметров для соответствующих семейств колоколообразных импульсов (15)–(17) приведен на последующих рис. 2 – рис. 4.

Из рис. 2 видно, что параметр μ_R для максимальной высоты наката волн на берег с увеличением n стремится к общему для всех типов импульсов значению ≈ 1.1 , и максимальный разброс не превышает 15%. При этом максимальные отличия наблюдаются

при малых n , когда различие в форме максимально. Это хорошо проиллюстрировано на рис. 5, где показано, как различаются по форме импульсы при $n = 3$ и 20.

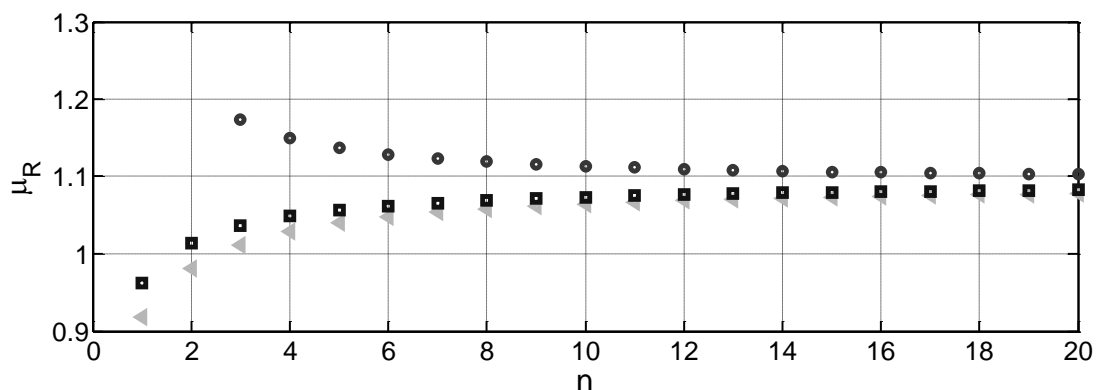


Рис. 2. Параметр формы для максимальной высоты наката:

кружками показаны значения для импульсов синусоидальной формы; серыми треугольниками - для импульсов лоренцеобразной формы; квадратами - для импульсов солитоноподобной формы

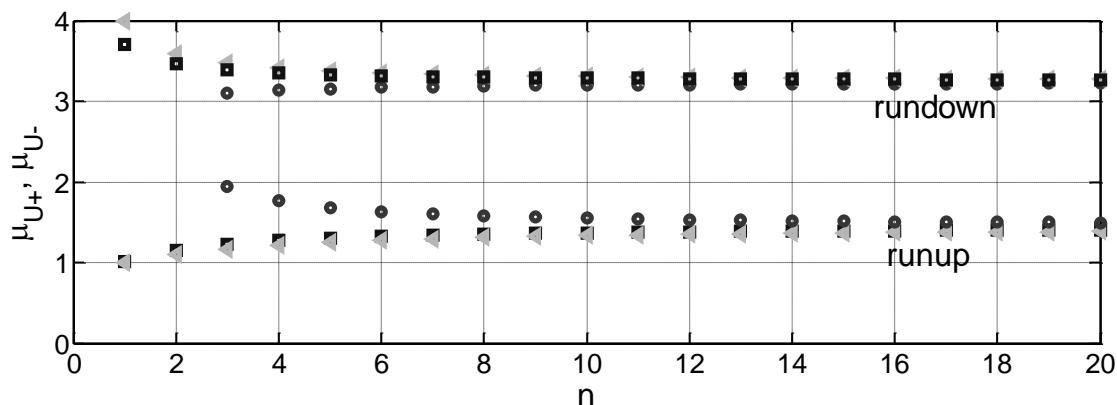


Рис. 3. Параметр формы для максимальных скоростей наката и отката:

кружками показаны значения для импульсов синусоидальной формы; серыми треугольниками - для импульсов лоренцеобразной формы; квадратами - для импульсов солитоноподобной формы

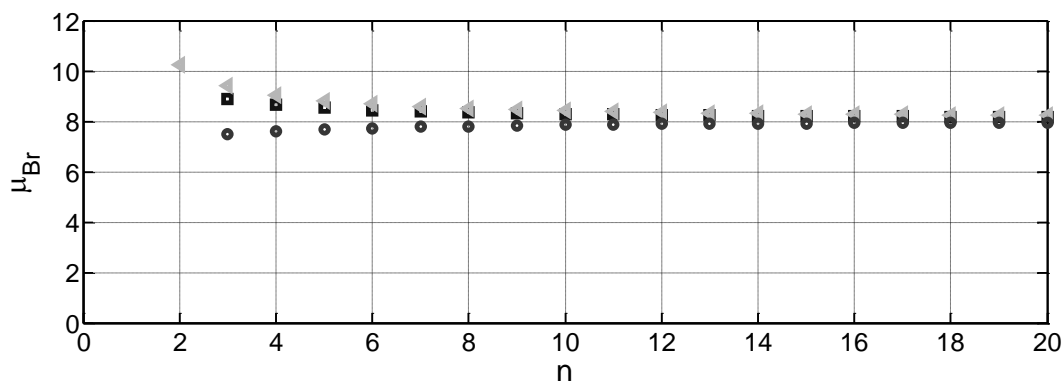


Рис. 4. Параметр формы для параметра обрушения Br :

кружками показаны значения для импульсов синусоидальной формы; серыми треугольниками - для импульсов лоренцеобразной формы; квадратами - для импульсов солитоноподобной формы

Параметры $\mu_{U\pm}$ для максимальных скоростей наката и отката волн также стремятся к одним и тем же значениям для всех типов импульсов, которые равны ≈ 1.4 и ≈ 3.2 соответственно (рис. 3). При этом скорость отката более чем в два раза превышает скорость наката, при этом яв-

ляясь более устойчивой характеристикой. Так, разброс значений параметра μ_{U-} для скорости отката не превышает 12%, в то время как соответствующий разброс для скорости наката – 56%, что свидетельствует о том, что даже небольшие отличия в форме подходящей к берегу волны могут сильно повлиять на величину скорости наката воды на берег.

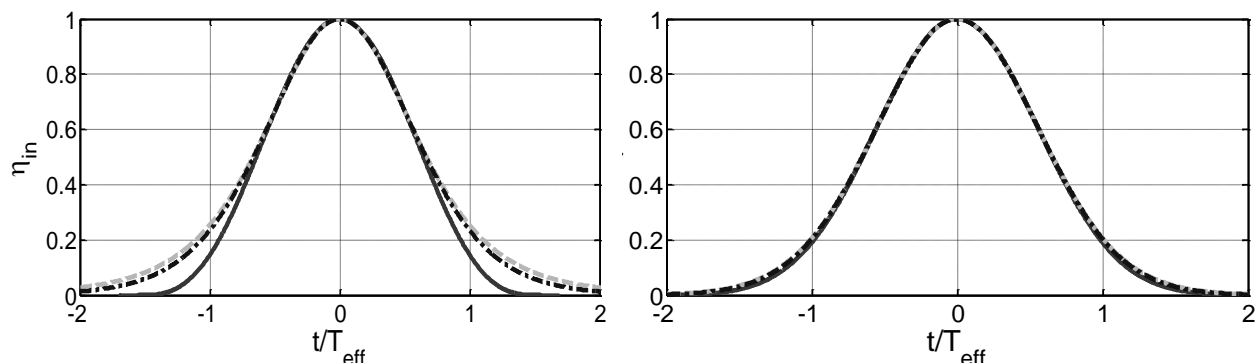


Рис. 5. Форма подходящих к берегу импульсов для значения $n = 3$ (слева) и $n = 20$ (справа): сплошной линией показаны импульсы синусоидальной формы; серой штриховой - импульсы лоренцеобразной формы; штрих-пунктирной - импульсы солитоноподобной формы

И, наконец, μ_{Br} для параметра обрушения, как и ожидалось, также выходит на постоянное значение ≈ 8.1 с максимальным разбросом 24% (рис. 4). Как известно, первое обрушение волн на берегу всегда происходит на стадии отката волн [8], поэтому логично, что параметр обрушения ведет себя схоже с параметром μ_{U-} для максимальной скорости отката волн.

Заключение

Таким образом, в работе исследован накат колоколообразных импульсов различной формы в линейно-наклоненной бухте параболического сечения. Показано, что характеристики наката волн на берег (максимальная высота наката, максимальная скорость наката и отката волн, а также параметр обрушения волн) для различных импульсов с приемлемой точностью совпадают. Особенно это проявляется для высоты наката и скорости отката, где изменения не превышают 15% и 12% соответственно. Таким образом, определение длительности волны по уровню 2/3 от амплитуды волны (аналог значительной волны в океанологии) является оптимальным, и в этом случае универсальные формулы для характеристик наката длинных волн в U-образных бухтах могут быть записаны в форме (18) - (20) со следующими значениями численных коэффициентов:

$$\begin{aligned}
 R_{\max} &= 5.4 \frac{AL}{\sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}, & U_{\max} &= 6.8 \frac{AL}{\alpha \sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}^2}}, \\
 U_{\min} &= 15.7 \frac{AL}{\alpha \sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}^2}}, & Br &= 39.7 \frac{AL}{g \alpha^2 \sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}^3}}.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

Для сравнения воспроизведем ниже соответствующие параметризованные формулы для плоского откоса [3]:

$$\begin{aligned}
 R_{\max} &= 3.5A \sqrt{\frac{L}{\sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}}, & R_{\min} &= 1.5A \sqrt{\frac{L}{\sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}}, & Br &= 13 \frac{H_0 L}{\alpha gh_0 T_{\text{eff}}^2} \sqrt{\frac{L}{\sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}}, \\
 U_{\max} &= 4.5 \frac{AL}{T_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{1}{\alpha h_0 \sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}}, & U_{\min} &= 7 \frac{AL}{T_{\text{eff}}} \sqrt{\frac{1}{\alpha h_0 \sqrt{gh_0 T_{\text{eff}}}}}.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133. Для ИД и ОД работа также была частично поддержана грантами РФФИ (14-02-00983, 13-05-97037, 14-05-00092), Президента РФ (МК-1146.2014.5) и грантами (SF0140007s11 и ETF8870).

Библиографический список

1. Carrier, G.F., Greenspan, H.P. Water waves of finite amplitude on a sloping beach // J. Fluid Mech. 1958. V. 4. P. 97–109.
2. Диденкулова, И.И. Накат одиночных волн различной формы на берег / И.И. Диденкулова, Куркин, А.А., Е.Н. Пелиновский // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 419–425.
3. Диденкулова, И.И. Накат длинных волн на берег: влияние формы подходящей волны / И.И. Диденкулова, Е.Н. Пелиновский // Океанология. 2008. Т. 48. № 1. С. 5–10.
4. Okal, E.A., Fritz, H.M., Synolakis, C.E., Borrero, J.C., Weiss, R., Lynett, P.J., Titov, V.V., Foteinis, S., Jaffe, B.E., Liu, P.L.-F., Chan, I.-Ch. Field survey of the Samoa tsunami of 29 September 2009 // Seismolog. Res. Lett. 2010. V. 81. Iss. 4. P. 577–591.
5. Didenkulova, I. Tsunami runup in narrow bays: the case of Samoa 2009 tsunami // Nat. Hazards. 2013. V. 65. Iss. 3. P. 1629–1636.
6. Didenkulova, I., Pelinovsky, E. Nonlinear wave evolution and runup in an inclined channel of a parabolic cross-section // Phys. Fluids. 2011. V. 23. Iss. 8. Article №: 086602.
7. Диденкулова, И.И. Накат нелинейно деформированных волн на берег / И.И. Диденкулова, Н. Заибо, А.А. Куркин, Б.В. Левин, Е.Н. Пелиновский, Т. Соомере // Доклады Академии Наук. 2006. Т. 410. № 5. С. 676–678.
8. Пелиновский, Е.Н. Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Нижний Новгород: ИПФ РАН, 1996. – 276 с.
9. Диденкулова, И.И. Отражение длинных волн от «безотражательного» донного профиля / И.И. Диденкулова, Н. Заибо, Е.Н. Пелиновский // Известия РАН. Механика жидкости и газа. 2008. № 4. С. 102–108.
10. Didenkulova, I., Pelinovsky, E., Soomere, T. Long surface wave dynamics along a convex bottom // J. Geophys. Res. – Oceans. 2009. V. 114. Article №: C07006.
11. Didenkulova, I., Pelinovsky, E. Runup of tsunami waves in U-shaped bays // Pure Appl. Geophys. 2011. V. 168. Iss. 6–7. P. 1239–1249.

Дата поступления
в редакцию 06.07.2014

O.I. Didenkulov¹, I.I. Didenkulova^{1,2}, E.N. Pelinovsky^{1,3}

PARAMETERIZATION OF RUN-UP CHARACTERISTICS OF SOLITARY WAVES IN THE BAY OF PARABOLIC CROSS-SECTION

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
Institute of Cybernetics at Tallinn University of Technology, Tallinn, Estonia²,
Institute of Applied Physics of the Russian Academy of Sciences, N. Novgorod³

Purpose: In this paper we study the run-up of bell-shaped pulses described by different mathematical functions in an inclined bay of parabolic cross-section.

Method: In this study we use classical methods of mathematical physics, such as Riemann invariants and hodograph transformation and apply them to the hyperbolic system of the nonlinear shallow water equations.

Results: It is shown characteristic parameters of wave run-up for different pulses normalized by their height and wave length (duration), have close values and can be parameterized. The details of the form of the individual symmetric bell-shape pulse does not influence much run-up characteristics and can be neglected.

Application domain: The results of this work can be used for express estimates of tsunami run-up height.

Key words: nonlinear shallow water theory, wave run-up on a beach, bays of parabolic cross-section.

УДК 519.63, 536.46

Н.А. Лощилова, А.А. Куркин

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕТОДОВ МЕХАНИКИ РЕАГИРУЮЩИХ СРЕД
ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ТУШЕНИЯ ЛЕСНЫХ ПОЖАРОВ
СТАЦИОНАРНЫМ И ДВИЖУЩИМСЯ ИСТОЧНИКОМ ПОДАЧИ ВОДЫ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе излагаются результаты численного моделирования и оптимизации процесса тушения лесного пожара стационарным и движущимся источником подачи воды. Проведен анализ различных сценариев тушения в предположении, что капли воды, попадающие в зону обстрела, полностью испаряются. Анализ результатов показал, что местоположение точки прицела при заданной критической температуре оказывает существенное влияние на необходимое для тушения значение интенсивности воды от стационарного и движущегося источников подачи воды. Для стационарного источника оптимальной точкой обстрела является ближайшая точка, температура которой выше критической. Чем больший объем воды подается водяной пушкой, тем выше критическая скорость её движения. Вода поступает сверху и расходует на охлаждение конвективной колонки, поэтому при уменьшении интенсивности подачи только малая часть воды поступает в очаг пожара, что приводит к увеличению необходимого количества воды.

Ключевые слова: математическое моделирование, вода, лес, пожар, сплошная реагирующая среда, тушение.

Введение

Природные катастрофы являются одной из ключевых проблем, их последствия негативно сказываются на всех сферах жизни общества. Природные пожары зачастую становятся настоящим бедствием, принося немалый ущерб. Анализ динамики крупных лесных пожаров за последние годы как в России, так и за рубежом показал недостатки существующих способов борьбы с ними. Каждый год на подавление огня тратится огромное количество ресурсов, вследствие чего возникает вопрос об их минимизации. Успешная борьба с крупными лесными пожарами требует продуманной стратегии, основанной на анализе как распространения пожара с учётом возможных сценариев его развития, так и его взаимодействия со свободной водой, подаваемой в очаг. Как известно, при использовании воды для тушения пожара основными факторами является поглощение тепловой энергии на испарение и уменьшения доступа кислорода в зону горения за счёт образующегося водяного пара. Эффективность влияния воды на динамику лесного пожара в таком случае существенно зависит от режима и зоны подачи воды. Теоретическое исследование процесса тушения лесного пожара является одной из актуальнейших проблем современности и позволяет определить оптимальные параметры его тушения, определять наиболее уязвимые зоны пожара, что в свою очередь позволяет совершенствовать средства и способы борьбы с ними.

В современной научной литературе существует огромное количество моделей разного уровня, позволяющих описывать динамику самого лесного пожара и модели, позволяющие реконструировать струю воды.

Все современные исследования в этой области имеет смысл разделить на следующие группы: работы, посвящённые моделированию динамики пожара [1–3], работы, посвящённые динамике струи воды и капли под воздействием различных внешних факторов [4, 5] и работы, посвящённые моделированию частиц воды, водяных завес, сплинкерных систем [6–8], работы, связанные с моделированием тушения пожаров водяными завесами [9] и сбросом воды сверху [10]. Однако ранее не ставился вопрос определения эффективного количества воды при заданной точке прицела и выборе сценария тушения, необходимого для подавления пламени. Важно отметить, что для тушения лесного пожара необходимо знать его динамику [11], учитывать различные режимы и способы подачи воды [12, 15].

Постановка задачи

Для удобства моделирования лес считаем ажурным и представим его многофазной однородной пористой реагирующей средой с постоянной температурой и высотой [13]. Лес, температуру очага принимаем постоянной в течение заданного времени, давление считаем равным атмосферному, форма очага в виде прямоугольника. Учет влияния воды на динамику пожара осуществляется за счет учета изменения энергии в области подачи воды и учета процесса кипения. Пусть свободная вода, подаваемая в зону горения, может как расходоваться за счет кипения, так и пополняться, например, в результате подачи в заданную область.

$$\rho_4 \frac{\partial \varphi_4}{\partial t} = -R_4 + f(x, z, t), \quad R_4 = \begin{cases} \frac{1}{q_4} \frac{\partial T}{\partial t} \left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right), T = T_b \text{ и } \varphi_4(x, z, t) \neq 0, \\ f(x, z, t) \cdot T > T_b, \\ 0, T < T_b \text{ и } \varphi_4(x, z, t) = 0. \end{cases} \quad (1)$$

где R_4 – массовая скорость процесса кипения свободной воды, кг/(с·м³); ρ_4 – истинная плотность, кг/м³; φ_4 – объемная доля свободной воды; $f(x, z, t)$ – массовая скорость подачи свободной воды, кг/(с·м³); $c_{pi}, \rho_i, \varphi_i$ – удельная теплоемкость, истинная плотность и объемная доля, Дж/(кг·К), кг/м³ ($i = 1$ – сухое органическое вещество, $i = 2$ – связанная вода, $i = 3$ – конденсированные продукты пиролиза, $i = 5$ – газовая фаза); T – температура среды, К; T_b – температура точки кипения воды, К.

В отличие от известных постановок, в которых вещество может только переходить между различными фазами, в данном случае имеет место источник подачи воды. Как следствие, необходимо учесть внутреннюю энергию подаваемой воды, соответствующую температуре окружающей среды.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial \left(\left(\sum_{i=1}^4 \rho_i \varphi_i c_{pi} + \rho_5 c_{p5} \right) T \right)}{\partial t} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} U T)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho_5 c_{p5} W T)}{\partial z} = \\ & = \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_t \frac{\partial T}{\partial z} \right) + q_1 R_1 - q_2 R_2 + q_3 R_3 - q_4 R_4 + q_5 R_5 + \\ & + k_s (c U_R - 4 \sigma T^4) + f(x, z, t) T_e c_{p4}, \end{aligned} \quad (2)$$

где c_{p4} – удельная теплоемкость свободной воды, Дж/(кг·К); R_1, R_2, R_3, R_5 – массовые скорости реакции пиролиза сухого органического вещества, испарения влаги, горения конденсированных и летучих продуктов пиролиза соответственно, кг/(с·м³); q_2, q_3, q_5 – тепловые эффекты реакций испарения, горения кокса и окисления летучих продуктов пиролиза, Дж/кг; σ – постоянная Стефана-Больцмана, кг·с⁻³·К⁻⁴; U_R – плотность потока излучения, Дж/м⁴; k_Σ – коэффициент ослабления, с⁻²; k_s – спектральный коэффициент поглощения; c – скорость света, м/с; μ_t, λ_t, D_t – коэффициенты динамической вязкости, турбулентной теплопроводности и турбулентной диффузии соответственно, Па·с, Вт/(м·К), м²/с; U, W – горизонтальная и вертикальная составляющие скорости газовой фазы, м/с.

Численное моделирование тушения лесного пожара стационарным источником подачи и его анализ

Рассмотрим случай равномерного распределения воды по всему фронту пожара вдоль координаты y . Такая ситуация возможна при наличии необходимого количества техники и ограниченной протяженности сформировавшегося фронта пожара. Тушение лесного пожара будем моделировать разными вариантами выбора точки обстрела из водяной пушки. Капли

воды, долетая до цели, полностью испаряются. Вода подается по нормальному закону, обеспечивая подачу заданного количества воды:

$$f(x, z, t) = \frac{w_{int}}{4\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(x-x_0(t))^2 + (z-z_0(t))^2}{4\sigma^2}\right), \quad (3)$$

где $x_0(t)$, $z_0(t)$ – координаты точки прицела водяной пушки; w_{int} – массовый расход воды на метр фронта, кг/(м·с); σ , м – среднеквадратическое отклонение, определяет дальность разлёта от точки прицела водных частиц.

Основным достоинством двумерной постановки, описанной ранее, является возможность анализа различных алгоритмов подачи воды в область пожара и выбора критического значения температуры T_{cr} и высоты её подачи. Если интенсивности подачи воды недостаточно для тушения пожара, он продолжает распространяться более медленно, чем в случае отсутствия каких-либо мер по его предотвращению.

Табл. 1 демонстрирует результаты проведенных численных экспериментов по моделированию пожара при заданной критической температуре.

Таблица 1

Зависимость интенсивности подачи воды от выбора точки прицела

Точка об-стрела	Дисперсия распределения Гаусса, м	Минимальная высота (начальная ячейка)	Критическая интенсивность подачи воды, кг/(м·с)	Время тушения, с	Общий объем воды, кг/м
Ближняя	0.5	1	0.712	7.2	5.1264
Ближняя	0.5	5	0.982	8	7.856
Ближняя	1	1	0.978	7.2	7.0416
Ближняя	1	5	1.287	7.8	10.038
Дальняя	0.5	1	1.133	12	13.596
Дальняя	0.5	5	0.718	7.6	5.4568
Дальняя	1	1	0.771	7.2	5.5512
Дальняя	1	5	1.091	10	10.91

Влияние выбора точки прицела на процесс тушения представлено на рис. 1. В качестве точки прицела выбираются точки с температурой выше критической, и требуется определить минимальную интенсивность воды w_{int} , достаточную для тушения лесного пожара. Результаты численного моделирования представлены на рис. 1, а. Видно, что для случая выбора максимально удаленной точки по оси x от источника, вода должна подаваться с минимально необходимой интенсивностью $w_{int} = 1.133$ кг/(м·с). Разрыв фронта пожара в этом случае имеет место в момент 7.2 с, причем скорость газовой фазы направлена преимущественно в нижней части леса по пути распространения пожара. Далее пожар плавно затухает. С каждым шагом высота фронта пожара плавно переходит в нижнюю часть леса. Пожар полностью сходит на нет в момент времени 18.8 с.

Рассмотрим случай, когда в качестве точки прицела выбирается ближайшая точка, температура которой больше T_{cr} . Для успешного тушения в данном случае минимально необходимое значение интенсивности воды составляет $w_{int} = 0.712$ кг/(м·с). Динамика пожара показана на рис. 1, б. Важно отметить, что в этом случае не имеет места разрыв фронта пожара. При 7.6 с в нижней части леса уже отсутствуют высокие температуры. С определенного момента времени динамика пожара противоположна случаю, где для тушения выбирается максимально удаленная точка. К моменту времени 10 с линия фронта пожара постепенно переходит в верхнюю часть лесополосы, а затем и полностью вверх. Пожар полностью потушен к 14 с.

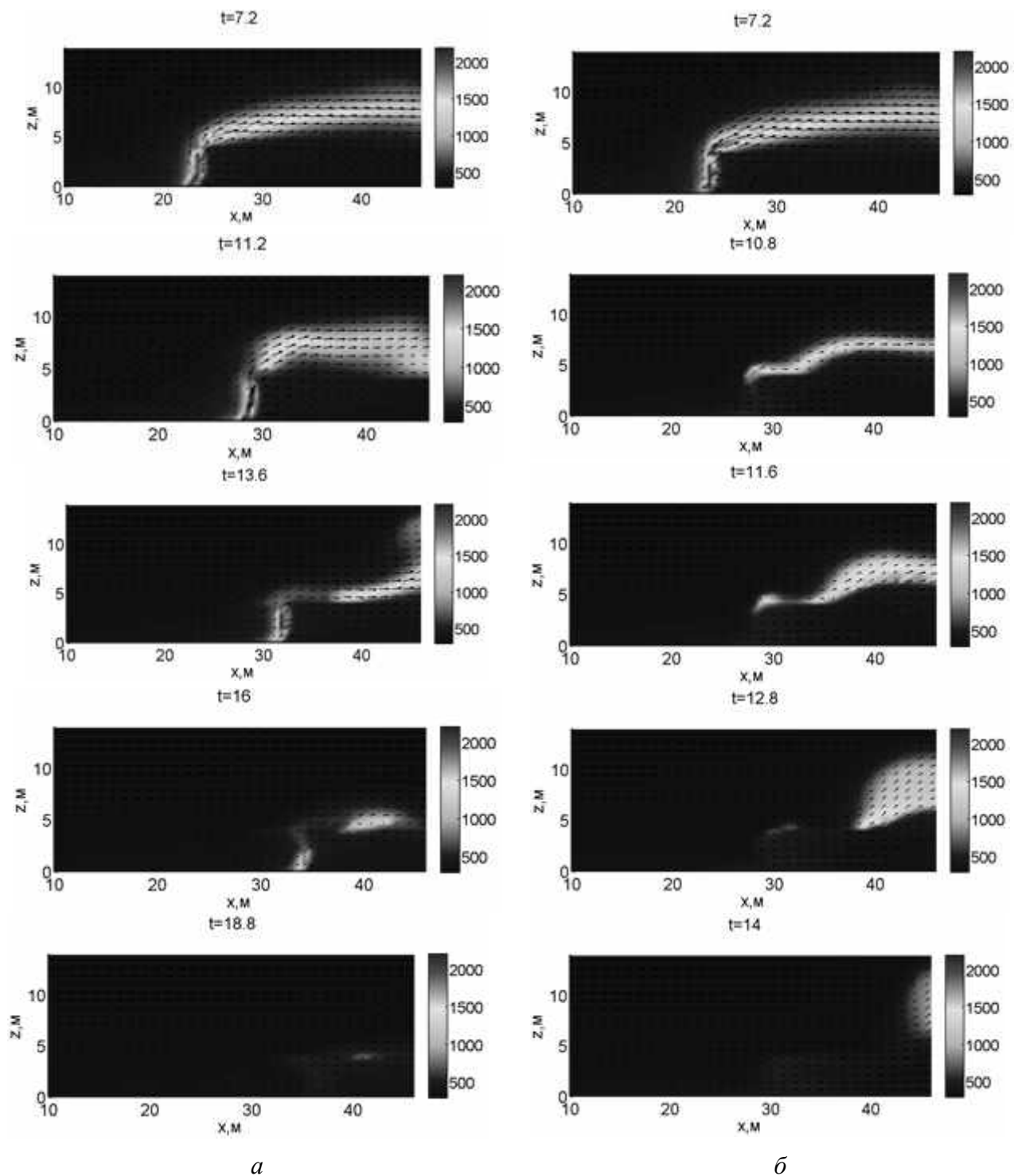


Рис. 1. Динамика распространения пожара при обстреле в выбранную точку относительно стационарно расположенного источника подачи воды:
а – максимально удаленной точки; *б* – ближайшей точки

На рис. 2 показана динамика движения точки прицела подачи воды для случая интенсивности выше и ниже критической. К моменту готовности источника подачи воды пожар находится вне досягаемости струи воды, поэтому на графиках до 0.3 с нет линий. Как видно из рис. 2, *а*, в случае недостаточной интенсивности подачи воды, движение точки прицела носит хаотичный характер, более часто выбираются точки в верхней части полога леса. На рис. 2, *б* на начальном этапе динамика точки прицела аналогична, однако можно

наблюдать достаточно долгий промежуток времени подачи воды в нижнюю часть фронта пожара (2 – 2.8 с).

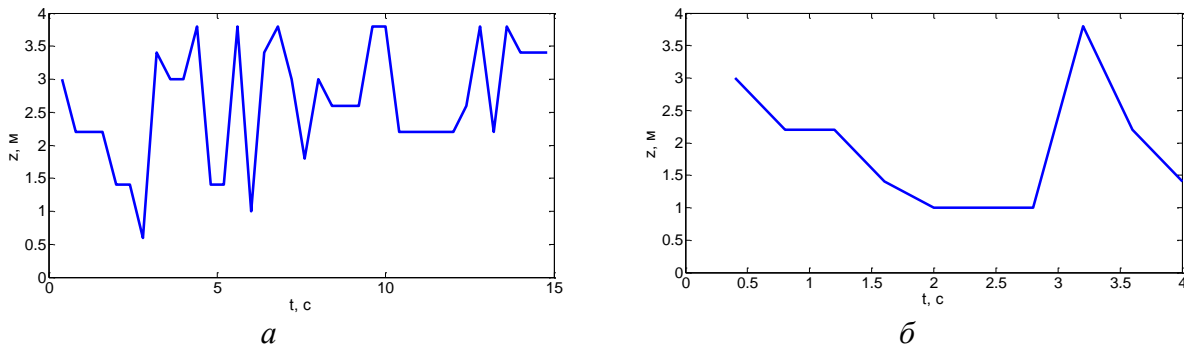


Рис. 2. Динамика движения точки прицела подачи воды при $T_{cr} = 800$ К:
 $a - w_{int} = 1.72$ кг/(м·с); $b - w_{int} = 1.73$ кг/(м·с)

Результаты численного моделирования процесса тушения лесного пожара при выборе ближайшей точки к источнику показали, что для успешного подавления процесса распространения волны горения при $T_{cr} = 450$ К, необходимо $w_{int} = 2.38$ кг/(м·с), а наиболее эффективным становится тушение пожара при выборе значения изотермы $T_{cr} = 800$ К и при этом требуется существенно меньше воды $w_{int} = 1.73$ кг/(м·с). На рис. 3 приведены результаты численных экспериментов по моделированию тушения пожара при помощи заданного потока воды в двумерной постановке при выборе ближайшей точки к источнику подачи воды.

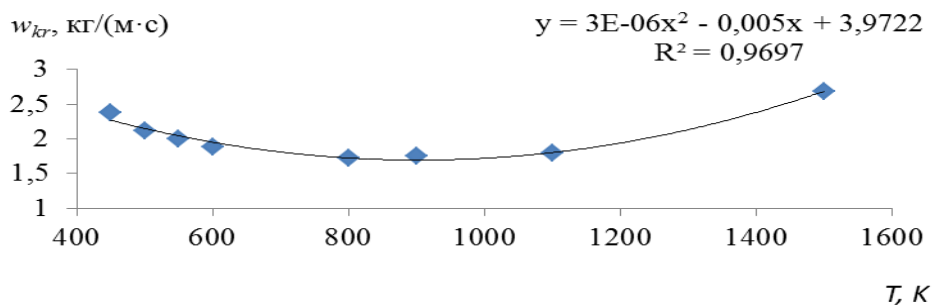


Рис. 3. Зависимость эффективности подачи воды в зависимости от значения критической температуры

Из рис. 3 видно, что для данного типа растительности зависимость расхода воды от значения критической температуры имеет форму параболы и именно точка минимума, соответствующая $T_{cr} = 833$ К для этой зависимости, определяет оптимальные условия тушения пожара.

В случае, если подача воды производится в область более низких температур, требуемая интенсивность увеличивается в связи с тем, что вода тратится на охлаждение растительности, находящейся впереди кромки пожара. В отсутствии подачи воды в эту область часть этой энергии рассеялась бы за счёт внешнего поля скоростей. Использование в качестве точки прицела области низких температур не приводит к катастрофическому росту требуемой интенсивности подачи воды. Выбор точки обстрела в области с высокими температурами, свойственными ядру очага приводит к уменьшению рассеивания энергии на излучение, интенсивность которого, согласно закону Стефана-Больцмана, пропорциональна четвёртой степени температуры, а это в свою очередь требует увеличения интенсивности подачи воды. Уменьшение интенсивности распространения лучистой энергии приводит не только к уменьшению её потерь, но и к некоторому замедлению распространения пожара, что позволяет остановить его распространение, хотя и с несколько большими затратами воды.

Ограничение подачи воды не ниже заданной высоты приводит к тому, что процесс тушения перемещается в верхний ярус и не затрагивает нижний слой, а это в свою очередь при повальном пожаре приводит к тому, что пожар будет распространяться несмотря на все предпринимаемые усилия. Отсутствие такого ограничения по высоте позволяет потушить пожар при минимальной интенсивности подачи воды. Этот результат отражен на рис. 4.

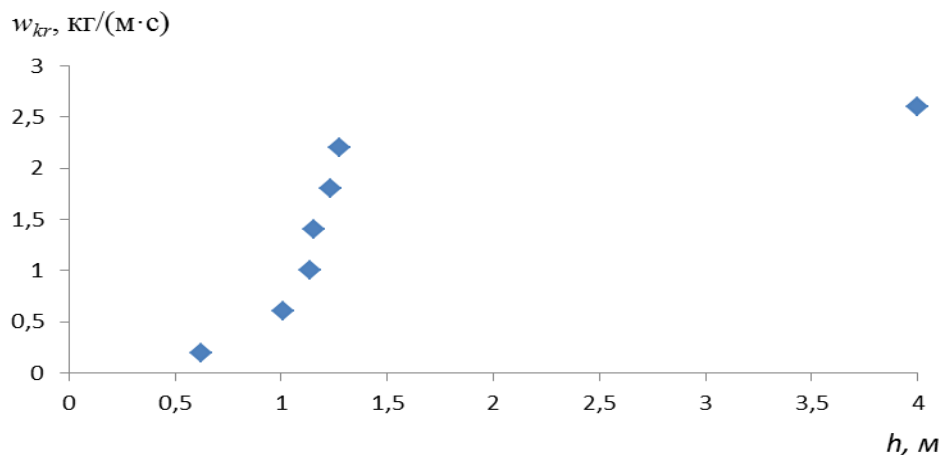


Рис. 4. Зависимость эффективности подачи воды в зависимости от ограничения на минимально возможную высоту подачи воды

На рис. 5 показана динамика движения точки прицела для случаев подачи воды с интенсивностью выше критической на высоту не ниже 0.2 м и 1.8 м. В случае отсутствия существенных ограничений на высоту подачи воды подача воды вначале производится в верхнюю часть слоя леса, так как именно там пламя раньше попадает в область досягаемости источника подачи воды. В течении 1 – 1.6 с производится подача воды в нижний слой, после чего пожар вытесняется вверх. В случае наличия ограничения на высоту подачи воды не менее 1.8 м, на начальном этапе подавляется верхняя часть очага пожара, после чего вода поступает только в случае, если пламя выходит за заданную границу.

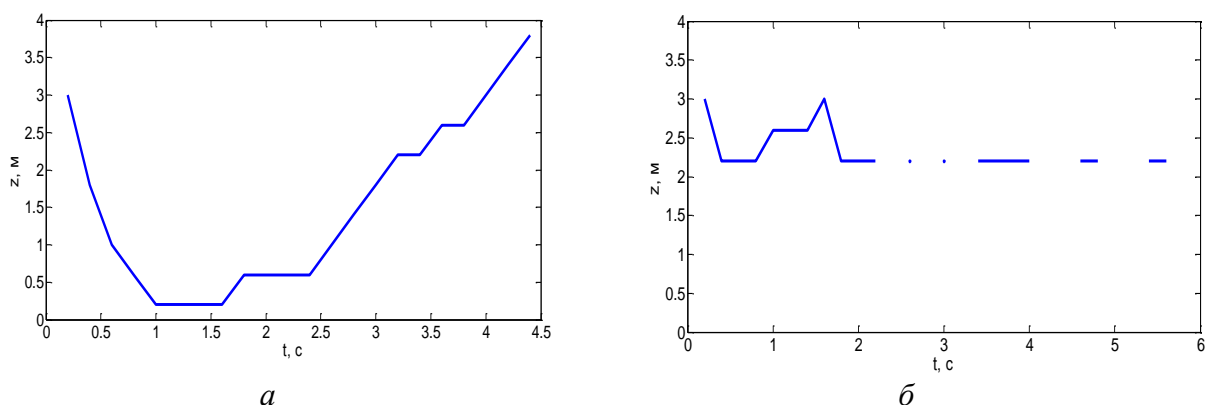


Рис. 5. Динамика движения точки прицела подачи воды при $T_{cr} = 800$ К:
 $a - w_{int} = 0.626$ кг/(м·с), $h_{cr} = 1.8$ м, $b - w_{int} = 1.274$ кг/(м·с), $h_{cr} = 1.8$ м

Также следует отметить, что подача воды в области с наименьшей высотой, где температура достаточно велика, позволяет более эффективно прекращать распространение лесных пожаров. Тем не менее, практическая реализация такого метода подачи воды сопряжена с серьезными трудностями.

Численное моделирование тушения лесного пожара движущимся вдоль фронта пожара источником подачи и его анализ

Ранее были описаны случаи равномерного распределения воды по всему фронту, но данный способ подачи воды технически достаточно трудно реализуем. Рассмотрим ситуацию, когда водяная пушка движется параллельно фронту пожара, причем её составляющая скорости вдоль фронта пожара не может превышать 20 м/с, это связано с техническими сложностями подачи необходимого количества воды. Минимальная скорость составляет 0.5 м/с. Передвижение водяной пушки такой низкой скоростью нецелесообразно, так как многократно возрастает расход воды на тушение фронта заданной длины. Чем выше скорость пушки, тем меньше воды требуется на тушение одной единицы фронта. Необходимо найти максимальную скорость, при которой пожар будет потушен. Вода, попадающая в плоскость моделирования, учитывается с помощью двумерного изотропного распределения Гаусса. Для моделирования взаимодействия падающей сверху воды используется алгоритм, описанный в работе [14].

Во всех расчётах, представленных в данном параграфе, в качестве времени пресечения точки прицела водяной пушки с плоскостью моделирования пожара принималось $t_1 = 4\sigma/U_n$, где $\sigma = 2$ м, а U_n – постоянная величина в рамках каждого отдельного расчёта.

Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с показана на рис. 6 и рис. 7.

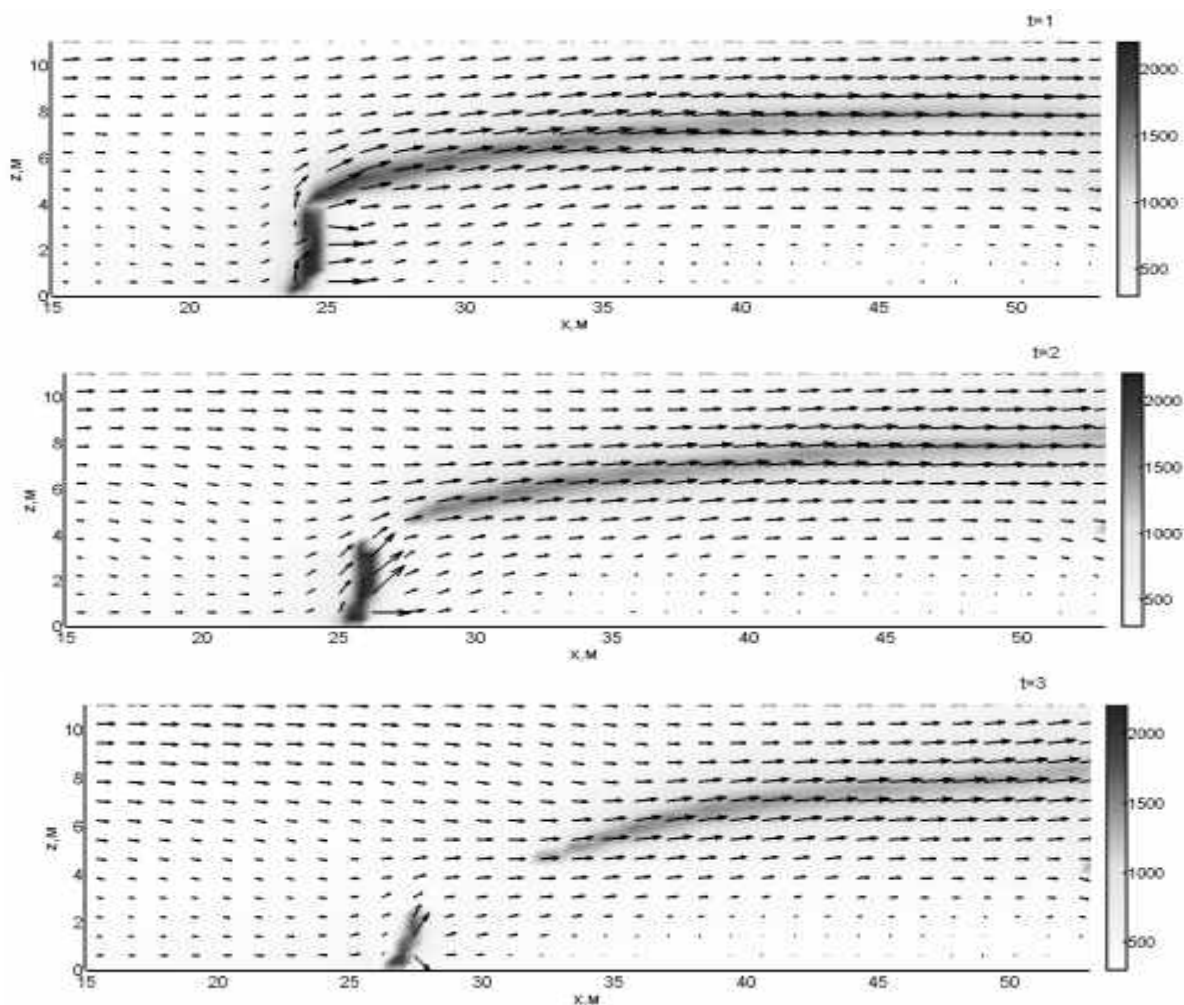


Рис. 6. Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с (1–3 с)

Рис. 6 демонстрирует, что в момент времени 1 с температура несколько снижается из-за малого количества воды, попадающей в плоскость моделирования пожара. Интенсивность верхней части пожара уменьшается по мере увеличения количества поступающей воды. Происходит разрыв конвективной колонки, очаг сужается и к моменту 3 с становится ниже.

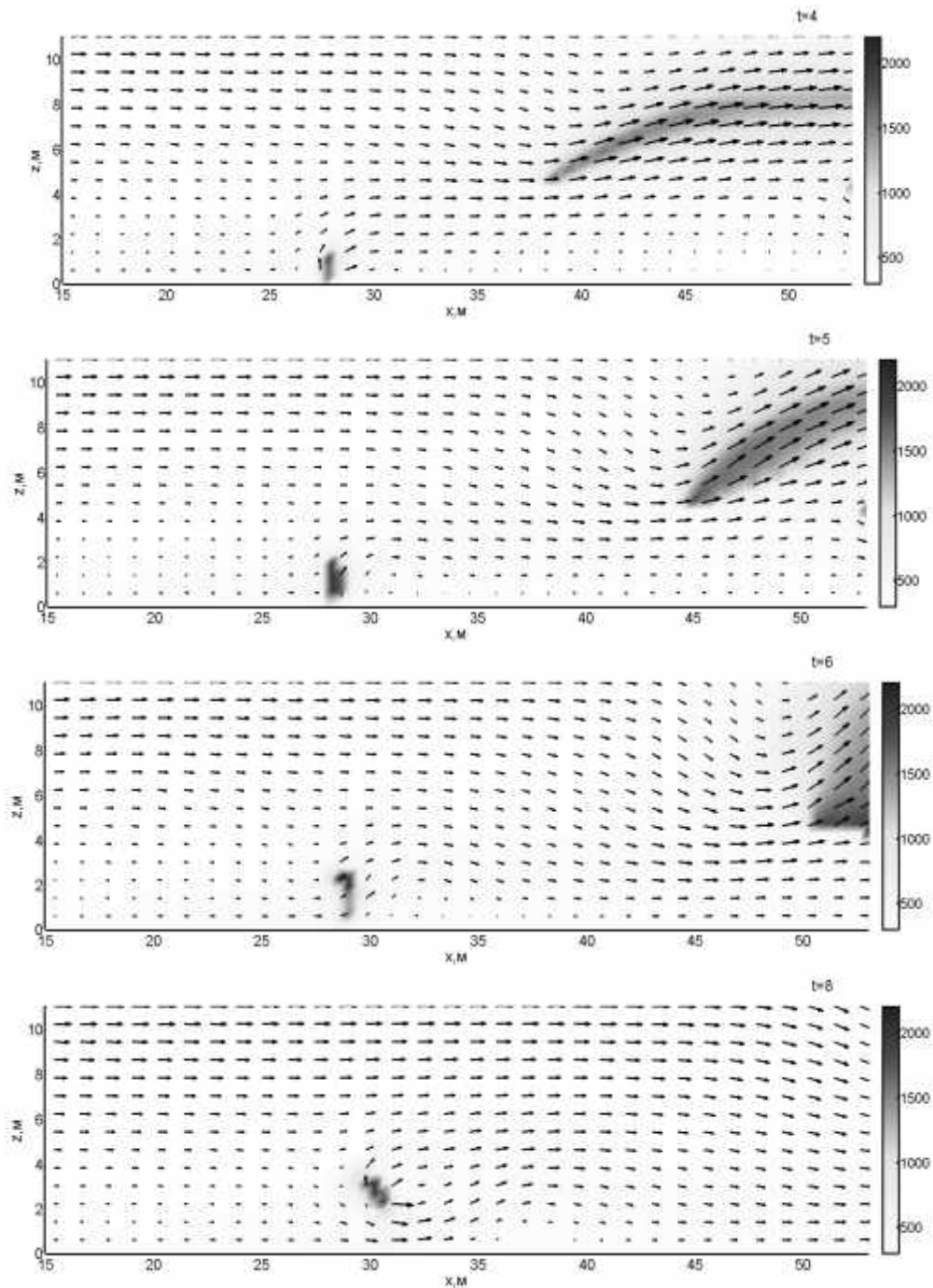


Рис. 7. Динамика взаимодействия пожара с водой при обстреле по центру ядра пожара с интенсивностью 60 кг/с и скоростью движения водяной пушки 3.13 м/с (4–8 с)

На рис. 7 видно, что даже при небольшом удалении водяной пушки от плоскости моделирования брызги, долетающие до очага горения, препятствуют разгоранию пламени. На момент времени 4 с очаг сжимается. Но затем уже к пятой секунде расширяется, происходит его развитие.

Необходимо отметить, что интенсивность потока воды, а также время его действия существенно влияют на динамику развития пожара.

Результаты моделирования тушения пожара стационарным источником подачи воды показывают, что оптимальной точкой обстрела является ближайшая точка, температура которой выше критической. Расход воды значительно уменьшается при повышении минимальной высоты обстрела дальней точки. Изменение дисперсии распределения Гаусса меняет расход воды для точки примерно так же, как и изменение высоты.

При численном моделировании различных способов тушения пожара движущимся источником подачи воды получено, что чем больший объем воды подается водяной пушкой, тем выше критическая скорость её движения. Вода поступает сверху и расходуется на охлаждение конвективной колонки, поэтому при уменьшении интенсивности подачи только малая часть воды поступает в очаг пожара, что приводит к уменьшению необходимого количества воды.

Как можно видеть, динамика пожара при различных значениях интенсивности подачи свободной воды имеет много общего. По мере приближения точки прицела к плоскости моделирования происходит тушение верхней части слоя лесных горючих материалов, основная часть очага пожара тушится, когда прицел близок к плоскости моделирования, а оставшаяся часть пожара тушится, когда прицел вновь отдаляется от плоскости. В случае, если скорость водяной пушки существенно ниже критической, то прекращение пожара в рассматриваемой плоскости происходит намного раньше, однако это не увеличивает скорость тушения пожара, а напротив, уменьшает.

Согласно данным, приведённым в работе [16], расход воды на площадь кромки пожара лесного пожара составляет около 5 л/м^2 кромки пожара.

Согласно расчётам, приведённым в работе [17], на прекращение пламенного горения килограмма топлива с теплотой сгорания $40\text{-}50 \text{ МДж/кг}$ за счёт охлаждения пламени требуется 2 литра воды, при этом отмечается, что на практике это значение в 5-10 раз выше. В проведённых расчётах плотность лесных горючих материалов составляет 8 кг/м^2 , а их теплотворная способность 11 МДж/кг . Таким образом, принимая во внимание плотность и учитывая поправку на его теплотворную способность, можно получить расчётное значение требуемого количества воды на уровне 4 кг/м^2 . С учетом ширины кромки пожара 1-1,5 м расход воды составит 4-6 кг/м. Представленные расчёты учитывают не все факторы, приводящие к недостаточному эффективному использованию воды. Так, учитывается расход воды на преодоление области нагретой газовой фазы в верхней части полога леса, и используется упрощённая модель рассеивания воды на основе изотропного двумерного распределения Гаусса, то есть с одинаковой дисперсией по каждой из координат. В модели не рассматривается динамика капель различных размеров, вместо этого предполагается, что капли долетают до цели и там полностью испаряются.

При тушении пожара при помощи обстрела водяной пушкой или авиацией вода, поступающая сверху, перед попаданием в зону активного горения в пологе леса испаряется за счёт энергии горения продуктов пиролиза. Если вода поступает недостаточно быстро, то она не попадает в полог леса и не тушит пожар. В случае, если интенсивность подачи воды достаточно большая, происходит охлаждение лесных горючих материалов в области кромки пожара, что препятствует их горению. На основании полученных в результате расчётов данных о концентрации кислорода в зоне горения можно считать, что весь кислород, поступающий в кромку пожара, расходуется на реакции горения. Преобладающим является процесс горения летучих продуктов пиролиза. В проведённых расчётах скорость ветра в пологе леса составляла в среднем 2 м/с . Учитывая массовую концентрацию кислорода в воздухе $C_{1e} = 0.2314$ и высоту полога леса 4 м , а также температуру, плотность, давление невозмущённой среды $T_e = 300 \text{ К}$, $P = P_e = 101325 \text{ Па}$, $\rho_{5e} = 1.179 \text{ кг/м}^3$, можно вычислить

поток кислорода на единицу длины фронта пожара $I_{51} = \bar{U} C_{1e} h_f \rho_{5e} = 2.182$ кг/(с·м). Смесь летучих продуктов пиролиза предполагается считать как эффективный газ (СО). При его горении отношение расхода топлива к окислителю составляет $M_1/(2M_2) = 1.75$. Тепловой эффект горения летучих продуктов пиролиза составляет $Q_5 = 10^7$ Дж/кг. Скорость распространения пожара в условиях отсутствия тушения по данным численных расчётов составила $\omega = 1.5$ м/с. Плотность элемента лесных горючих материалов в абсолютно сухом состоянии составляет $\rho_c = 2$ кг/м³, влагосодержание лесных горючих материалов $w = 0.13$. На основании этих данных можно вычислить энергию, выделяемую при сгорании летучих продуктов пиролиза в расчёте на единицу длины фронта пожара и секунду его распространения $I_{Q5} = I_{51} Q_5 M_1 / (2M_2) = 3.82 \cdot 10^7$ Дж/(м·с). Тепловой эффект пиролиза не зависит от наличия кислорода, поэтому приток энергии от пиролиза составляет $I_{Q1} = \omega h_f Q_1 R_c = 1.2 \cdot 10^7$ Дж/(м·с). Затраты энергии на сушку составляют $I_{Q2} = \omega h_f Q_2 R_c w = 2.43 \cdot 10^6$ Дж/(м·с).

Библиографический список

1. **Гришин, А.М.** Математическое моделирование лесных пожаров и новые способы борьбы с ними / А.М. Гришин. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1992. – 405 с.
2. **Albini, F.A., Chase, C.H.** Fire containment equations for pocket calculators. Research Note INT-268. Ogden, UT: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 1980.
3. **Coen, J.L.** Simulation of the Big Elk fire using coupled atmosphere–fire modeling // Int. J. Wildland Fire. 2005. № 14. P. 49–59.
4. **Стоцкий, А.Н.** Математическая модель движения импульсной струи жидкости в воздухе с учетом переходных процессов в формирующем устройстве. // Известия Тульского Государственного Университета. Технические науки. 2011. Вып. 2. С. 246–250.
5. **Букреев, В.И.** Влияние аномальной зависимости плотности от температуры на поверхностное гравитационное течение // Прикладная механика и техническая физика. 2005. Т. 4. № 1. С. 63–69.
6. **Yanga, W., Parkera, T., Ladouceurb, H.D., Keea, R.J.** The interaction of thermal radiation and water mist in fire suppression // Fire Safety Journal. 2004. V. 39. Iss. 1. P. 41–66.
7. **Tsoi, A., Snegirev, A., Tanklevskiy, L., Sheinman, I.** Flame Suppression by Water Sprays: Exploring Capabilities and Failures of FDS / Proc. of the Seventh Int. Seminar on Fire and Explosion Hazards ISFEH7 (5-10 May 2013, Providence RI, USA), Research Publ., 2013, pp. 482-491.
8. **Bullen, M.L.** The Effect of a Sprinkler on the Stability of a Smoke Layer Beneath a Ceiling // In: Fire Research Note 1016, Fire Research Station, Borehamwood. UK. 1974. P. 1 – 11.
9. **Романова, Н.А.** Влияние водного барьера на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. 2013. № 27. С. 26 – 34.
10. **Романова, Н.А.** Влияние интенсивности сброса воды на эффективность тушения лесного пожара / Н.А. Романова, Д.А. Маслеников, И.Е. Белоцерковская, Л.Ю. Катаева // Инновации в науке. 2013. № 27. С. 35 – 40.
11. **Катаева, Л.Ю.** Анализ динамических процессов аварийных ситуаций природного и техногенного характера: дис. ... докт. физ.-мат. наук. Нижний Новгород, 2009. – 180 с.
12. **Романова, Н.А.** Математическое моделирование динамической подачи воды в зону лесного пожара равномерно по всему фронту / Н.А. Романова, А.А. Лоцилов // Перспективы развития науки: сборник статей Международной научно-практической конференции. 20 марта 2014 г./ отв. ред. А.А. Сукиасян. - Уфа: РИИЦ БашГУ. 2014. С. 10–13.
13. **Катаева, Л.Ю.** Постановка и проведение вычислительного эксперимента по исследованию аэро- и гидродинамических процессов в аварийных ситуациях природного и техногенного характера: монография / Л.Ю. Катаева. – М.: РГОТУПС, 2007. – 218 с.

14. **Масленников, Д.А.** Особенности математического моделирования распространения суммарного теплового потока при лесных пожарах / Д.А. Масленников, И.Е. Белоцерковская, С.А. Лощилов, Л.Ю. Катаева. – Нижний Новгород: ООО «Стимул-СТ», 2012. – 110 с.
15. **Катаева, Л.Ю.** О влиянии водного барьера на динамику лесного пожара в зависимости от рельефа местности / Л.Ю. Катаева, А.Д. Постнов, С.А. Лощилов, Д.А. Масленников // Пожаровзрывобезопасность. 2014. Т. 23. № 1. С. 30–37.
16. **Гундар, С.В.** Приемлемый пожарный риск / С.В. Гундар, А.Н. Денисов, Н.Я. Трифонов // Пожаровзрывобезопасность. 2009. №3. С. 57–66.
17. **Абдурагимов, И.М.** Физико-химические основы развития и тушения пожаров / И.М. Абдурагимов, В.Ю. Говоров, В.Е. Макаров. – М.: ВИПТШ МВД СССР, 1980. С. 195–198.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

N.A. Loshilova, A.A. Kurkin

USING THE METHODS OF MECHANICS OF REACTING MEDIA FOR MODELING THE SUPPRESSION OF FOREST FIRES WITH STATIONARY AND WITH MOVING SOURCE OF WATER SUPPLY

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

Purpose: The paper presents the results of numerical simulation and optimization process of forest fire extinguishing with stationary and moving source of water supply. The analysis of different scenarios of extinguishing under the assumption that water droplets falling into the zone of fire, completely evaporate.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models of process of forest fire extinguishing.

Results: Analysis of the results showed that the location of the point of aim at a given critical temperature has a significant impact on the value of water intensity required for extinguishing forest fire. It works for both stationary and moving water source. For the stationary source the optimum aim point is the closest point with a temperature above the critical point. The larger the volume of water supplied with water gun, the higher the critical speed of its movement. Water is supplied from above and expended on convective column cooling, so the flow rate decreases; only a small portion of water flows into the seat of fire, which increases the required amount of water.

Application domain: Presented results can be used to develop improved models of process of forest fire extinguishing.

Key words: mathematical modeling, water, forest, fire, continuous reacting media, extinguishing.

УДК 551.466

А.С. Козелков

**ЭФФЕКТЫ, СОПРОВОЖДАЮЩИЕ ВХОЖДЕНИЕ АСТЕРОИДА
В ВОДНУЮ СРЕДУ**

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе обсуждаются существующие модели описания движения астероида в атмосфере, в воде и литосфере. В основе исследования лежат физико-математические и численные модели космогенных цунами. Дан краткий обзор астероидно-метеоритной опасности для Земли. Приведены формулы, позволяющие оценить параметры волн цунами, вызванные входом астероида в воду. Представленные результаты могут быть использованы при разработке усовершенствованных моделей космогенных цунами.

Ключевые слова: космогенные цунами, метеориты, астероиды, физико-математические и численные модели.

Введение

На рубеже XX и XXI веков произошла существенная переоценка угрозы падения малых тел Солнечной системы на Землю. Это произошло по причине накопления серьезного багажа фундаментальных теоретических знаний о динамической и физической эволюции Солнечной системы в целом. По мере систематизации этих знаний тема взаимодействия нашей планеты с крупными небесными телами начала привлекать к себе все большее и большее внимание. В настоящее время общественность и средства массовой информации уделяют этой теме особое внимание, а падение метеорита в Челябинской области Российской Федерации 15 февраля 2013 года еще больше подогрело этот интерес. Все чаще стала появляться информация о сближении с Землей космических тел размерами от нескольких десятков метров до километров. Многие из этих объектов пролетают в непосредственной близости к Земле на расстоянии, сравнимом с расстоянием до Луны. В связи с этим стали разрабатываться прогнозы опасного сближения астероидов с Землей на будущие десятилетия и даже столетия, а в науке прочно закрепился термин, олицетворяющий эту угрозу – астероидно-кометная опасность (АКО).

Столкновение с Землей крупных небесных тел с диаметром несколько километров это достаточно редкое событие, однако столкновения с телами малого и среднего размеров неоднократно имели место в прошлом. Наша планета не раз сталкивалась с небесными телами, а число доказанных метеоритных кратеров, получивших название «астроблем», уже к 1978 году насчитывало более сотни с прогнозом удвоения каждые 5.8 лет [1]. К настоящему времени количество кратеров составляет около двух сотен [56], хотя, скорее всего, эту цифру можно смело удвоить ввиду конфиденциальности и противоречивости некоторых данных [47].

Наибольшее количество кратеров находится в Северной Америке (шестьдесят), а если учитывать площадь разброса, то чемпионом является Австралия (рис. 1), на площади которой насчитывается 27 кратеров, самый маленький из которых имеет диаметр 80 метров. Диаметры кратеров колеблются от нескольких метров до нескольких десятков километров и постоянно меняются под действием эрозии и других геологических процессов. К наиболее известным кратерам можно отнести Аризонский кратер (рис. 2), имеющий диаметр 1200 метров и глубину 180 метров. По предположениям, причиной его возникновения стало падение небесного тела, летящего со скоростью примерно 50 000 км/ч и имеющего диаметр 50-60 метров и вес сотни тонн. В России к наиболее известным кратерам относится группа кратеров Маша, находящаяся в Западной Якутии, с диаметрами 180-300 метров и глубиной до

80 метров, образовавшаяся в результате падения метеорита примерно 7000 лет назад (рис. 2). Информацию о наиболее крупных кратерных образованиях, найденных на Земле, можно найти в [1, 5, 16 – 19, 56, 68, 99].



Рис. 1. Распределение «импактных» структур (астроблем) по поверхности планеты Земля



Рис. 2. Кратер Бэрринджера в городе Винслоу США, штат Аризона, образовавшийся 49000 лет назад в результате падения метеорита (слева) и группа молодых кратеров Маша в Западной Якутии Российской Федерации (справа)

В течение последних 15 лет человечество серьезно подошло к изучению астероидно-кометной опасности, выполняя всесторонний поиск и анализ потенциально опасных околоземных объектов (Near-Earth Objects, NEOs), различные программы изучения которых привели к открытию около десяти тысяч околоземных астероидов (рис. 3) [65]. Большая часть этих астероидов способна пересекать орбиту Земли (Earth-crossing asteroids, ECAs), однако лишь небольшая часть из всех этих объектов подвергается систематическому исследованию и каталогизируется. Так называемые «долгопериодические» кометы (long-period comets) могут подойти на потенциально опасную орбиту столкновения с Землей всего за два месяца до своего обнаружения [24].



Рис. 3. Статистика обнаружения околоземных небесных тел (слева) и их распределение по диаметру (справа) (онлайн источник: <http://neo.jpl.nasa.gov/stats>)

В настоящее время обнаружено более 800 астероидов большого диаметра, чьи орбиты могут пересечься с Землей. Каждый год регистрируется 2-3 пролёта на расстоянии 0.5-3 млн км от Земли тел диаметром 100-1000 метров, и зачастую пролёт обнаруживается уже после максимального сближения. В целом, в пределах 0,2 а.е. от Земли вращается более 7000 комет и астероидов, которые потенциально могут столкнуться с нашей планетой [2, 65, 68], причем 90 % из них имеют диаметр более километра (рис. 3) [3, 47, 65, 68], однако из последних каталогизировано всего лишь 7% от общего количества [24]. Статистически предсказано, что 93% из них могут столкнуться с Землей, а третья часть из всех метеоритов, способных пересечь орбиту Земли, столкнется с ней [49, 50]. Более того, по имеющимся данным орбиту Земли пересекают несколько десятков активных комет и несколько сотен угасших диаметрами ядра до 1 км. Предполагают, что именно такие кометы оставили свой след на Земле в виде кратеров, количество которых превышает 20% от общей численности. Столкновения с астероидами рассматриваются как наиболее вероятные, поскольку лишь 0,4% опасных сближений приходится на периодические кометы [68]. Большая часть сближений приходится на активные кометы, однако число потухших комет, которые по своим наблюдательным свойствам не отличаются от астероидов, может быть значительно больше.

За последние десятилетия крупные астероиды неоднократно пролетали в непосредственной близости к Земле. Первый астероид, получивший имя «Аполлон» и опровергнувший общепринятое мнение о том, что орбиты всех астероидов находятся в пределах Главного пояса, был открыт в 1932 году. Он имел орбиту с перигелийным расстоянием меньше радиуса Земли и вскоре после открытия исчез, дав себя обнаружить лишь в 1973 году. Точно такая же история произошла с двойным астероидом «Гермес» размером в 1,5 км, обнаруженным в 1937 году на расстоянии примерно 750 тысяч километров всего за три месяца до его максимального сближения с Землей. Впоследствии он, так же, как и «Аполлон», был утерян и обнаружен лишь в 2003 году. В 1996 году один из астероидов прошел на расстоянии около 470 тысяч километров и был открыт только за четыре дня до его наибольшего сближения с Землей, а в 2002 году на этом же расстоянии прошел другой метеорит, который был обнаружен только после того, как стал удаляться от Земли.

Неподготовленность человечества к встрече с таким «космическим пришельцем» демонстрируется в работе [68], в которой приводится пример открытия кометы «С/1983 Н1», через две недели пролетевшей около Земли на расстоянии всего лишь 0,0312 а.е. Сейчас пристальное внимание приковано к ставшему знаменитостью астероиду «Апофис» диамет-

ром 300 метров, открытому в 2004 году. В 2029 году «Апофис» пройдет на расстоянии очень близком к Земле - всего лишь 40000 (сорока тысяч) километров, а после возвращения в 2036 году он имеет более чем ненулевую вероятность столкновения с нашей планетой.

За последние сто лет было достоверно зафиксировано столкновение с Землей девяти крупных небесных тел:

1. «Челябинский метеорит» наблюдался не только в Челябинской, но и в Тюменской и Свердловской областях Российской Федерации, а также на северных территориях республики Казахстан. Метеорит упал в 80 км от города Сатка Челябинской области. Мощность взрыва при падении составила 300 тонн в тротиловом эквиваленте.

2. 22 апреля 2012 года у поверхности Земли над американскими штатами Невада и Калифорния появилось небесное тело,двигающееся с огромной скоростью. Разбрасывая раскаленные частицы, метеорит взорвался в небе над Вашингтоном. Мощность взрыва составила около 4 килотонн в тротиловом эквиваленте, что почти в восемьдесят раз меньше мощности метеорита, взорвавшегося над Челябинском. Установлено, что метеорит Саттер Милл образовался еще в период становления Солнечной системы.

3. Одиннадцатого февраля 2012 года в Китае прошел метеоритный дождь, после которого обнаружили почти сотню камней, крупнейший из которых весил 12,6 кг. Образцы метеоритов собирались на площади в 100 километров. По мнению специалистов, метеориты происходили из пояса астероидов между Марсом и Юпитером.

4. Пятнадцатого сентября 2007 года на территории высокогорного департамента Дезагвадеро в Перу, расположенного у озера Титикака вблизи границы с Боливией, упал метеорит, образовавший кратер шириной 30 и глубиной шесть метров, из которого забил фонтан кипящей воды вперемешку с горными породами.

5. Ранее, 20 июня 1998 года метеорит упал в Туркмении, вблизи города Куня-Ургенч. Перед падением в небе был виден ослепительно яркий свет. Основная часть метеорита весом 820 килограммов упала на хлопковое поле, образовав воронку диаметром 5 метров и глубиной 3,5 метра.

6. Семнадцатого мая 1990 года яркий астероид наблюдали жители башкирского города Стерлитамак. На месте падения небесного тела был обнаружен кратер диаметром 10 метров и глубиной 5 метров, а также крупный фрагмент весом 315 килограммов и два фрагмента весом 6 и 3 килограмма.

7. Двенадцатого февраля 1947 года в отрогах Сихоте-Алиня упал железный метеорит, образовавший более 100 кратеров, около 30 из которых диаметром от 7 до 28 м и глубиной до 6 метров. На площади порядка 10 кв. км было собрано около 30 тонн метеоритного вещества. Основная часть энергии метеорита была передана атмосфере, и лишь около процента выделилось при ударе о Землю.

8. На юге Африки лежит пятиметровая глыба, получивший название Гоба, и являющаяся осколком метеорита массой 60 тонн, упавшего в 1920 году в Намибии и сопровождавшегося метеоритным дождем.

9. Наиболее известным метеоритом прошлого столетия является Тунгусский метеорит, упавший 30 июня 1908 года около 7 часов утра местного времени над территорией Восточной Сибири в междуречье Лены и Подкаменной Тунгуски. Взрывной волной в радиусе около 40 км был повален лес, уничтожены звери, пострадали люди. Из-за мощной световой вспышки Тунгусского взрыва и потока раскаленных газов возник лесной пожар, довершивший опустошение района.

Основную опасность в глобальном масштабе представляют собой тела диаметром более 1 км, тогда как серьезные континентальные или региональные разрушения могут вызвать тела и гораздо меньшего диаметра [8, 58]. Первой документально зарегистрированной катастрофой регионально масштаба является Тунгусский метеорит, после падения которого лес был повален на площади более 2000 квадратных километров (рис. 4). Последствия столкновения астероидов разного размера с Землей обсуждаются в [68, 83].

Взрывы крупных метеоритов могут существенно влиять на климат и структуру земной коры не только в континентальном, но и глобальном масштабах. Падение астероида в океан спровоцирует выброс миллионов тонн водяного пара в атмосферу, и неизбежно вызовет гигантскую волну цунами, последствия обрушения которой на сушу трудно прогнозируемы. Все это ставит изучение проблемы падения астероидов во главе актуальнейших задач современного естествознания. По своей сложности и социальной значимости для человечества эта задача сопоставима с проблемой управления термоядерной энергией.

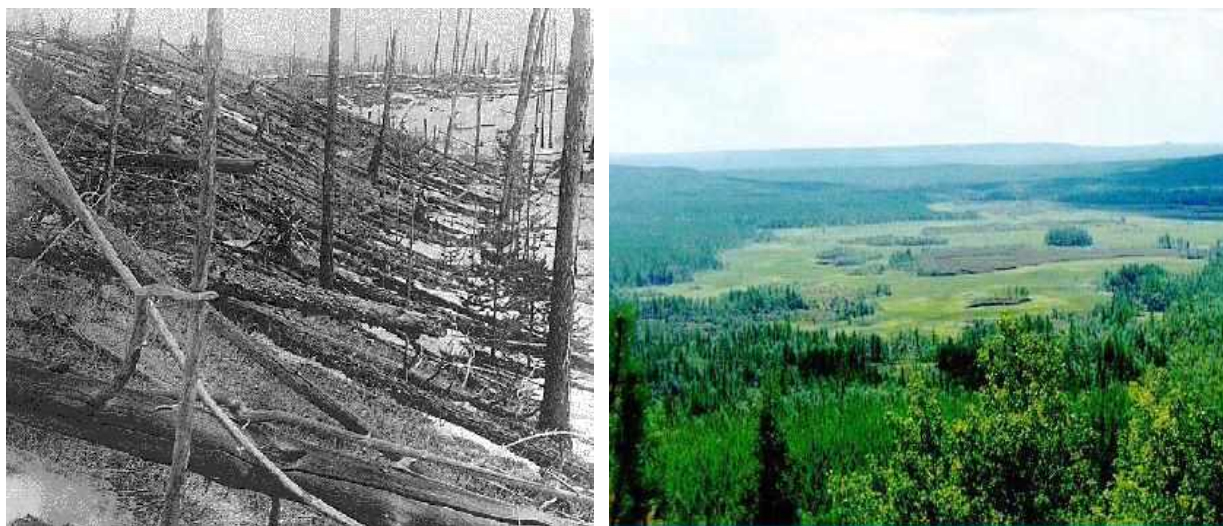


Рис. 4. Вывал леса на месте падения Тунгусского метеорита (слева – сразу после падения, справа – в настоящее время)

Естественно, что у тел меньшего размера вероятность столкновения с Землей гораздо выше, чем у больших или гигантских астероидов. Приблизительная вероятность падения астероидов различного размера и их характеристики представлены в табл. 1 [4–6, 58].

Таблица 1
Характеристики метеоритов, контактирующих с Землей

Диаметр, м	Энергия столкновения (Мт)	Площадь воздействия, км ²	Вероятность падения, годы
50	10	1 900	100
100	75	7 200	1 000
200	600	29 000	5 000
500	10 000	190 000	40 000
1000	75 000	740 000	100 000
2000	1 000 000	Глобальный эффект	1 000 000
10 000	Десятки миллионов	Глобальный эффект	70 000 000
100 000	Сотни миллионов	Конец цивилизации	Несколько млрд.

Астероидно-кометная опасность для существующей цивилизации предполагает изучение всех небесных тел с размерами менее порога глобальной катастрофы (средний диаметр объекта 1-2 км) и более порога защиты земной атмосферы (средний диаметр объекта 50-100 м) [77]. Тела меньшего диаметра существенно замедлятся и разрушатся на высоте в результате воздействия на них атмосферного трения и напряжения внутреннего сдвига. Относительно данной высоты ударная волна приведет лишь к несущественным повреждениям земной поверхности.

При контакте с Землей основную роль играет масса, скорость и угол наклона траектории метеорита, его состав, плотность и форма имеют второстепенное значение. Классификация метеоритов по массе, скорости и наклону траектории представлены в [17, 68].

Оценка вероятности столкновения с метеоритами основывается на анализе известных кратеров на Земле и определения времени их возникновения изотопными методами [7]. По этой оценке получается, что за каждые 100 миллионов лет на Земле образуется от 500 до 1300 кратеров диаметром в 1 километр и более, то есть Земля сталкивается с огромными метеоритами в среднем через 100–200 тысяч лет.

Столкновения с крупными астероидами в масштабе жизни нескольких поколений человечества происходят достаточно редко, однако за всю свою историю планета Земля сталкивалась с несколькими тысячами метеоритов диаметром 1 км, и с десятками диаметром 10 км. Столкновения с метеоритами носят случайный, непредсказуемый характер и контакт с метеоритом любых размеров может произойти в любой момент, а учитывая возможное глобальное воздействие на Землю и тот факт, что астероиды с размерами 1–10 км удастся обнаружить лишь при непосредственной близости к Земле, человечеству необходимо серьезно отнестись к этой проблеме. Очерк истории метеоритных падений и возможные проблемы столкновения астероидов с планетой Земля приводится в [47, 68, 83, 99].

Отдавая должное мировому сообществу, следует отметить, что астероидно-кометная угроза воспринята им достаточно серьезно. Эта угроза признана как одна из наиболее важнейших из существующих проблем окружающей среды и космического пространства, требующих постоянного внимания, оценки степени реальной угрозы и разработке возможных мер противодействия и смягчения последствий столкновения. Во многих странах мира выполняются программы поиска, обнаружения, каталогизации и систематизации потенциально опасных космических объектов. Осуществляется постоянный мониторинг околоземных объектов с помощью телескопов-роботов, относящихся к ведущим специализированным астрономическим обсерваториям.

Наиболее интенсивно исследования опасных околоземных объектов проводятся в США. Начало этим исследования положило рабочее совещание на тему «Столкновение астероидов и комет с Землей: физические последствия и человечество», организованное в 1981 году Национальным управлением по космическим исследованиям США [70]. В настоящее время в США работает система LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search) [61], разработанная для поиска астероидов и комет, орбиты которых пересекаются с орбитой Земли. Отслеживание околоземных астероидов осуществляется по программе «Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)», которая состоит из двух автономных систем наблюдения на станции наблюдения Мауи и в обсерватории Паломар [62]. Информацию о проектах, посвященных исследованию околоземных объектов, можно найти на сайте Международного планетного общества [63]. Библиографию по астероидно-кометной опасности, официальные отчеты по проблеме, каталоги, изображения малых тел, презентации и другую информацию можно найти на специальном сайте NASA [64]. В NASA существует отдельная программа по исследованию околоземных объектов [65]. В отчетах по этой программе, можно найти общую информацию, данные об орбитах комет и астероидах, сближающихся с Землей, статистику их обнаружения и вероятность столкновения с Землей с указанием степени опасности. Международная кооперация по мониторингу околоземных объектов осуществляется в рамках австрало-американского проекта CSS, а также в рамках проекта стран Европейского союза Asiago-DLR Asteroid Survey (ADAS).

В России исследования, связанные с астероидной опасностью, ведутся во многих отраслевых институтах и предприятиях, однако, к сожалению, не так интенсивно и вклад от их деятельности пока достаточно скромный. Существенным шагом для координации усилий в этом направлении стало решение Бюро Совета РАН по космосу от 31 марта 2011 г. № 10310-01, в рамках которого экспертные рабочие группы Совета по астероидно-кометной опасности и космическому мусору были преобразованы в объединенную экспертную рабо-

чую группу по космическим угрозам [67]. Созданная группа призвана выработать комплексный подход к решению проблем прогноза и противодействия астероидно-метеорной опасности в отечественной науке.

Наблюдения за астероидами в околоземном пространстве систематически ведутся в Пулковской обсерватории. Исследования по различным программам мониторинга ведутся в институте Солнечно-земной физики СО РАН и в специальной астрофизической обсерватории РАН. Необходимо отметить вклад Института астрономии РАН, которым впервые в России выполнен комплексный анализ по всем аспектам данной проблематики. Проанализированы астрономические, геофизические и прикладные методы исследований и обнаружения небесных тел, проведена достоверная оценка степени их угрозы, а также анализ методов противодействия и уменьшения ущерба. Результаты работы института в этом направлении рассмотрены на совместном заседании Бюро Совета РАН по космосу и Президиума НТС Роскосмоса 23 июня 2010 г. [69]. На данном заседании выработано решение, по результатам реализации которого разработан проект концепции Федеральной целевой программы «Развитие системы противодействия космическим угрозам (2011–2020 гг.)», а также предложения по мероприятиям реализации системы астероидно-кометной безопасности России.

По астероидно-кометной безопасности ежегодно проводятся научные конференции, в основном международные. Данные научных исследований по астероидно-кометной безопасности насчитывают уже десятки книг и тысячи статей, публикуемых различными изданиями, наиболее известным из которых является международный журнал исследований Солнечной системы ICARUS [66] - официальное издание подразделения планетных исследований Американского астрономического общества. Здесь публикуются результаты последних наблюдательных, экспериментальных и теоретических исследований в области астрономии, геологии, метеорологии, физики, химии, биологии и других научных аспектов Солнечной системы и внесолнечных планетных систем. К российским изданиям, периодически публикующим исследования по астрономическим и фундаментальным вопросам науки Солнечной системы и астероидно-кометной опасности, относятся «Астрономический вестник», «Доклады Академии наук». Отметим здесь одну из самых свежих российских монографий – «Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра» под редакцией Б.М. Шустова и Л.В. Рыхловой [68], в которой впервые сделана попытка обобщить все имеющиеся данные по этой теме. В ней рассмотрены современные представления о свойствах малых тел Солнечной системы, проблемы их обнаружения и мониторинга. Рассмотрены вопросы оценки уровня угрозы, способы защиты, уменьшения ущерба и возможных последствий падения небесных тел на Землю, а также развитие отечественной и международной кооперации по решению данной проблематики. В книге представлены актуальные данные по потенциально опасным телам, зафиксированным сближениям комет и астероидов, основные ресурсы в сети Интернет, содержащие информацию по астероидно-кометной безопасности, данные о количественном составе основных групп астероидов, а также каталог импактных структур планеты Земля. Часть представленной в монографии информации опубликована в англоязычном издании [83].

Систематизация и обобщение накопленных знаний позволяют выделить ряд проблем, изучение которых имеет важное значение как для лучшего понимания физики отдельных процессов, так и для развития вычислительных технологий, применение которых может быть направлено на решение фундаментальных задач и прогнозирование последствий астероидно-кометного взаимодействия. Вычислительные технологии для данной проблематики, по существу, являются единственным инструментом для понимания процессов столкновения, динамики, кратерообразования в планетарном масштабе. Многие процессы высокоскоростных соударений планетарного масштаба, такие как плавление, излучение, испарение и другие, невозможно воспроизвести в лабораторных условиях на Земле. Развитие существующих и построение новых физико-математических моделей для реалистичного моделирования столкновений небесных тел представляют достаточно актуальную и сложную проблему для современной математической

физики. Уровень развития вычислительных технологий для полномасштабного моделирования процесса столкновения находится на самой начальной стадии, поскольку численные расчеты двумерных, а тем более трехмерных физико-математических задач о прохождении разрушающегося тела сквозь атмосферы планет и их ударов о поверхности являются весьма трудоемкими и сводятся к описанию лишь отдельных стадий и обособленных процессов. Естественными выглядят попытки построения приближенных моделей, одна из которых, доведенная до пользовательской программы, создана в Аризонском университете [40].

Одной из слабо изученных стадий воздействия астероида на поверхность Земли является падение небесного тела в Мировой океан и образование волны цунами – такие волны называют «космогенными» цунами. Учитывая тот факт, что водная поверхность составляет около двух третей от всей земной, вероятность падения астероида в океан гораздо выше (в пять раз [77]), чем на сушу. Однако, к настоящему времени обнаружено всего 15-20 кратеров, образованных при ударе в море [96]. Это связано с меньшей исследованностью и молодостью морского дна, а также особенностями подводного кратерообразования.

Описание космогенного цунами представляется достаточно сложным в силу взаимовлияния друг на друга нескольких стадий, из которых можно выделить основные пять [81]¹:

1. Движение и определение характеристик движения астероида в атмосфере. На этой стадии помимо оценки вероятности такого события, а также определения размеров, формы, скорости, плотности метеорита необходимо учитывать ряд сложнейших процессов, таких как вращение, абляция, термохимия, потеря скорости и массы и др., которые в итоге повлияют на конечную скорость столкновения.

2. Формирование кратера на водной поверхности. Процесс взаимодействия астероида с водой является сильно нелинейным и формирование кратера сопровождается рядом специфических процессов, таких как парообразование, выброс воды в атмосферу, столкновение с водой нескольких осколков, приводящее к формированию группы очагов и др. На этом этапе необходимо определить связь между характеристиками метеорита, батиметрией морского дна и параметрами очага возмущения.

3. Движение астероида в толще океана. Достаточно крупный астероид, упав в океан, способен беспрепятственно пройти сквозь его толщу и сформировать кратер на дне. На данном этапе необходимо определить влияние схлопывания газового пузыря, образующегося за астероидом при прохождении толщи воды, на параметры очага цунами.

4. Разрушение водного кратера, влияние этого разрушения на формирование начальной волны, а также начальная стадия распространения вблизи источника возмущения.

5. Распространение космогенного цунами и накат на сушу. Описание данной стадии может опираться на нелинейную теорию мелкой воды, достаточно хорошо развитую для волн цунами сейсмического происхождения [60, 82, 102–104]. Свойства распространения космогенного цунами будут, видимо, сопоставимы с сейсмическими, однако возникают неопределенности, связанные с тем, что до настоящего времени достоверно не зарегистрировано ни одного космогенного цунами.

С точки зрения математического моделирования космогенного цунами (да и вообще моделирования) самой сложной и, вообще говоря, недостаточно проработанной, является первая стадия в части термохимии, которая важна для расчета траектории и потери массы астероида. Методы исследования в этой области, как экспериментальные, так и теоретические, за последние десятилетия серьезно усложнились. Движение газа около обтекаемого тела определяется не только силовыми и температурными полями, но и химическими процес-

¹ В работе [81] рассматривается пять стадий эволюции космогенного цунами, начиная от удара метеорита о поверхность океана до наката на берег. В настоящей работе, эти стадии укрупнены и добавлены еще две – исследование движения астероида в атмосфере с целью определения более точных характеристик удара о поверхность и движение астероида в толще океана. Вообще говоря, для полной картины необходимо добавить еще и шестую стадию – формирование кратера на дне океана. При большом диаметре астероида и сильном ударе, деформация донной поверхности также может послужить одной из причин возникновения космогенного цунами.

сами, зависящими от скорости и температуры. Данные химические процессы, как правило, характерны для пограничного слоя, где при гиперзвуковом обтекании они усложняются из-за разрушения поверхности тела и связанное с этим химическое взаимодействие разрушающегося вещества с воздухом. Многочисленные химические реакции, проходящие в пограничном слое, в итоге существенно влияют на аэродинамические характеристики, тепловые потоки и скорость разрушения. Из-за существенной нелинейности уравнений пограничного слоя для определения его характеристик вводят допущения и упрощения, а также пользуются уже наработанными данными в части ударно-волнового взаимодействия и излучения.

Также проблематичной является стадия удара о поверхность и формирование каверны, с последующей ее эволюцией, образованием подводных пузырей и их влиянием на формирование очага. Экспериментальные исследования и моделирование формирования каверны по большей части сводится для твердых материалов или вязкоупругих жидкостей [119], между которыми и жидкостью можно провести лишь некоторую аналогию, хотя имеются и существенные различия.

Модели описания движения астероида и его входа в воду

Атмосфера

Столкновение с крупным астероидом окажет воздействие на все оболочки планеты – литосферу, атмосферу, гидросферу и, несомненно, биосферу. Полномасштабную физико-математическую модель такого столкновения, учитывающую все процессы, проходящие в оболочках Земли, построить крайне трудно. Сверхмощный источник импульса, порождаемый астероидом, определяет актуальность решения различных классов задач со своей спецификой, относящихся к нестационарному движению твердой, жидкой и газообразной фазы при экстремальных концентрациях энергии.

Методы исследования взаимодействия метеоров с планетами Солнечной системы весьма разнообразны и в большинстве своем заимствованы из других наук. Метеорит крупных размеров, подобный Тунгусскому или Челябинскому, вторгаясь в атмосферу Земли с космической скоростью, создаст в ней ощутимые оптические, акустические и даже механические явления. Движение астероида в атмосфере Земли определяется направлением его вхождения. Действительная скорость влета метеорита в атмосферу равна его геоцентрической скорости, увеличенной в результате притяжения Земли. Минимальная скорость «догоняющего» или «догоняемого» метеорита равна 11.2 км/с, средняя скорость вхождения составляет, как правило, 30–40 км/с, тогда как максимальная скорость «встречного метеорита» может достигать 70 км/с и выше. При скорости вхождения 17.5 км/с и нулевом угле относительно зенита, атмосфера поглощает больше чем половину кинетической энергии каменных метеорных тел с диаметрами порядка 230 метров и железных метеорных тел с диаметром порядка 50 метров. Для угла вхождения 45 и 60 градусов такая потеря кинетической энергии характерна для тел диаметром 360 и 70 метров, и 500 и 100 метров соответственно для каменных и железных метеоритов. Для скоростей вхождения 50 км/с и углов 45 и 60 градусов, стандартная модель абляции дает потерю половины кинетической энергии для тел размером 3000 и 1900 метров соответственно [58]. Эти цифры могут быть гораздо меньше, если процесс абляции не интенсивен и можно говорить о том, что астероиды в несколько сотен метров достигают Земли практически без торможения.

В любом случае, полная модель для «космогенного цунами», несомненно, должна учитывать этот аспект. Особенно это касается комет, которые состоят в основном из льда, и до океана может долететь лишь небольшой её обломок, способный все же сгенерировать существенную волну. Смоделировать потерю скорости на траектории позволяет двухстадийная модель, на первом этапе которой на основании решения системы уравнений Навье-Стокса вычисляется сила лобового сопротивления астероида для некоторого диапазона средних чисел Маха движения, а на второй стадии на основании этих данных вычисляется угол входа в «мишень» и все динамические характеристики, включая потерю массы. Самым трудоемким

здесь является первый этап, в котором помимо решения полной системы уравнений Навье-Стокса, необходимо моделировать разрушение астероида высокоэнтальпийным потоком воздуха с учетом термохимических процессов. С точки зрения численного моделирования данная задача (особенно стадия, связанная с термохимией) весьма и весьма непроста и требует дополнительных упрощений и допущений.

При движении астероида в разреженной атмосфере удары молекул воздуха о его поверхность приводят к «микровзрывам», которые разрушают кристаллическую решетку его поверхностного слоя. В результате таких непрерывных столкновений астероид получает дополнительный импульс, что приводит к повышению коэффициента сопротивления и увеличению скорости торможения, а его поверхность нагревается до нескольких тысяч градусов. Плавящееся на поверхности вещество непрерывно разбрызгивается (распыляется) под действием плотной встречной воздушной волны, уменьшая тем самым массу метеорита и образуя огненно-пылевой хвост, расширяющийся до тех пор пока давление в нем не выровняется до атмосферного. Нарастающее уплотнение воздуха в головной части движущегося астероида образует ударную волну, подобную волнам, возникающую вокруг твердого тела (пули или снаряда), движущегося в атмосфере со сверхзвуковой скоростью. Головная часть ударной волны имеет конусообразную форму с углом раствора, зависящим от скорости астероида (рис. 5). В общем случае, форма ударной волны может быть любой, ввиду несимметричности тела астероида и его вращения во время движения, однако всегда в головной части образуется волна уплотнения, а в задней волна разгрузки.

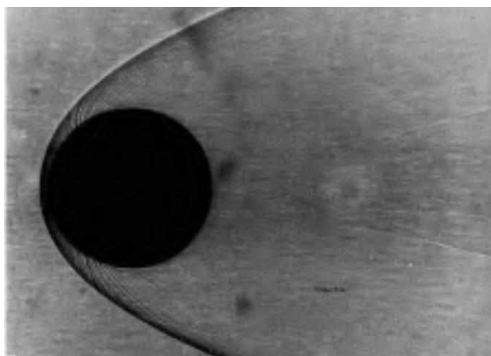


Рис. 5. Шар, движущийся со скоростью $M = 7.6$ в атмосферном воздухе [71]

Ударная волна в атмосфере при движении метеорита вызывает звуковые явления, проявляющиеся в основных трех отрывистых ударах [16, 19], сопровождающихся грохотом, а затем ослабевающим гулом. Из-за своей неправильной формы метеориты под давлением воздуха, как правило, дробятся, вследствие чего на Землю падают группы метеоритов или метеоритные дожди. Падение одиночного метеорита является довольно редким событием. Некоторые физические аспекты ударно-волнового взаимодействия астероида и атмосферы, а также формулы оценки параметров ударной волны можно найти в [83].

Теория движения метеорного тела в атмосфере, а также связанные с этим явлением процессы, включая методы их изучения, систематически изложены в монографии И.С. Астаповича [17]. В монографию включены оригинальные работы автора и руководимого им коллектива, дан исчерпывающий обзор публикаций, проводимых мероприятий (конференций, семинаров) и научных исследований советской школы «метеоритики». Движения метеора в земной атмосфере достаточно подробно рассматривается в монографиях Е.Л. Кринова [16, 19]. Здесь обсуждаются вопросы, связанные с атмосферными траекториями астероидов, явления, сопровождающие падения метеоритов, изучается физика образования ударных волн, пылевые следы, статистика падения метеоритов и многие другие вопросы, в том числе касающиеся химии и минералогии. Приводится сводка всех известных на то время данных о падении двух гигантских метеоритов XX века – Тунгусского и Сихотэ-Алинского.

Комплексное моделирование взаимодействия крупного астероида с атмосферой рассматривается в работе [20]. Модель, предполагающая наличие конечного воздушного взрыва, основывается на рассмотрении двух стадий. Стадия резкого нестационарного торможения описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений физики метеоров и входа космических аппаратов в атмосферу, учитывающей абляцию за счет плавления и испарения. На заключительном участке траектории моделируется динамика взрывоподобного распада с помощью модели взрыва летящего тела [22].

Проблеме физики метеорных явлений в атмосфере посвящена монография В.А. Бронштена [21]. В ней рассматриваются процессы торможения и потери массы, особенности движения атмосфере метеоритов, формирующих ударные волны. Подробно рассматривается процесс свечения метеоритов, их спектры, проблема дробления, а также вопросы, связанные с формированием и разрушением ионных следов метеоритов. Рассматривается автомодельность задачи о движении и абляции метеорита в предположении, что движение в основном зависит от трех параметров: начальной массы, плотности и угла входа.

Обзор литературы по движению метеорита в атмосфере можно найти в [23], где изучены методы решения обратной задачи для наблюдаемой траектории болида и получено более ясное представление о динамике и термодинамике. Изучение аэродинамики движения метеорита в атмосфере представлена в [25]. Здесь рассматриваются вопросы движения тел различной природы в атмосфере, а к изучению движения крупных метеоров применяется гиперзвуковая аэродинамика. Вопросы разрушения как крупных, так и мелких метеоритов в атмосфере, а также связанный с этим процесс образования кратеров рассматривается в работах [26–35].

Математическое моделирование вхождения астероида в атмосферу на примере Венеры рассматривается в [36]. Здесь изучается влияние аэродинамического торможения в атмосфере на процесс разрушения и кратерообразования, показано, что двумерные и трехмерные модели находятся в хорошем согласии, хотя двумерная модель несколько завышает площадь разброса фрагментов. Изложение и решение проблемы фрагментации астероидов с учетом угла входа в атмосферу и оценка площади повреждения в результате столкновения можно найти в [51, 52].

В [37] взрывные процессы в атмосфере моделируются с помощью модели «стандартной атмосферы», которая предсказывает развитие сильной головной ударной волны, сопровождаемой интенсивной кумуляцией энергии и большим объемом сильно нагретого воздуха. Двумерная численная модель, учитывающая излучение и абляцию, применяется для изучения падения Тунгусского метеорита в [38]. Моделирование показывает наличие двух стадий – стадию разрушения основного тела в высокоскоростную струю мелких осколков и стадию замедления образованной струи с кумуляцией энергии, приводящей к образованию мощного баллистического факела на высоте примерно 4 км. Баллистика метеороидов, режимы обтекания тел различных размеров при входе в атмосферу Земли с метеорными скоростями рассматривается в [39]. Показано, что баллистика метеороида существенно зависит от свойств атмосферы планеты и его торможение можно рассматривать как растянутый удар об атмосферу во времени.

Современное состояние аэродинамики входа тел в атмосферу представлено в [25]. Монография посвящена актуальным вопросам движения тел разной природы в атмосфере, рассматривается гиперзвуковое обтекание тел различной формы газовыми смесями, изучаются вопросы конвективного и лучистого теплообмена, сопровождающегося уносом материала, а также свечение возмущенного потока. Аэродинамика больших скоростей применяется к анализу движения метеоров.

В целом, можно отметить, что развитие методов гиперзвуковой аэродинамики существенным образом сказалось на изучении и анализе метеорных явлений в атмосфере. Развитый физико-математический аппарат, соответствующее программное обеспечение [25, 36, 37, 43, 85], а также доступные вычислительные ресурсы уже в настоящее время позволяют моделировать ведущие физические процессы аэродинамики метеорита. Численные методы

позволяют в сравнительно короткие сроки и с достаточной точностью определить акустические, термодинамические характеристики объекта, его светимость, а методы баллистики определить траекторию объекта с помощью рассчитанных аэродинамических коэффициентов. Однако существуют и не до конца изученные вопросы. Аэродинамика гиперзвуковых скоростей развивается применительно к моделированию физических процессов в космонавтике, и основные результаты исследований, включая процессы столкновения, относятся к ограниченному диапазону скоростей (до 16 км/с) [9, 57]. Естественно, существующие модели можно модифицировать и к более широкому диапазону скоростей, имея данные о свойствах материалов и воздуха для высоких температур. Проблема здесь лишь в том, что практически все существующие методики расчета гиперзвуковой аэродинамики в *полной* мере описывают процессы взаимодействия тела с совершенным газом. В этих методиках процессы конвективного теплообмена в пограничном слое, которые могут существенно повлиять на процесс уноса массы и излучения, описываются приближенными эмпирическими или упрощенными дифференциальными моделями. Еще одной проблемой применения существующих методов аэродинамики является неопределенность формы астероида и его «нелинейное» вращательное движение [53]. На форму траектории движения астероида существенным образом влияет процесс его дробления в полете, который также проблематично смоделировать с помощью существующих моделей. С помощью существующих газодинамических моделей достаточно сложно в полной мере описать процесс «внезапных» ярких вспышек, наблюдающихся в атмосфере, на интенсивность появления и яркость которых, кроме скорости, наверняка влияет и процесс дробления. Вопрос моделирования образования и распространения «огненно-пылевого» хвоста, в котором происходит взаимодействие с ударной волной и турбулентное перемешивание с продуктами распада, для исследования является также достаточно сложным, учитывая даже то, что в настоящее время турбулентность моделируется только полуэмпирическими моделями. Однако наиболее сложный вопрос моделирования движения метеорита в атмосфере все же относится к разработке физических и математических моделей для физико-химической кинетики.

В полномасштабной модели для космогенного цунами на стадии движения астероида в атмосфере, в первом приближении физико-химической кинетикой можно пренебречь, ограничившись лишь учетом потери массы и скорости астероида на траектории. Методика расчета траекторий тел с переменными аэродинамическими и тепловыми характеристиками и уносом массы представлена в [25]. Самым простым решением этой задачи является численное интегрирование уравнений динамики твердого тела с вычислением аэродинамических коэффициентов и параметров теплообмена в каждой точке траектории. Однако этот путь весьма трудоемок, поскольку необходимо решать задачу гиперзвукового обтекания тела при изменяющихся внешних условиях в каждой точке траектории. Наиболее применимым на практике подходом к расчету характеристик астероида на траектории является определение аэродинамических коэффициентов в выделенных «квазистационарных» точках, однако применять такой метод нужно весьма аккуратно, поскольку есть вероятность ошибки в связи с резким изменением аэродинамических коэффициентов от точки до точки.

Обзор работ по аналитическому и численному исследованию траекторий торможения тел, а также расчету уноса массы за счет конвективного нагрева можно найти в [25]. Здесь особо отмечается, что диапазон больших скоростей входа, где излучение является основным источником аэродинамического нагрева, значительно менее изучен. В этом случае, унос массы и изменение формы астероида могут оказать очень существенное влияние на его траекторию.

Литосфера

Процесс воздействия астероида на литосферу связан с тремя явлениями [5]: сжатие пород грунта и метеорита при ударе, гидродинамическое растекание вещества и рассеяние метеоритного вещества в текучей массе. Все три процесса проходят одновременно или накладываются друг на друга, однако их относительная составляющая изменяется.

При ударе астероида о поверхность планеты происходит резкое торможение, и начальная кинетическая энергия в значительной степени переходит в тепло. Мгновенное торможение формирует мощную ударную волну, имеющую шаровидный фронт и распространяющуюся по полусферической области, приводящей в ускоренное движение земные породы (рис. 6). В нижней полусфере ударная волна образует пустоту, называемую первичным кратером с уплотненными и частично расплавленными стенками. По мере углубления в грунт, астероид увлекает за собой дополнительные массы вещества. От стенок воронки по породам какое-то время распространяется ударная волна, сжимая их, после чего давление падает до нормального, образуя волну разрежения. В однородном материале ударная волна распространяется до достижения предела упругости или в случае падения метеорита до сейсмического отражателя. После отражения волна также увлекает за собой породы и при достижении поверхности нижней части кратера волна поднимет его центр, образуя характерный купол (рис. 6, рис. 7).

После отражения от земной поверхности волна движется обратно к метеориту. Ударная волна создает «космическое» давление, под действием которого как земные породы, так и породы метеорита сильно сжимаются, что приводит к взрывному росту температуры и давления, которые нагревают и плавят вещество в области падения. В эпицентре этой области температура может достигать колоссальных значений, приводящих к мгновенному испарению вещества, в результате которого образуется плазма, еще более усиливающая взрыв, разбрасывающий обломки пород во все стороны от воронки. Масштаб проникновения в грунт обычно немногим больше размеров самого метеорита, поэтому в момент столкновения энергосодержание происходит в массе порядка массы астероида. Ударные волны в астероиде сначала сжимают его, а затем, отразившись от поверхности, разрывают на части. Возникшего при этом давления зачастую хватает для того, чтобы полностью испарить астероид. При этом начальная скорость ударных волн, как в мишени, так и в ударнике, равна приблизительно половине скорости удара, а давление достигает сотен ГПа [68].

Когда энергия в ударной волне становится меньше некоторой критической величины, слои грунта уже не испаряются, однако этой энергии еще хватает для дробления вещества [13]. Раздробленное вещество выбрасывается вверх в виде твердых частиц (рис. 6), вследствие чего возникает кратер, оценка размеров которого и динамика вылетающих частиц исследовались в [15]. На дне кратера образуется впадина, существующая буквально миллисекунды и засыпаемая обвалом своих же стенок и возвращающимся после взрыва раздробленным веществом, которое по периметру воронки кратера образует *брекчию* [1], скрывающую весь расплав, который позже начинает остывать и затвердевать. После остывания и затвердевания на дне кратера образуется слой импактита — горной породы с весьма необычными геохимическими свойствами (рис. 7). Столкновение, сжатие, дробление и распространение ударной волны занимает доли секунды, формирование самого же кратера длится гораздо дольше. На основе законов подобия можно построить зависимость образовавшегося кратера от размера ударника [68]. В общем случае эта зависимость не является линейной, но принято считать, что размер конечного кратера приблизительно на порядок больше размера ударника. Размер же сплошного покрова выбросов из кратера считают в 2-3 раза больше размера самого кратера. С увеличением расстояния от места столкновения ударные волны затухают и переходят в сейсмические, для оценки амплитуды которых используют формулу для максимальной скорости смещения твердой породы, полученную для подземных ядерных взрывов.

Развитие теории ударного метаморфизма тесно связано как с ударами метеоритов, так и со взрывами. При помощи ядерных взрывов можно воспроизвести ударные явления, соизмеримые по масштабу и мощности с ударами метеоритов [14, 42], по крайней мере для тех, которые создали самые большие известные на Земле кратеры. Математическая модель образования формы воронки при взрыве на поверхности снаряда представлена в [41]. В этой модели область, близкая к расположению взрывного вещества, считается идеальной несжимаемой жидкостью и рассматривается при давлениях, больших некоторого критического значе-

ния, постоянного для каждой определенной среды. Для данного давления вводится значение критической скорости, считающееся постоянным вдоль всей границы воронки. Внутри области скорость больше этого критического значения, а вне области среда неподвижна, так что граница является твердой стенкой.

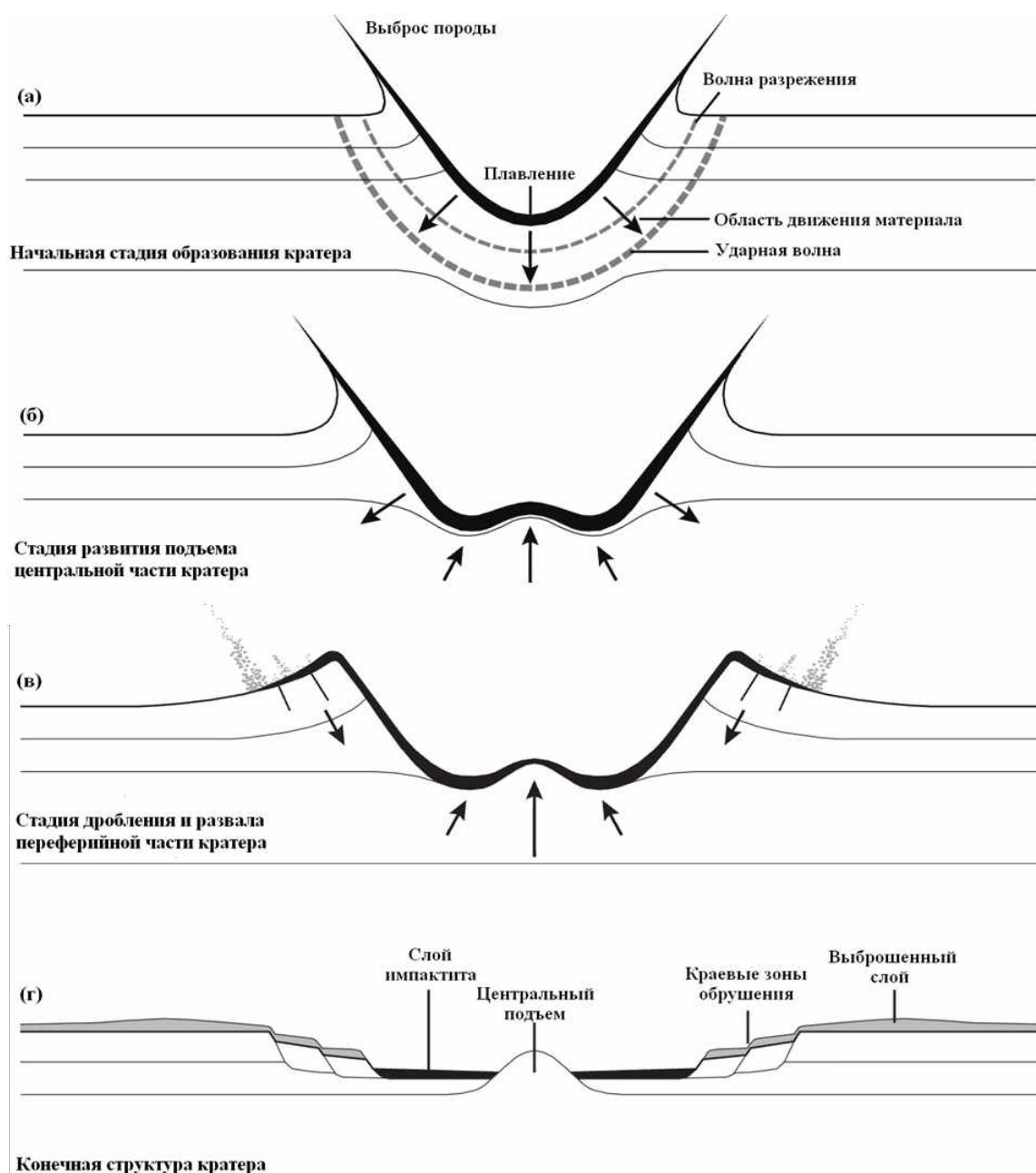


Рис. 6. Стадии образования кратера при падении астероида [73]

Однако механизм ударного кратерообразования имеет ряд существенных отличий от взрывного. Масса и размеры движущегося астероида крайне малы по сравнению с количеством и объемом вещества, приведенного в движение в результате удара. С математической точки зрения, это процесс можно связать с неограниченной кумуляцией энергии в ограниченном пространстве, которая описывается законами теории кумулятивных струй [9, 11, 14], в основе которой лежат явления детонации [12–14], лазерного излучения [12], а также взрыва. Изучение данного явления также связано с теорией сильного точечного взрыва, для которого построен ряд автомодельных решений [13, 21]. Ударное кратерообразование при падении астероида на поверхность планеты со скоростями порядка нескольких десятков или даже со-

тен километров в секунду, может описываться моделью «сосредоточенного удара» [13], которая используется при описании пробивания различных преград. При применении данной теории имеет смысл рассматривать планеты, лишённые атмосферы, например, такие как Луна и достаточно крупные метеориты, поскольку маленькие тела «сгорают» в атмосфере, не достигнув поверхности вследствие трения и разрушения. Модель «сосредоточенного удара» целесообразно применять для ударов только с очень большими скоростями, когда удельная энергия во много раз превышает энергию связи атомов и веществ метеорита и мишени. Тогда можно описать стадию падения, когда ударная волна охватывает массу грунта, значительно превышающую массу астероида, в этом случае вещество в ударной волне ведет себя как плотный газ.

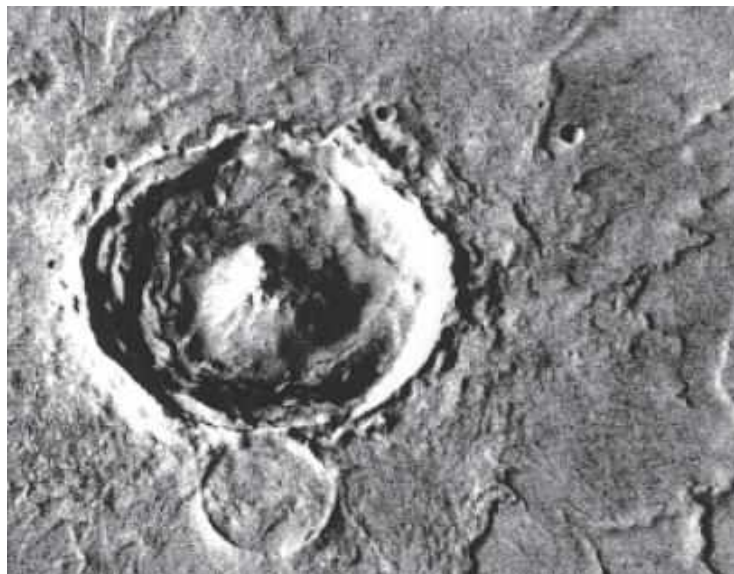


Рис. 7. Кратер «Yuty» на Марсе, диаметр 19 км [73]

Для оценки полной массы грунта, которая испаряется при ударе метеорита, используют закон затухания ударной волны [13, 15]. Согласно этим оценкам, при скорости метеорита ~ 100 км/с испаряется масса грунта в 100 раз превышающая массу метеорита. Теория перераспределения момента импульса при соударении метеоритов представлена в [54]. Теория, позволяющая разработать сценарий бомбардировки потенциально опасных для Земли объектов, основывается на точечном источнике и подтверждается лабораторными экспериментами.

В течение последних десятилетий анализ процесса кратерообразования при ударе астероидов о литосферы планет производился в двух направлениях, описанных ранее. Часть исследований относится к изучению возникновения кратеров в результате химических и ядерных взрывов, а другая часть основывается на механике несжимаемых жидкостей. В большинстве работ образование кратеров сначала рассматривается с теоретических позиций, а затем применительно к конкретному метеоритному кратеру, например, Аризонскому. Это наложило свой отпечаток на создание и использование прикладных пакетов программ для изучения кратерообразования. Программы, используемые при моделировании воздействия астероидов на поверхность планет, основываются на методах вычислительной гидродинамики [43, 48, 84, 85]. Например, в работе [84] при использовании двумерного численного моделирования оценивается, сколько вещества выбрасывается в атмосферу при столкновении астероидов и комет. При моделировании используются различные уравнения состояния для породы ударника и мишени, масса вещества, выброшенного в атмосферу, вычисляется функция времени на различных высотах, однако атмосфера моделируется вакуумом. В рабо-

те [43] показано, что диаметр кратера при гиперзвуковом соударении с Землей, зависит от диаметра и кинетической энергии метеорита, а угол соударения более существенно влияет на выброс вещества на ранней стадии столкновения.

Применяемые в настоящее время для исследований физико-математические модели достаточно адекватно описывают процесс кратерообразования [37, 85, 94, 96, 98], поскольку есть возможность их калибровки с применением результатов экспериментальных исследований [75, 80, 85, 98], учитывающих пористую структуру материалов [44, 45]. Надо отметить, что математическое моделирование кратерообразования достигло достаточно хорошего уровня, и исследователи уже концентрируют внимание на более сложных моделях расчета формы кратеров, учитывающих анизотропную структуру пористой среды, механизмы ее деформации при ударах, а также обвал порового материала [45]. Однако данные модели еще далеки от совершенства, поскольку научные изыскания по ним еще не закончены и большинство из них опирается на эмпирические зависимости, а погрешность в расчетах достигает более 20% [85]. В принципе, это касается и численных методов для моделирования такого класса задач, для чего необходима комбинация «эйлерова» и «лагранжевого» подходов к построению схем, что приводит к определенным ограничениям и сложностям эффективного использования [46].

В практических расчетах кратерообразования наиболее целесообразна модель несжимаемой среды, которая отражает существенные стороны пробивания при очень больших скоростях и позволяет провести необходимые оценки с достаточной полнотой [9]. В рамках данной модели формирование кратера «идентично» для грунта и жидкости. Предлагаемая в настоящей работе модель, основанная на решении полных уравнений Навье-Стокса, представлена далее.

Гидросфера

Исследования в области кратерообразования можно разделить на два направления. Первое из них опирается на теорию взрыва, а второе опирается на механику несжимаемых жидкостей. Применение механики несжимаемой жидкости объясняется тем, что давление, возникающее при взрыве, настолько велико, что прочностными и упругопластическими свойствами среды в большинстве случаев можно пренебречь, также как и силами трения по сравнению с инерционными силами. Более того, если пренебречь сжимаемостью среды, то и получается модель несжимаемой жидкости, в которой можно учесть и силы трения с помощью введения вязкости. Моделирование кратерообразования в рамках данной модели дает достаточно хорошее совпадение с экспериментальными данными [75, 85]. С помощью методов гидродинамики можно описать общее течение явления, впоследствии уточнив его, учитывая уже свойства реальной среды.

По существу, данный факт упрощает построение физико-математической модели падения метеорита в воду, в рамках которой описание формирования водного кратера будет аналогичным, как и для грунта. Однако при падении метеорита в воду наблюдается ряд специфических эффектов, таких как движение метеорита в водной среде, обрушение волн, выброс воды в атмосферу, парообразование и др. [59, 78, 79], для которых потребуются усложнение общей модели. Кроме того, в отличие от твердой поверхности, при ударе тела о поверхность воды значительная его часть (от 25 % до 100 % в зависимости от скорости и угла наклона траектории) остается нерасплавленной. Все эти процессы являются серьезным препятствием для многих методов теоретического анализа.

Помимо волн, образовавшихся непосредственно из-за удара о поверхность, также образуются волны, распространяющиеся из кратера наружу в результате его схлопывания и заполнения водой. Часть процессов, учитываемых в модели падения на твердую поверхность, при падении метеорита в воду можно не рассматривать. К таким процессам можно отнести разброс и дробление метеорита, которые в общем случае не повлияют на формирование общей волновой картины, если конечно фрагменты не являются достаточно крупными.

Самым ярким и наиболее важным для изучения процессом в гидросфере является порождаемая при падении метеорита волна цунами. Кинетическая энергия каменного метеорита диаметром 100 метров, падающего со скоростью 20 км/с., составит около 3×10^{17} Дж, что соответствует энергии очень сильного цунами сейсмического происхождения. Энергия астероида диаметром 1 км будет составлять еще на три порядка больше, что в несколько раз превысит энергию сильнейшего землетрясения XX века².

Оценка кинетической энергии (в мегатоннах тринитротолуолового эквивалента), выделенной в результате столкновения, может быть осуществлена по следующей формуле [121]:

$$E = 6.256 \times 10^{-8} d^3 v^2 D, \quad (1)$$

где d – диаметр астероида, v – скорость астероида относительно Земли, D – плотность астероида. На основании данной формулы в [121] приводятся оценочные таблицы типичных значений кинетической энергии столкновения для короткопериодических и долгопериодических комет различного диаметра.

Метеорит диаметром 5-6 километров, упавший в центр Атлантического океана, сгенерирует волну цунами высотой в несколько сотен метров, способную уничтожить Европу и Северную Америку [24]. По другим оценкам [55], астероид диаметром 1.5 км, столкновение с которым может происходить раз в полмиллиона лет, способен уничтожить существующую цивилизацию.

Астероиды размером большим, чем глубина океана, способны сгенерировать вблизи места удара волны с амплитудой, сравнимой с этой глубиной [68]. Конечно, падение крупного метеорита, способного вызвать волну цунами высотой в сотню метров, представляется маловероятным или даже ничтожным, по крайней мере, для существующей цивилизации, однако прогнозирование данного явления все же представляется актуальным, при том, что они имели место ранее [87, 91] и могут нанести существенный ущерб при возникновении вновь [92]. В работе [87] приводится исторический очерк космогенных цунами, которые возникали в прошлом на нашей планете, при том их географическое проявление (рис. 8) соответствует распределению «импактных» структур (рис. 5), что может свидетельствовать в пользу их локального характера распространения по сравнению с цунами, образованными сейсмическими источниками.

Так же, как и в случае атмосферы и литосферы, исследование возникновения космогенных цунами в общем случае порождает массу проблем, для решения которых построение единой физико-математической модели едва ли представляется возможным. Общая модель должна учитывать процессы гидро-, аэродинамики, механики напряженно-деформированного состояния, динамики многокомпонентных сред, а в более сложном случае и многофазных сред. По этой причине при моделировании космогенных цунами выделяют ряд подзадач, для которых строятся конкретные модели. К наиболее общим из таких задач можно отнести формирование источника, т.е. непосредственно падение метеорита, кратерообразование на дне океана, выброс воды в атмосферу, распространение волны и ряд других.

Для моделирования распространения космогенного цунами наиболее важной стадией является образование и начальная стадия эволюции водного кратера (источника цунами) на поверхности океана. До начала распространения основной волны, на этапе образования кратера можно выделить три стадии – три связанных гидродинамических потока. Первый поток – воздушный, возникающий в результате выталкивания телом газа из полости, созданной падением. Скорость данного потока, существенно связана с потоком водным (второй гидродинамический поток), возникающим при схлопывании стенок полости кратера, который в результате устремляется вверх. Схлопывание стенок водной полости в результате образует узкое горлышко, напоминающее сопло Лаваля (рис. 9, в), скорость истечения воздуха из которого может достигать колоссальных значений.

² Здесь имеется в виду землетрясение 1960 года, произошедшее в Чили.

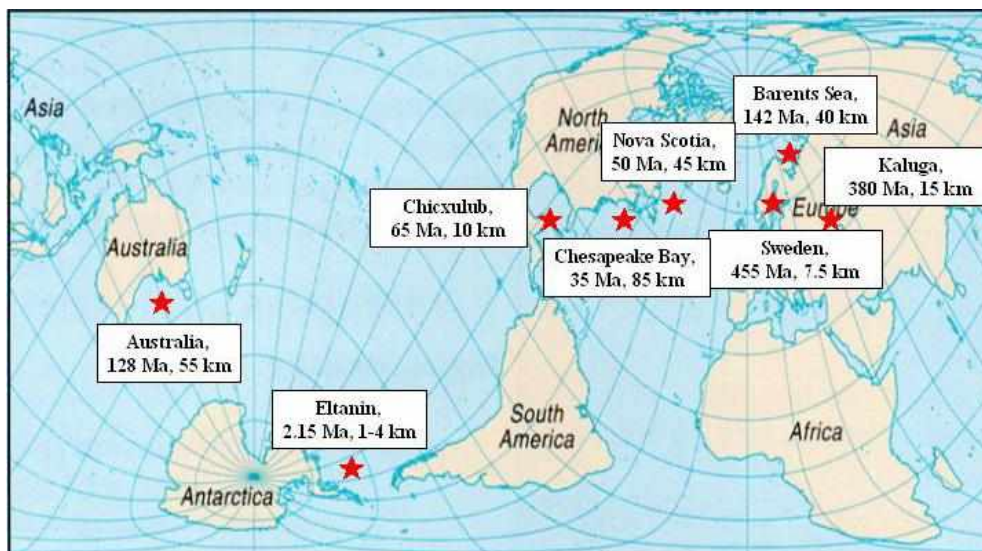


Рис. 8. Места наблюдения исторических «космогенных цунами» ([87])

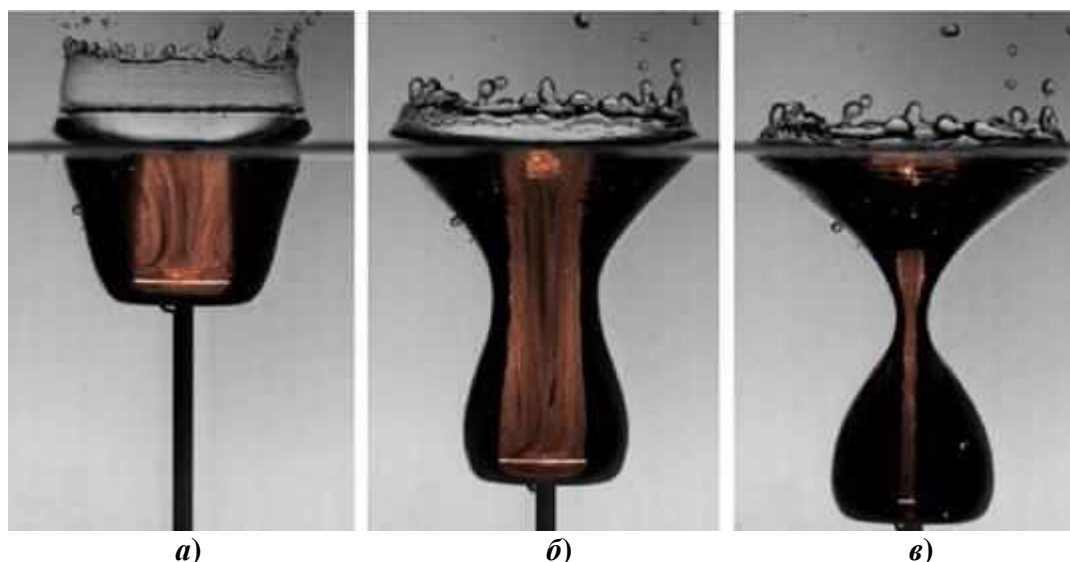


Рис. 9. Стадии образования и схлопывания воздушной полости при падении тела в воду ([86])

Экспериментальные исследования истечения газа из осесимметричной воздушной полости, возникающей при столкновении тела с водой, представлены в [86]. В начале расширяющаяся полость, образованная падением пластинки со скоростью 1 м/с (рис. 9, а), под действием гидростатического давления со стороны жидкости, начинает сужаться (рис. 9, б). Скорость истечения воздуха в опыте, при минимальном диаметре полости образовавшегося «сопла» (рис. 9, в), достигла более чем 300 м/с, что сопоставимо со скоростью звука в воде³. Скорость истечения струи из полости, диаметр которой оценивался с помощью лазера, определялась по скорости микроскопических капель глицерина, за которыми следила камера, производящая 15 тысяч кадров секунду.

Из процесса схлопывания воздушной полости также можно выделить две стадии, которые в итоге и сформируют общую картину на поверхности воды. На первой стадии, после окончательного схлопывания «сопла», на поверхности воды образуется конусообразная каверна (рис. 10, а). Дальнейшая её трансформация за счет гидростатического давления и пото-

³ Пока можно только представить какая скорость этой воздушной струи будет при падении тела в воду со средней скоростью 20 км/с.

ка воздуха, успевшего высвободиться из газового пузыря в виде ударной волны, приведет к возникновению всплеска на поверхности («султана») (рис. 10, б). Вторая стадия представляет собой образование газового пузыря грушевидной формы (рис. 9, в) в котором движется тело. При опускании на дно в пузыре будет происходить нарастание скоростей, его диаметр быстро начнет увеличиваться до определенного предела, а давление падать. Прорыв пузыря может произойти либо в процессе погружения тела, либо при достижении дна. Если это произойдет в процессе погружения, то за телом образуется турбулентный вихревой след с развитой кавитацией (третий гидродинамический поток) (рис. 10, б), состоящий из пары крупных вытянутых вихрей (рис. 10, б), вращающихся в разные стороны. Впоследствии тело продолжит движение до полного погружения независимо от пузыря.

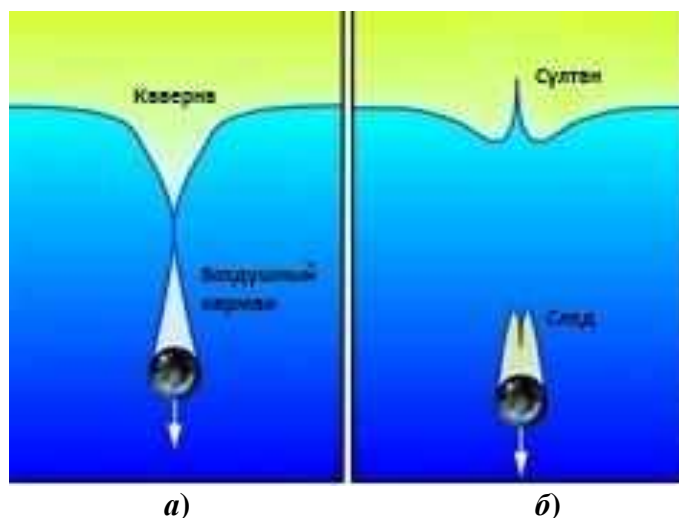


Рис. 10. Завершающие стадии формирования водного кратера:

а – образование «воздушного кармана» в толще воды; *б* – образование следа за телом с формированием «султана» на поверхности

Механизм эволюции самого пузыря в этом случае не очень понятен, но с большой долей вероятности он будет соответствовать описанию схлопывания пузыря в толще воды, представленному в [9]. Согласно этому описанию, пузырь сплющится в нижней своей части, образуя характерную шапку с выемкой выгнутой вверх (рис. 11), что впоследствии приведет к схлопыванию (к схлопыванию, видимо, может привести и процесс отделения пузыря от тела). В момент схлопывания возникнет гидравлический удар, приводящий к струе, имеющей кумулятивный характер и направленной вертикально вверх. Вообще говоря, данная струя также приведет к образованию «султана» на поверхности воды (второго) и по высоте он будет не меньше, чем на стадии трансформации каверны. При этом «вторичных» султанов на поверхности может быть несколько, вследствие разрушения основного пузыря на ряд более мелких (рис. 11) и это справедливо как для маленьких тел большой плотности, так и больших тел малой плотности [120].

Рис. 6, рис. 9 и рис. 10 наглядно демонстрируют различия в процессах кратерообразования в жидкой и твердой средах. В итоге форма водного кратера до начала его трансформации с большой вероятностью будет совпадать с формой аналогичного кратера на твердой поверхности, однако механизм его образования совсем иной. Высоты и формы центральной и периферийной частей будут различаться. В водном кратере эти высоты будут зависеть от размера и формы астероида, его скорости, и, что немаловажно, от процессов, происходящих в толще воды. Все это, несомненно, повлияет на высоту, форму и скорость распространения волны цунами из источника. Естественно, все эти аспекты нужно учитывать при падении тела диаметром много меньшим, чем глубина океана. Если размер тела сопоставим с глубиной океана, то он просто пробьет толщу воды до дна и процесс обрушения образовавшейся поло-

сти, будет соответствовать процессу трансформации конусообразной каверны на поверхности, описанному в [89, 93–97].

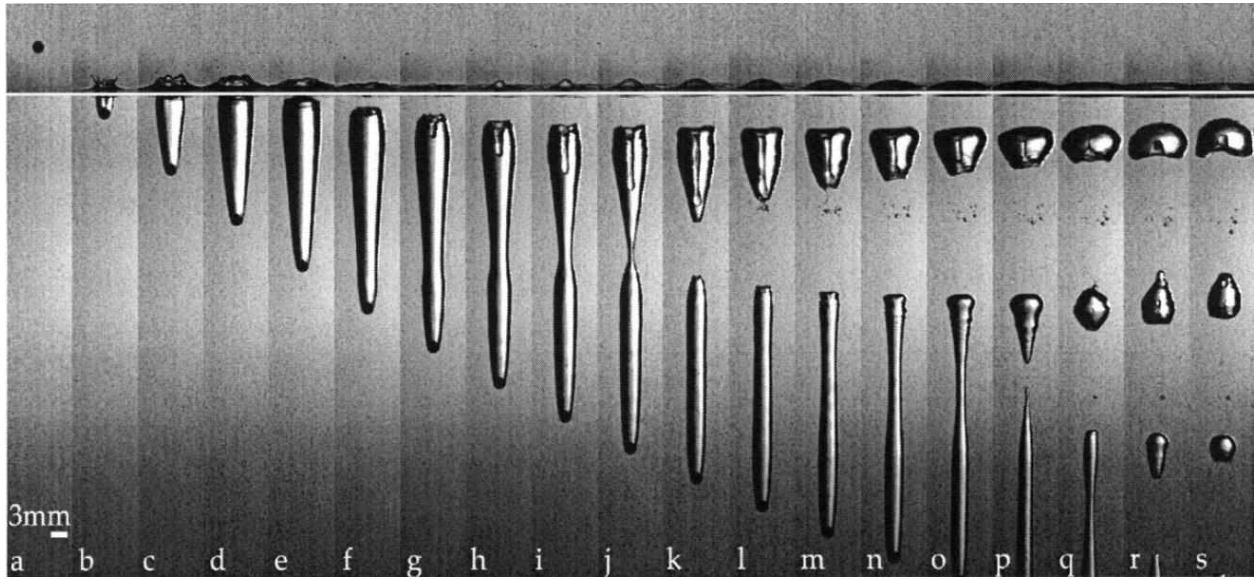


Рис. 11. Картина падения тела малого диаметра и большой плотности в глубокий бассейн [120]

При падении в глубоководный район океана волна цунами, как показывают расчеты [94, 96], будет сформирована в результате схлопывания промежуточного водного кратера. При диаметре астероида менее 0.5 км водный кратер не достигнет дна океана. В случае достижения дна астероидом, при достаточном его размере и скорости, образование донной структуры может сопровождаться перемещением периферийной его части и структурного подъема дна в процессе роста кратера, что также может сгенерировать волну цунами. Такой процесс наблюдался при образовании кратера Мьолнир диаметром сорок километров в Баренцевом море [96]. Этот кратер был образован 140 миллионов лет назад при падении астероида диаметром 1–3 км в море глубиной 300–500 метров.

Оценка достижения дна астероидом и возможное образование донного кратера приводится в [96]. Для определения влияния толщи воды на процесс кратерообразования на дне, вводится параметр d/H (d – диаметр астероида, H – глубина моря). При $0.1 < d/H < 1$ толщина океана существенно влияет на этот процесс, размеры и морфологию кратера, при $d/H < 0.1$ кратер не образуется вообще, а при $d > H$ слой воды не влияет на ход процесса кратерообразования. Если диаметр астероида в четыре раза больше, чем глубина океана, он достигает дна без особых разрушений и торможения [96].

Первая волна цунами начнет распространяться уже с начальной стадии падения тела – промежуточного водного кратера (рис. 9, *a*). Именно такую форму источника в качестве начального возмущения, используют во многих работах по моделированию распространения космогенного цунами [78, 87, 88, 90, 91]. В этих работах стадия падения и погружения астероида не рассматривается, а форма каверны на поверхности задается с помощью аналитических формул.

Согласно [98], аналитическая формула для мгновенно сформированного падением астероида каверны $u^{imp}(r_0)$ приведет к вертикальному смещению водной поверхности в источнике цунами, которое представляется в виде:

$$u^{surf}(r, t) = \frac{1}{4\pi^2} \operatorname{Re} \left(\int_k e^{i(kr - \omega(k)t)} dk \int_{r_0} u^{imp}(r_0) e^{-ikr_0} dr_0 \right), \quad (2)$$

$$\omega(k) = kc(k) = k\sqrt{gh} \sqrt{\operatorname{th}(kh) / kh},$$

где $r = |\mathbf{r}|$ – радиус-вектор точки, $k = |\mathbf{k}|$ – волновое число, $\omega(k)$ – частота, $c(k)$ – фазовая скорость волны цунами, h – глубина океана (постоянная), Re – означает действительную часть и $u^{imp}(\mathbf{r}_0) \neq 0$. Используя тождество

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^{ik(r-r_0)} d\theta = J_0(kR) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(kr)J_n(kr_0)e^{in(\theta-\theta_0)} \quad (3)$$

выражение приводится (2) к виду:

$$u^{surf}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \text{Re} \left(\int_0^{\infty} k e^{-i\omega(k)t} dk \int_{r_0} u^{imp}(\mathbf{r}_0) J_0(kR) dr_0 \right), \quad (4)$$

или

$$u^{surf}(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{2\pi} \text{Re} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \left(\int_0^{\infty} k J_n(kr) e^{-i(\omega(k)t - n\theta)} dk \int_{r_0} u^{imp}(\mathbf{r}_0) J_n(kr_0) e^{-in\theta_0} dr_0 \right), \quad (5)$$

здесь $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}_0|$, $J_n(x)$ – цилиндрическая функция Бесселя.

Предполагают, что на начальной стадии кратерообразования метеорит создает радиально симметричную полость, которая может быть описана функцией [60, 98]:

$$\begin{aligned} u^{imp}(\mathbf{r}) &= D_C (1 - r^2 / R_C^2), & r \leq R_D, \\ u^{imp}(\mathbf{r}) &= 0, & r > R_D, \end{aligned} \quad (6)$$

где D_C – глубина каверны, R_C и R_D – внутренний и внешний радиусы каверны соответственно.

В случае равенства внутреннего и внешнего радиусов каверны $R_C = R_D$ поверхность представляет собой впадину (рис. 12, а), что соответствует выбросу воды в атмосферу или её испарению [60].

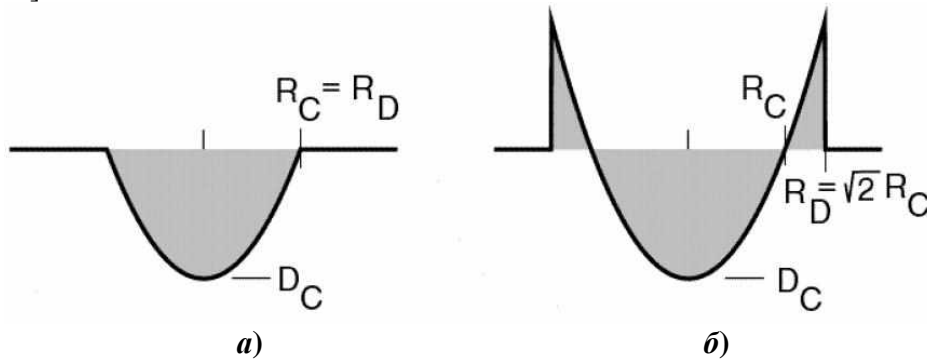


Рис. 12. Начальное возмущение водной поверхности [90]

В случае $R_D = \sqrt{2}R_C$ вода, выброшенная из каверны, формирует внешний всплеск – кольцевую структуру, характерную при падении объекта в воду, объем которой в точности соответствует объему воды, выброшенному из каверны.

На основе оценки потенциальной энергии начального возмущения в [98] выводятся простые аналитические формулы для вычисления радиуса и глубины каверны:

$$D_C = \sqrt{\frac{2\varepsilon \rho_I R_I^3 V_I^2}{\rho_w g R_C^2}}, \quad R_C = R_I \left(2\varepsilon \frac{V_I^2}{g R_I} \right)^\delta \left(\frac{\rho_I}{\rho_w} \right)^{1/3} \left(\left(\frac{\rho_w}{\rho_I} \right)^{1/3 - \delta} \left(\frac{1}{q R_I^{\alpha-1}} \right)^{2\delta} \right), \quad (7)$$

где ρ_w – плотность воды, g – ускорение силы тяжести, ε – доля кинетической энергии метеорита, переходящая в энергию цунами, ρ_I, R_I, V_I – плотность, радиус и скорость метеорита, q и α – коэффициенты, связанные со свойствами метеорита и водного слоя.

Стадия образования начального возмущения на водной поверхности в исследованиях, связанных с цунами, является самой проблематичной и построение адекватной модели является задачей весьма нетривиальной в силу сложности решения исходных уравнений с одной стороны и отсутствия экспериментальных данных с другой. В проводимых в настоящее время экспериментах, как правило, оцениваются только внутренние геометрические размеры образованной каверны⁴. Такие эксперименты, в большинстве своем, относятся к пробиванию преград и взаимодействия тел на различных скоростях. Они входят в число приоритетных научных исследований многих научных центров и университетов. К сожалению, многие полученные результаты публикуются в труднодоступных изданиях (отчетах), так как выполняются по заказу промышленных корпораций, а доступные данные посвящены исследованию отдельных, порой обособленных друг от друга процессов.

Экспериментальные исследования образования каверны на поверхности воды при падении тела с гиперзвуковой скоростью описаны в [85]. В эксперименте, проведенном в лаборатории корпорации «Боинг», оценивались радиус и глубина каверны, образованная ударом о жидкость стеклянного шарика диаметром 2 миллиметра, движущегося со скоростью 4.64 км/с. В этом достаточно сложном эксперименте использовалась высокоскоростная центрифуга для создания поля тяжести порядка несколько сотен G , чтобы иметь возможность во столько же раз уменьшить линейные размеры экспериментальной области по сравнению с реальными размерами. Данные исследования использовались для калибровки численных методик, используемых для моделирования образования кратера. Форма кратера, полученная численно при использовании различных численных моделей, соответствует каверне, представленной на рис. 12, б, однако экспериментальные данные представлены только для полости, представленной на рис. 12, а. Использование этих экспериментов полезно на стадии калибровки численных моделей, для объяснения же механизма образования земных кратеров применение этих данных некорректно, поскольку здесь исследуются прочностные кратера малого диаметра, морфология которых отличается от крупных гравитационных кратеров [96]. Интересно отметить, что при использовании численной модели, учитывающей свойства атмосферы, результаты калибровки существенно отличаются от тех, в которых атмосфера не учитывается, при этом не в лучшую сторону.

В большинстве работ, в которых исследуется космогенное цунами, используется источник начального возмущения, полученный численным моделированием [89, 93–97]. Численные результаты, полученные с применением сложных нелинейных моделей, вполне согласуются с параметризацией вида (6). Форма самого кратера описывается вполне приемлемо (рис. 13), рассогласование наблюдается при описании внешней кольцевой структуры (рис. 13, а), состоящей из коротковолновых компонентов, которые из-за дисперсии и диссипации не повлияют на волновую картину вдали от источника [60].

Процесс падения астероида в океан сопровождается тремя стадиями, которые могут привести к формированию волны цунами – схлопывание промежуточного водного кратера, схлопывание подводного пузыря, порождающего кумулятивную струю, и процесс образования донного кратера. Сформированная волна цунами, согласно расчетам, может достигать высоты несколько сотен метров и даже нескольких километров [78, 87, 93–97]. При численном моделировании формирования подводной структуры «Элтанин⁵» [94, 96], амплитуда волны цунами достигает более километра непосредственно в месте столкновения, 300 метров на расстоянии 70 км от точки удара и около 10 м вблизи побережья Южной Америки. Для моделирования распространения цунами используется бассейн постоянной глубины. Анализ численных расчетов наклонного падения астероида (15° к горизонту) показывает, что волны цунами являются изотропными.

⁴ Или точнее сказать публикуются.

⁵ Глубоководная структура «Элтанин» образовалась в результате падения астероида в район океана глубиной около пяти километров. Ударное происхождение объясняется присутствием иридиевой аномалии, обнаруженной в донных отложениях и нерасплавленными фрагментами тела размером до 2 см.

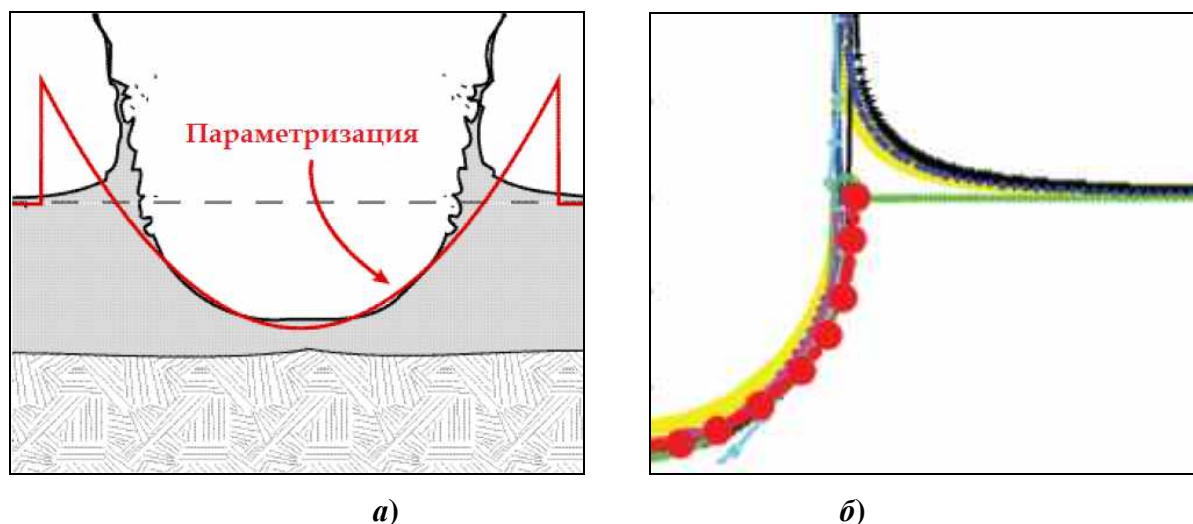


Рис. 13. Сопоставление результатов численного моделирования и параметризованной модели (а) (формула (6)) [98] и сопоставление численных результатов с экспериментальными данными (красная линия) (б) [85]

К настоящему времени не зарегистрировано ни одного космогенного цунами, что не позволяет сопоставить результаты моделирования с натурными данными. Высоты сгенерированных волн, полученные численно, могут быть оценены с помощью эмпирической формулы, выведенной на основании экспериментальных данных, полученных в ходе проведения подводных взрывов [94]:

$$H = 45HY^{0.25}/L, \quad (8)$$

где h – высота волны, H – глубина океана, L – расстояние от источника, Y – энергия столкновения в тротиловом эквиваленте. Оценка высот волны цунами на разных расстояниях от источника при моделировании формирования подводной структуры «Элтанин» дает хорошее совпадение с данными, полученными по формуле (7) [94, 96]. Однако эта формула дает адекватное совпадение только в случае генерации волны цунами в результате схлопывания промежуточного водного кратера. Если волна цунами генерируется еще и подвижками дна, происходящими в результате кратерообразования, то данная формула дает большую погрешность (до нескольких раз).

В [121] приводится таблица высот волн космогенного цунами в зависимости от размера астероида, основанной на формуле, выведенной в Лос-Аламосской Национальной лаборатории для оценки высот цунами на расстоянии 1000 км от точки столкновения:

$$H = 1.0081 \times 10^{-5} (d^3 v^2 D)^{0.54}, \quad (9)$$

где d – диаметр астероида, v – скорость астероида относительно Земли, D – плотность астероида.

Калибровка численных методик, предназначенных для моделирования распространения космогенных цунами, может быть проведена и на некоторых доступных экспериментальных данных. В работе [100] экспериментально исследовались гравитационные волны при свободном падении тела на мелкую воду. При этом опыты проводились так, чтобы как можно сильнее проявились эффекты, связанные с конечной глубиной жидкости. Отклонения свободной поверхности регистрировались волномерами, работающими на принципе различимости электрической проводимости воды и воздуха. В приведенных результатах эксперимента обращает на себя внимание тот факт, что при вертикальном падении кубического тела помимо выброса вертикальной струи из основной массы жидкости выбрасывается еще и горизонтальная струя. В работе также оценивается доля энергии начального возмущения, уносимая на большие расстояния. Показано, насколько сложно чисто теоретически описать гравитационные волны, располагая только данными об энергии падающего тела, если она до-

статочно велика, а в случае падения небесного тела она будет очень велика. Еще один вывод из этих экспериментов говорит о том, что при всей сложности процессов вблизи тела многообразии гравитационных волн на больших расстояниях невелико, т.е. при распространении волн от падения тел с неизвестной массой и скоростью можно исходить из того, что наибольшую опасность представляют уединенные волны предельной амплитуды. В связи с этим становится важным вопрос о возможном числе уединенных волн при падении астероида в океан. В представленном опыте больше двух следующих друг за другом уединенных волн получить не удалось, хотя в опыте со смещением участка дна бассейна уединенных волн наблюдалось большое количество.

Падение астероида в океан генерирует волну, отличающуюся от волны, порождаемой подводным землетрясением. Волны цунами сейсмического происхождения являются очень длинными, их длина намного превышает глубину океана, они распространяются с очень малой потерей энергии на большие расстояния со скоростью $c = \sqrt{gh}$. В проведенных вычислениях [89] скорость волн, сгенерированных в результате падения астероида, значительно меньше, чем \sqrt{gh} , а длина в два раза меньше, чем диаметр промежуточного водного кратера. Для формирования источника когерентных волн (такие волны могут распространяться на большие расстояния без существенных потерь энергии) размер промежуточного водного кратера должен быть в 3-5 раз больше, чем глубина океана, т.е. для океана глубиной 4 км водный кратер должен иметь диаметр 20 км. На основе эмпирической оценки диаметр астероида должен составлять 1 км [4].

Численные методы для моделирования распространения цунами сейсмического происхождения опираются на теорию мелкой воды [87], в рамках которой давление является строго гидростатическим и не учитываются дисперсионные свойства волн. Кроме того, в задачах с большими расчетными областями и сложной структурой дна неизбежно будут возникать области, в которых приближение мелкой воды, строго говоря, неприменимо из-за трехмерного характера течения [113].

В работе [93] отмечается, что процесс распространения космогенных цунами при моделировании образования кратера Мьолнир в рамках этого приближения описывается неадекватно. При падении астероидов образуются высокие и умеренно длинные волны, распространяющиеся под влиянием нелинейности и дисперсии. Сгенерированная падением астероида волна может иметь амплитуду в несколько километров, значительно превышающую глубину океана, а ее обрушение может сгенерировать цуг волн высотой, сопоставимой с этой глубиной. Такие волны, являющиеся сильно нелинейными, обрушиваются в открытом океане на участках постоянной глубины при достижении некоторой критической скорости распространения, формируя пакеты волн меньшей длины. Эффекты нелинейности при распространении таких волн на большие расстояния трудновычислимы и они могут быть очень опасны для ближайшего побережья. В связи с этим также интересен вопрос о том, какая часть энергии волны и в какой форме сохраняется после обрушения в открытом океане.

Для описания такого процесса необходимо использовать полную систему уравнений Навье-Стокса. Однако численное интегрирование системы уравнений Навье-Стокса является весьма сложной и трудозатратной задачей. В настоящее время космогенные цунами моделируют с помощью уравнений Эйлера [89], уравнений Буссинеска [81, 93], используют полуэмпирические модели [90, 92, 98], а также уравнений мелкой воды, учитывающие донное трение [91]. В этих расчетах, как правило, глубину океана считают постоянной, не учитывают атмосферу и вязкость воды.

Различные подходы к моделированию космогенного цунами рассматриваются в [88]. Здесь анализируются модели образования источника, возможность применения линейной теории и теории мелкой воды для распространения волн, а также сравнительный анализ результатов моделирования космогенных цунами, ранее полученных другими авторами, который зачастую показывает существенные различия в некоторых оценках.

Стратегия численного моделирования космогенного цунами, включая все стадии от образования начального возмущения на поверхности до заплеска на сушу, представлена в [95]. В этих расчетах глубина океана также предполагалась постоянной, а заплеск вычислялся для модельного шельфа с определенным углом наклона. В представленной стратегии образование начальной волны, распространение и заплеск считались по разным программам. Сгенерированный источник волны цунами передавался в качестве граничного условия в программу расчета её распространения, после чего по специальной программе вычислялся заплеск. Воздействие космогенного цунами на побережье Черного моря анализируется в работе [88]. Здесь в качестве источника использовалась аналитическая формула, а распространение моделировалось с помощью двумерных гиперболических неконсервативных уравнений, выведенных на основании теории мелкой воды. В расчетах использовалась реальная батиметрия бассейна Черного моря.

Одновременное моделирование стадии начального возмущения и распространения волны цунами на примере известных исторических подводных образований рассматривается в [94, 96, 97]. Здесь используются уравнения Эйлера, а глубина океана считается постоянной. В этих работах большее внимание уделяется именно кратерообразованию на дне океана, а не волнам цунами. Подчеркивается существенное влияние глубины океана на процессы, происходящие при падении астероида.

Моделирование распространения космогенных цунами и их возможное воздействие, включая оценку экономического ущерба, на побережье Тихого океана проводилось в [55, 101]. Здесь источник задавался в виде аналитической формулы. По проведенным расчетам получается, что максимальная высота цунами на Японском побережье составит более 60 метров. Возможные последствия для Европы и Америки от падения астероида диаметром пять километров в середину Атлантического океана обсуждаются в [24, 101]. По данному прогнозу цунами наводнят две трети верхней части Восточных Соединенных Штатов Америки до предгорий Аппалач. В Европе самое сильное воздействие придется на Португалию.

Современный обзор по тематике образования космогенных цунами содержится в [60, 68, 81, 83, 87–89]. В этих работах приведены ссылки на большую часть наиболее значимых публикаций, выполненных по этой теме за последние двадцать пять лет. Анализ публикаций показывает, что построение моделей и прогнозирование воздействия космогенных цунами может основываться только на данных численных расчетов. Много, особенно это касается источника, в этой области еще только предстоит исследовать. Численное моделирование данного явления пока еще осуществляется только в двумерном виде и на основе упрощенных моделей, что также не учитывает некоторые реальные эффекты при генерации и распространении. Работы по распространению в реальных акваториях моделировались только с источником, задаваемом в аналитическом виде, а все исторические «импакты», способные сгенерировать волну цунами, не учитывали реальную батиметрию дна и были больше нацелены на моделирование кратерообразования, нежели на анализ космогенных цунами.

Полноценное описание воздействия астероида на поверхность океана возможно только при использовании полномасштабной физико-математической модели, учитывающей, в том числе, многофазные течения. При изучении космогенных цунами на первом этапе межфазовым взаимодействием атмосферы и океана можно пренебречь, ограничившись лишь учетом плотности и давления. Для генерации источника космогенного цунами необходимо решать полную систему уравнений Навье-Стокса с учетом свободной поверхности.

Заключение

В данной работе кратко представлено актуальное состояние в области астероидно-кометной опасности, основные ссылки и ресурсы, необходимые для более углубленного изучения данной проблематики. Представлено описание взаимодействия небесного тела с атмосферой, литосферой и гидросферой и проведен анализ существующих работ в данных обла-

стях, кратко сформулированы не до конца изученные проблемы. Описан механизм кратерообразования в литосфере и гидросфере, а также возможный механизм образования космогенного цунами.

Данная работа выполнена в рамках выполнения базовой части государственного задания № 2014/133.

Библиографический список

1. **Хрянина, Л.П.** Метеоритные кратеры на Земле / Л.П. Хрянина. – М.: «Недра», 1987.
2. Сайт компании Minor Planet Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.minorplanetcenter.net/>. – 08.07.13.
3. Сайт компании NASA Ames Research Center. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://impact.arc.nasa.gov/>. – 08.07.13.
4. **Paine, M.P.** Asteroid Impacts: The Extra Hazard due to tsunamis // Science of Tsunami Hazards. 1999. V. 17. No. 3. P. 155 – 166.
5. Взрывные кратеры на Земле и планетах: сборник статей. – М.: Мир, 1968.
6. **Кукал, З.** Природные катастрофы / З. Кукал. – М.: Знание, 1985.
7. **Benest, D., Froeschle, C.** Impacts on Earth. – Springer, 1998. 233 p.
8. **Nardo, D.** Comets and Asteroids. – Lucent Books, The Lucent Library of Science and Technology, 2004. 113 p.
9. **Лаврентьев, М.А.** Проблемы гидродинамики и их математические модели / М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. – М.: Наука, 1973. – 473 с.
10. **Забабахин, Е.И.** Некоторые вопросы газодинамики взрыва / Е.И. Забабахин. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1997. – 207 с.
11. **Забабахин, Е.И.** Кумуляция и неустойчивость: сборник научных статей / Е.И. Забабахин. – Снежинск: РФЯЦ-ВНИИТФ, 1998. – 112 с.
12. **Селиванов, В.В.** Ударные и денотационные волны. Методы исследования / В.В. Селиванов, В.С. Соловьев, Н.Н. Сысоев. – М.: МГУ, 1990. – 256 с.
13. **Зельдович, Я.Б.** Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений / Я.Б. Зельдович, Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1966. – 688 с.
14. **Покровский, Г.И.** Взрыв / Г.И. Покровский. – М.: Недра, 1980. – 190 с.
15. Вторая конференция по кометной и метеоритной астрономии, Астрон. журн. XIV, № 3, 249 (1937); К.П. Станюкович, В.В. Федьинский, ДАН СССР 57, № 2 (1947); К.П. Станюкович, Метеоритика, № 7 (1950); Искусственные спутники Земли, № 4, 86 (1960).
16. **Кринов, Е.Л.** Основы метеоритики / Е.Л. Кринов. – М.: Государственное издательство технико-технической литературы, 1955. – 391 с.
17. **Астапович, И.С.** Метеорные явления в атмосфере Земли / И.С. Астапович. – М.: Физматгиз, 1958. – 640 с.
18. **Glikson, A.Y.** Large (>100 km Diameter) Impact Structures // The Asteroid Impact Connection of Planetary Evolution Springer Briefs in Earth Sciences. 2013. P. 91–100.
19. **Krinov, E.L.** Giant meteorites. – NY.: Pergamon Press, 1966. – 397 p.
20. **Коробейников, В.П.** Тунгусский феномен: газодинамическое моделирование / В.П. Коробейников, П.И. Чушкин, Л.В. Шуршалов // Следы космических воздействий на Землю: сб. науч. трудов. – Новосибирск: Наука, Сибирское отделение, 1990.
21. **Бронштейн, В.А.** Физика метеорных явлений / В.А. Бронштейн. – М.: Наука, 1981. – 416 с.
22. **Головизин, В.П.** Несимметричное взаимодействие летящего со сверхзвуковой скоростью тела с взрывными и ударными волнам / В.П. Головизин, И.В. Красовская // Журнал технической физики. 1999. Т. 69. Вып. 5. С. 15 – 19.
23. **Барри, Н.Г.** Испарение и разрушение метеорного тела в атмосфере. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы» // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dissertCat.com/>. – 30.07.13.
24. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from comet-asteroid impacts with earth // Physica D. 1999. V. 133. P. 189 – 198.
25. **Стулов, В.П.** Аэродинамика болидов / В.П. Стулов, В.Н. Мирский, А.И. Вислый. – М.: Наука. Физматлит, 1995. – 240 с.

26. **Chyba, C.F., Thomas, P.J., Zahnle, K.J.** The 1908 Tunguska explosion: Atmospheric disruption of a stony asteroid // *Nature*. 1993. V. 361. P. 40–44.
27. **Melosh, H.J.** Atmospheric breakup of terrestrial impactors // In *Multiring basins*, edited by Schultz P. H. and Merrill R. B. – NY.: Pergamon Press, 1981. P. 29–35.
28. **Passey, Q., Melosh, H.J.** The effects of atmospheric breakup on crater field formation // *Icarus*. 1980. V. 42. P. 211 – 233.
29. **Ivanov, B.A., Deniem, D., Neukum, G.** Implementation of dynamic strength models into 2D hydrocodes: Applications for atmospheric breakup and impact cratering // *International Journal of Impact Engineering*. 1997. V. 20. P. 411 – 430.
30. **Svetsov, V.V., Nemtchinov, I.V., Teterev, A.V.** Disintegration of large meteoroids in the Earth's atmosphere: Theoretical models // *Icarus*. 1995. V. 116. P. 131 – 153.
31. **Korycansky, D.G., Zahnle, K.J.** Atmospheric impacts, fragmentation, and small craters on Venus // *Icarus*. 2004. V. 169. P. 287 – 299.
32. **Bland, P.A., Artemieva, N.A.** Efficient disruption of small asteroids by the Earth's atmosphere // *Nature*. 2003. V. 424. P. 288–291.
33. **Григорян, С.С.** О движении и разрушении метеоритов в атмосферах планет // *Космич. исслед.* 1979. V. 17. № 6. С. 875 – 893.
34. **Фадеев, Ю.И.** Разрушение метеорных тел в атмосфере // *Физика горения и взрыва*. 1967. № 2. С. 276 – 289.
35. **Клумов, Б.А.** Моделирование долговременных последствий столкновения кометы Шумейкеров-Леви 9 с Юпитером / Б.А. Клумов, В.И. Кондауров, А.В. Конюхов [и др.] // *Докл. РАН*. 1994. Т. 337. № 2. С. 28–35.
36. **Korycansky, D.G., Zahnle, K.J.** High-resolution simulations of the impacts of asteroids into the Venusian atmosphere III: Further 3D models // *Icarus*. 2003. V. 161. P. 244–261.
37. **Roddy, D.J., Schuster, S.H., Rosenblatt, M., Grant, L.B., Hassig, P.J., Kreyenhagen, K.N.** Computer simulations of large asteroid impacts into oceanic and continental sites--preliminary results on atmospheric, cratering and ejecta dynamics // *International Journal of Impact Engineering*. 1987. V. 5. Iss. 1–4. P. 525–541.
38. **Shuvalov, V.V., Artemieva, N.A.** Numerical modeling of Tunguska-like impacts // *Planetary and Space Science*. 2002. V. 50. No. 2. P. 181–192.
39. **Тирский, Г.А.** Взаимодействие космических тел с атмосферами земли и планет // *Соросовский образовательный журнал*. 2000. Т. 6. № 5. С. 76–82.
40. **Collins, G.S., Melosh, H.J., Marcus, R.A.** Earth Impact Effects Program: A Web-based computer program for calculating the regional environmental consequences of a meteoroid impact on Earth // *Meteoritics & Planetary Science*. 2005. V. 40. № 6. P. 817 – 840.
41. **Кузнецов, В.М.** О форме воронки выброса при взрыве на поверхности грунта // *ПМТФ*. 1960. № 3. С. 152– 56.
42. Действие ядерного оружия. – М.: Военное издательство МО СССР, 1965.
43. **Saito, T., Kaiho, K., Abe, A., Katayama, M., Takayama, K.** Numerical simulations of hypervelocity impact of asteroid/comet on the Earth // *International Journal of Impact Engineering*. 2006. V. 33. P. 713–722.
44. **Housen, K.R., Holsapple, K.A.** Impact cratering on porous asteroids // *Icarus*. 2003. V. 163. P. 102 – 119.
45. **Wünnemann, K., Collins, G.S., Melosh, H.J.** A strain-based porosity model for use in hydrocode simulations of impacts and implications for transient crater growth in porous targets // *Icarus*. 2006. V. 180. Iss. 2. P. 514 – 527.
46. **de Niem, D. Kührt, E., Motschmann, U.** A volume-of-fluid method for simulation of compressible axisymmetric multi-material flow // *Computer Physics Communications*. 2007. V. 176. Iss. 3. P. 170 – 190.
47. **Chapman, C.R.** The hazard of near-Earth asteroid impacts on earth // *Earth and Planetary Science Letters*. 2004. V. 222. P. 1 – 15.
48. **O'Brien D.P., Greenberg R., Richardson J.E.** Craters on asteroids: Reconciling diverse impact records with a common impacting population // *Icarus*. 2006. V. 183. P. 79 – 92.
49. **Wetherill, G.W.** Steady state populations of Apollo-Amor objects // *Icarus*. 1979. V. 37. P. 96–112.
50. **Wetherill, G.W.** Where do the Apollo objects come from? // *Icarus*. 1988. V. 76. P. 1 – 18.

51. **Hills, J.G., Goda, M.P.** fragmentation of small asteroids in the atmosphere // *Astron. J.* 1993. V. 105. No. 3 P. 1114 – 1144.
52. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from the impact of small asteroids // *Planet. Space Sci.* 1998. V. 46. No. 2–3. P. 219 – 229.
53. **Korycansky, D.G., Asphaug, E.** Impact evolution of asteroid shapes 1. Random mass redistribution // *Icarus.* 2003. V. 163. P. 374 – 388.
54. **Holsapple, K.A., Housen, K.R.** Momentum transfer in asteroid impacts. I. Theory and scaling // *Icarus.* 2012. V. 221. P. 875 – 887.
55. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean – II // *Earth, Moon and Planets.* 1997–1998. V. 76. P. 117 – 121.
56. Earth Impact Database // [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.passc.net/EarthImpactDatabase/> – 11.11.13.
57. **Simonov, I.V.** The feasibility of using large impact to destroy a dangerous asteroid // *International Journal of Impact Engineering.* 2002. V. 27. P. 293 – 315.
58. **Hills, J.G., Goda, M.P.** Damage from the impacts of small asteroids // *Planetary and Space Science.* 1998. V. 46. Iss. 2–3. P. 219 – 229.
59. **Pierazzo, E., Garcia, R.R., Kinnison, D.E., Marsh, D.R., Lee-Taylor, J., Crutzen, P.J.** Ozone perturbation from medium-size asteroid impacts in the ocean // *Earth and Planetary Science Letters.* 1999. V. 299. Iss. 3–4. P. 263–272.
60. **Левин, Б.В.,** Физика цунами и родственных явлений в океане / Б.В. Левин, М.А. Носов. – М.: «Янус-К», 2005. 360 с.
61. LONEOS (Lowell Observatory Near-Earth Object Search)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://asteroid.lowell.edu/asteroid/loneos/loneos.html>.
62. Near-Earth Asteroid Tracking (NEAT)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://neat.jpl.nasa.gov/>
63. Planetary Society. Projects on Near Earth Objects.// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://planetary.org>.
64. Asteroid and Comet Impact Hazards (NASA Ames Research Center)// [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://impact.arc.nasa.gov/>
65. Near-Earth Object Program (NASA, JPL) // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://neo.jpl.nasa.gov/>.
66. ICARUS International Journal of Solar System Studies // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://icarus.cornell.edu/>
67. Экспертная рабочая группа по космическим угрозам // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: http://www.inasan.ru/rus/asteroid_hazard.
68. Астероидно-кометная опасность: вчера, сегодня, завтра / Под ред. Б.М. Шустова, Л.В. Рыхловой. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. 384 с.
69. Институт астрономии РАН // [Электронный ресурс]. - Режим доступа: <http://www.inasan.rssi.ru>
70. **Chapman, C.R., Morrison, D.** *Cosmic Catastrophes.* – NY.: Plenum Press, 1989. 302 p.
71. Альбом течений жидкости и газа. – М.: Мир, 1986.
72. **Мак-Кинли, Д.** Методы метеорной астрономии / Д. Мак-Кинли. – М.: Мир, 1964. – 375 с.
73. **French, В.М.** Trace of Catastrophe: A Handbook of Shock-Metamorphic Effects in Terrestrial Meteorite Impact Structures. LPI Contribution No. 954. – Houston: Lunar and Planetary Institute, 1998. 120 p.
74. **Кашеев, Б.Л.** Метеорные явления в атмосфере Земли. Исследование метеоров № 2 / Б.Л. Кашеев, В.Н. Лебединец, М.Ф. Лагутин. – М.: Мир, 1967. – 260 с.
75. **Кузнецов, В.Н.** Экспериментальное исследование направленного взрыва в грунте / В.Н. Кузнецов, Е.Н. Шер // ПТМФ. 1962. № 3. С. 53–58.
76. Методы ускорения газодинамических расчетов на неструктурированных сетках / К.Н. Волков [и др.]. – М.: Физматлит, 2013. – 536 с.
77. **Morrison, D.** Defending the Earth Against Asteroids: the Case for a Global Response Science and Global Security. 2005. V. 13. P. 87 – 103.
78. **Schuiling, R.D., Cathcart, R.B., Badescu, V., Isvoranu, D., Pelinovsky, E.** Asteroid impact in the Black Sea. Death by drowning or asphyxiation? // *Natural Hazards.* 2007. V. 40. P. 327–338.
79. **Badescu, V.** Risks for poisoning of coastal and inland population due to asteroid impacts in Southern regions of Black Se // *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2008. V. 22. P. 461–476.

80. **Joanson, G.W., Higgins, G.H.** Engineering Applications of Nuclear Explosives: Project Plowshare // *Reviews of Geophysics*. 1965. V. 3. No. 3. P. 365 – 385.
81. **Korycansky, D.G., Lynett, P.J.** Run-up from impact tsunami // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 170. P. 1076 – 1088.
82. **Пелиновский, Е.Н.** Гидродинамика волн цунами / Е.Н. Пелиновский. – Н. Новгород: Институт прикладной физики РАН, 1996. – 276 с.
83. **Adushkin, V.V., Nemchinov, I.V.** Catastrophic Events Caused by Cosmic Objects, Springer, 2008. P. 1 – 89.
84. **Saito, T., Kaiho, K., Abe, A., Katayama, M., Takayama, K.** Hypervelocity impact of asteroid/comet on the oceanic crust of the earth // *International Journal of Impact Engineering*. 2008. V. 35. P. 1770 – 1777.
85. **Pierazzo, E., Artemieva, N., Asphaug, E., Baldwin, E.C., Cazamias, J., Coker, R., Collins, G.S., Crawford, D.A., Davison, T., Elbeshausen, D., Holsapple, K.A., Housen, K.R., Korycansky, D.G., Wunemann, K.** Validation of numerical codes for impact and explosion cratering: Impacts on strengthless and metal targets // *Meteoritics & Planetary Science*. 2008. V. 43. № 12. P. 1917 – 1938.
86. **Gekle, S., Peters, I.R., Gordillo, J.M., van der Meer D., Lohse, D.** Supersonic Air Flow due to Solid-Liquid Impact // *Physical Review Letters*. 0031-9007/10/104(2)/024501(4).
87. **Kharif, C., Pelinovsky, E.** Asteroid impact tsunamis // *C. R. Physique*. 2005. V. 6. P. 361–366.
88. **Badescu, V., Isvoranu, D.** Dynamics and Coastal Effects of Tsunamis Generated by Asteroids Impacting the Black Sea // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 1813 – 1834.
89. **Gisler, G., Weaver, R., Gittings, M.** Calculations of Asteroid Impacts into Deep and Shallow Water // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 1187 – 1198.
90. **Ward, S.N., Asphaug, E.** Asteroid impact tsunami of 2880 March 16 // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 153. P. F6 – F10.
91. **Isvoranu, D., Badescu, V.** Hydrodynamics of tsunamis generated by asteroid impact in the Black Sea // *Cent. Eur. J. Phys.* 2012. V. 10. No. 2. P. 429 – 446.
92. **Chesley, S.R., Ward, S.N.** A Quantitative Assessment of the Human and Economic Hazard from Impact-generated Tsunami // *Natural Hazards*. 2006. V. 38. P. 355 – 374.
93. **Glimsdal, S., Pedersen, G.K., Langtangen, H.P., Shuvalov, V., Dypvik, H.** Tsunami generation and propagation from the Mjølñir asteroid impact // *Meteoritics & Planetary Science*. 2007. V. 42. No. 9. P. 1473 – 1493.
94. **Shuvalov, V., Trubetskaya, I.A.** Numerical Modeling of the Formation of the Eltanin Submarine Impact Structure // *Solar System Research*. 2007. V. 41. No. 1. P. 56 – 64.
95. **Weiss, R., Wunemann, K., Bahlburg, H.** Numerical modelling of generation, propagation and run-up of tsunamis caused by oceanic impacts: model strategy and technical solutions // *Geophys. J. Int.* 2006. V. 167. P. 77 – 88.
96. **Shuvalov, V.V., Trubetskaya, I.A.** Numerical Modeling of Marine Target Impacts // *Solar System Research*. 2002. V. 36. No. 5. P. 417 – 430.
97. **Shuvalov, V.V., Dypvik, H., Kalleeson, E., Setsa, R., Riis, F.** Modeling the 2.7 km in Diameter, Shallow Marine Ritland Impact Structure // *Earth Moon Planets*. 2012. V. 108. P. 175 – 188.
98. **Ward, S.N., Asphaug, E.** Asteroid Impact Tsunami: A Probabilistic Hazard Assessment // *Icarus*. 2000. V. 145. №1. P. 64–78.
99. **Bobrowsky, P.T., Rickman, H.** Comet/Asteroid Impacts and Human Society. An Interdisciplinary Approach, Springer, 2007. – 546 p.
100. **Букреев, В.И.** Гравитационные волны при падении тела на мелкую воду / В.И. Букреев, А.В. Гусев // *Прикладная механика и техническая физика*. 1996. Т. 37. № 2. С. 90–98.
101. **Yabushita, S.** On the possible hazard on the major cities caused by asteroid impact in the Pacific ocean // *Earth, Moon and Planets*. 1994. V. 65. P. 7–13.
102. **Зайцев, А.И.** Моделирование распространения катастрофического цунами (26 декабря 2004 г.) в индийском океане / А.И. Зайцев, А.А. Куркин, Б.В. Левин [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2005. Т. 402. № 3. С. 388–392.
103. **Зайцев, А.И.** Невельское цунами 2 августа 2007 года: инструментальные данные и численное моделирование / А.И. Зайцев, Д.П. Ковалев, А.А. Куркин [и др.] // *Доклады Академии наук*. 2008. Т. 421. № 2. С. 249–252.

104. Куркин, А.А. Сравнительная оценка цунамиопасности япономорского побережья России на основе численного моделирования / А.А. Куркин, Е.Н. Пелиновский, Б.Х. Чой, Д.С. Ли // Океанология. 2004. Т. 44. № 2. С. 163–172.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

A.S. Kozelkov

EFFECTS, ACCOMPANYING ENTERING OF ASTEROID IN THE WATER MEDIUM

FSUE «RFNC – VNIIEF»

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

Purpose: In this paper the existing models describing the motion of an asteroid in the atmosphere, water and lithosphere are discussed.

Method: The study is based on physico-mathematical and numerical models of cosmogenic tsunamis.

Results: A brief overview of the asteroid-meteorite threat to Earth is presented. Formulas to assess the parameters of the tsunami waves caused by an asteroid entering the water are given.

Application domain: Presented results can be used to develop improved models of cosmogenic tsunamis.

Key words: cosmogenic tsunamis, meteors, asteroids, physical-mathematical and numerical models.

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

УДК 004.75

Д.В. Жевнерчук, Д.А. Лопатин

ПРИМЕНЕНИЕ АГЕНТНОГО ПОДХОДА К ПРОЕКТИРОВАНИЮ И РЕАЛИЗАЦИИ МОДЕЛЕЙ САМООРГАНИЗАЦИИ КОНФИГУРАЦИИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приводится обоснование выбора агентного подхода в качестве базового для моделирования и исследования процессов балансировки нагрузки в вычислительных сетях. Предложена архитектура модели вычислительной сети, основанная на агентном подходе с применением интеллектуальных агентов.

Ключевые слова: агентный подход, интеллектуальный агент, вычислительная сеть, событийная модель, запрос, диаграмма деятельности.

Пусть S – распределенная вычислительная система, предоставляющая некоторое множество сервисов, меняющееся с течением времени, и обладающая высоким уровнем интероперабельности с внешними системами, являющимися потребителями сервисов. Такая система в процессе функционирования должна реорганизовывать и адаптировать свои ресурсы под меняющуюся нагрузку, вызванную клиентскими запросами, появлением новых сервисов, выходом из строя вычислительных узлов и др.

Известен ряд работ, в которых предлагаются модели процесса распределения нагрузки на основе сетей СМО, коллективов вычислителей и другого, а также алгоритмы балансировки нагрузки [1,2]. Основной чертой полученных результатов является ориентация на частные случаи вычислительных систем, такие как кластеры и GRID, и для применения их в S требуются дальнейшие исследования.

Постановка задачи

Для проведения эффективных исследований процессов балансировки нагрузки S необходимо разработать подход к проектированию и реализации среды моделирования S , обосновать выбор используемых базовых подходов. Решение должно содержать модели проектирования S , отражающие ее различные структурные и функциональные аспекты. Объект исследования может быть отнесен к классу сложных самоорганизующихся адаптивных систем [3], который был введен и изучен Дж. Холландом, поскольку в разных формах существуют механизмы агрегации групп элементов, нелинейности, модификации ресурсов и информации, модификации структуры и поведения ее элементов, влияющих на эмерджентные свойства S , что приводит к повышению ее устойчивости. Известно, что естественным подходом для описания систем этого класса является агентный подход.

Таким образом, требуется адаптировать агентный подход к построению моделей распределенных вычислительных сервис-ориентированных систем с меняющимся составом сервисов и высокими показателями интероперабельности с клиентскими системами.

Методика

Далее описаны наиболее значимые архитектурные решения, использованные при создании модели *S*. Методической основой решения выступают объектно-ориентированный и агентные подходы.

Для моделирования структуры вычислительной системы применяется граф, в котором вершины – это узлы, а ребра – сеть, соединяющая узлы. Генерация графа вычислительной сети основана на шаблоне «Абстрактная фабрика» (англ. Abstract factory) – порождающем шаблоне проектирования, позволяющем изменять поведение системы, варьируя создаваемыми объектами, сохраняя при этом интерфейсы. Он позволяет создавать целые группы взаимосвязанных объектов [4].

Применены следующие абстрактные классы: *AbstractNode* и *AbstractEdge* – абстрактные классы, декларирующие методы, реализация которых будет определять поведение конкретных *Node* и *Edge*, *AbstractNetworkFactory* – абстрактный класс, имплементация которого (конкретная фабрика) определяет, из каких узлов состоит сеть и связи между ними. Для фабрики разработан объект *Client*, который использует ее для генерации вычислительной сети. Взаимодействует клиент с фабрикой и созданными ею объектами через интерфейсы, оперируя абстракцией, независимо от реализации. Абстрактная фабрика создания модели вычислительной сети описана диаграммой классов, представленной на рис. 1.

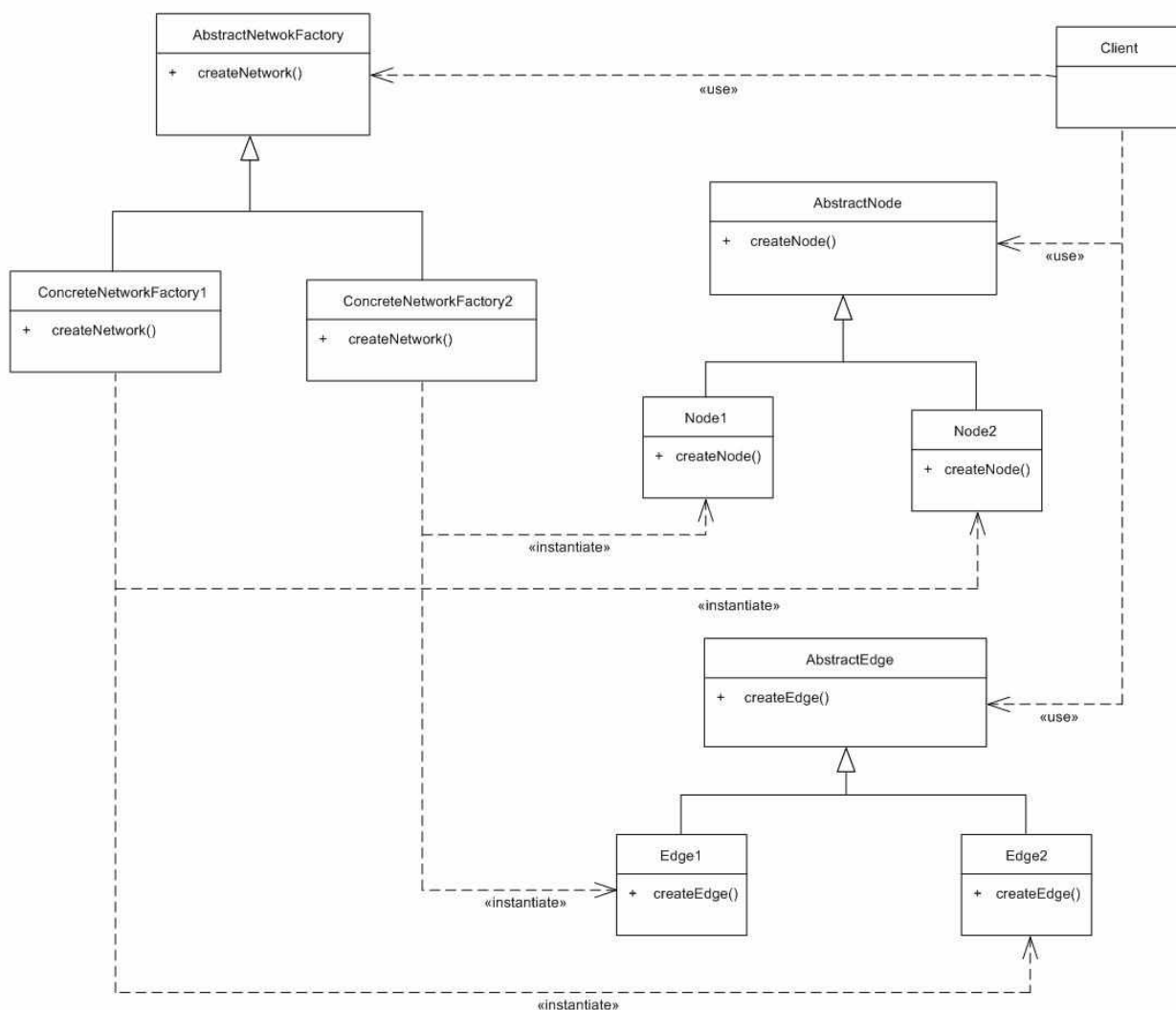


Рис. 1. Абстрактная фабрика создания модели вычислительной сети

Благодаря данному шаблону мы можем получить неоднородную сеть, в которой узлы могут обладать различным поведением, также появляется возможность настраивать взаимодействие между узлами и моделировать различную нагрузку на сеть. Одним из плюсов является возможность расширения предложенной реализации посредством добавления объектов с новым поведением.

Агенты расположены на узлах и представляют собой самостоятельные сущности, представленные в виде потоков. Они осуществляют переодический опрос (polling) узла, с целью поддержания информации о доступных ресурсах в актуальном состоянии. В модели количество агентов определено сгенерированной вычислительной сетью, поддерживается механизм межагентного взаимодействия. Каждый узел предоставляет информацию о доступных агентах, которые за ним закреплены.

Для создания агентов предложено использовать поражающий шаблон проектирования «Фабричный метод» (англ. Factory Method). Данный паттерн обладает базовыми функциями абстрактной фабрики, но в отличие от последней формирует лишь один интересующий объект, а не группу связанных. Фабрика делегирует создание объектов наследникам родительского класса, что позволяет манипулировать абстрактными объектами на более высоком уровне.

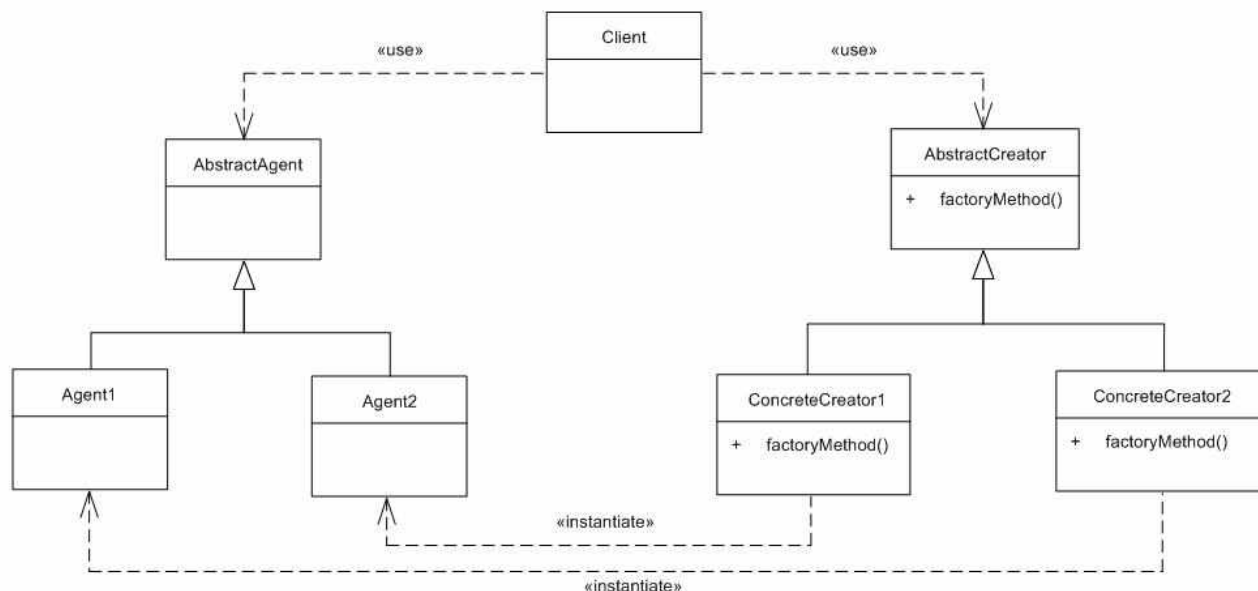


Рис. 2. Фабричный метод создания агентов с различным поведением

Для получения входных данных (конфигурации модели) и последующего их хранения предложено использовать шаблон проектирования DAO (data access object или объект доступа к данным) — это объект, который предоставляет абстрактный интерфейс к какому-либо типу базы данных или механизму хранения. Определённые возможности предоставляются независимо от того, какой механизм хранения используется, без необходимости специальным образом соответствовать этому механизму хранения [5]. ModelConfigurationDAO — это общий интерфейс, декларирующий методы, которые описывают операции, применимые к конфигурации модели. В нашем случае достаточно стандартного набора операций – CRUD (create, read, update, delete).

Объект доступа к данным (рис. 3) использует класс Connection, который является объектом, описывающим доступ к определенному механизму хранения.

Описание создания и хранения конфигураций представляется в виде XML файлов (XMLModelConfigurationDAO). Разработана xsd-схема, содержащая набор правил, по которым строится XML-файл. При реализации такого подхода использовались стандартные

средства языка JAVA, которые предоставляют удобный инструмент для серелизации/десерелизации объектов на основе xsd. Также данный подход позволяет проводить валидацию конфигурации, основываясь на правилах, описанных в xsd-схеме.

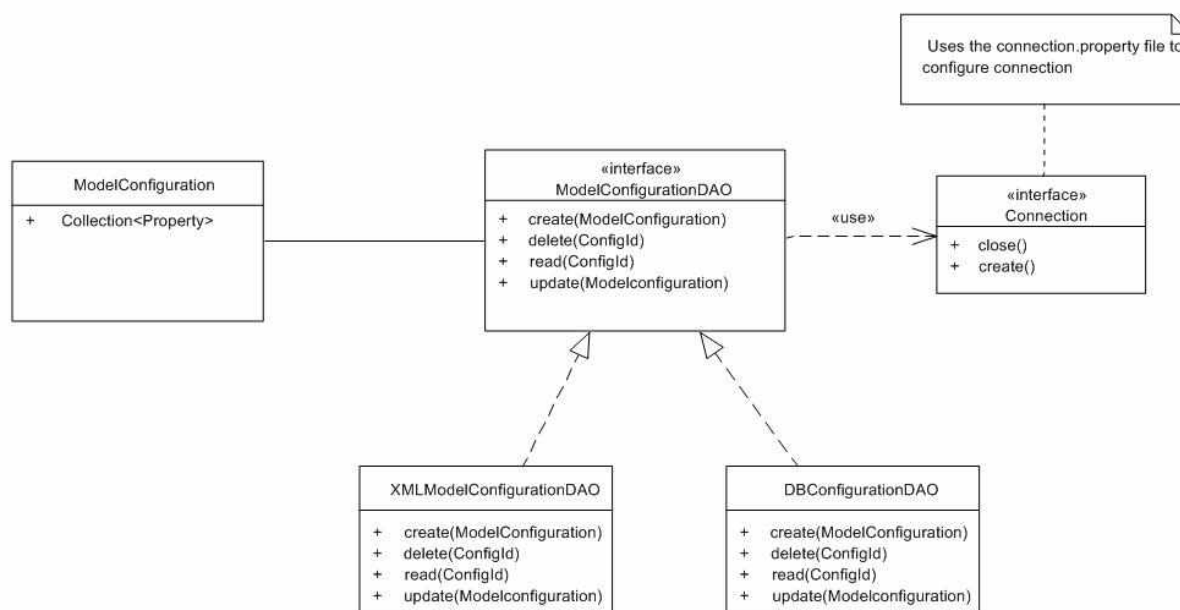


Рис. 3. Объект доступа к данным конфигурации модели

Для отслеживания состояния модели во время эксперимента применяется журнал (log) событий. Основываясь на том, что логирование будет происходить в многопоточной среде, предлагается использовать паттерн Singleton (одиночка) со статической инициализацией, что гарантирует его потокобезопасность [6] (рис. 4).

Использование данного шаблона подразумевает, что при старте системы будет создан всего лишь один экземпляр данного класса и каждая сущность системы будет иметь ссылку на него. Логирование может производиться на определенном уровне (в зависимости от детализации):

1. INFO – логирование основных событий системы.
2. DEBUG – логирование всех событий системы.
3. ERROR – логирование ошибок.

Настройка уровня логирования также относится к конфигурации модели.

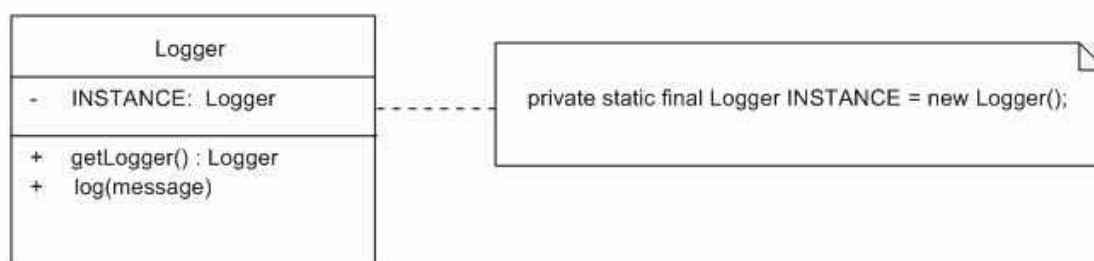


Рис. 4. Логирование событий системы(шаблон одиночка)

Важной частью системы является сбор статистики. Используется подход к организации сбора значимых показателей модели в форме, пригодной для дальнейшего анализа или даже облегчающей его (рис. 5). Основываясь на поставленных задачах, предложено осуществлять сбор необходимых показателей в виде CSV-файлов (англ. Comma-Separated Values – значения, разделённые запятыми) – текстовый формат, предназначенный

для представления табличных данных. Каждая строка файла – это одна строка таблицы. Значения отдельных колонок разделяются разделительным символом, обычно запятой. Существует множество инструментов, позволяющих анализировать и визуализировать данные, которые хранятся в таком формате.

Абстрактный класс `DataCollector` предоставляет возможность реализующим его классам выполнять задачу сбора статистики по расписанию в отдельном потоке. Конкретные реализации этого абстрактного класса осуществляют сбор статистики для определенной группы объектов. Например, `AgentDataCollector` собирает статистику по всем агентам системы.

Любая сущность (узел, клиент, агент) каждый момент модельного времени сохраняет состояние своих ключевых показателей внутри себя (поскольку записывать в файл каждую единицу модельного времени неэффективно). Каждый `DataCollector` знает о соответствующих ему сущностях и, в соответствии с настроенным интервалом, последовательно осуществляет опрос (poll) всех сущностей и записывает полученные данные в определенный CSV-файл. После опроса сущности очищают сохраненные показатели, освобождая память.

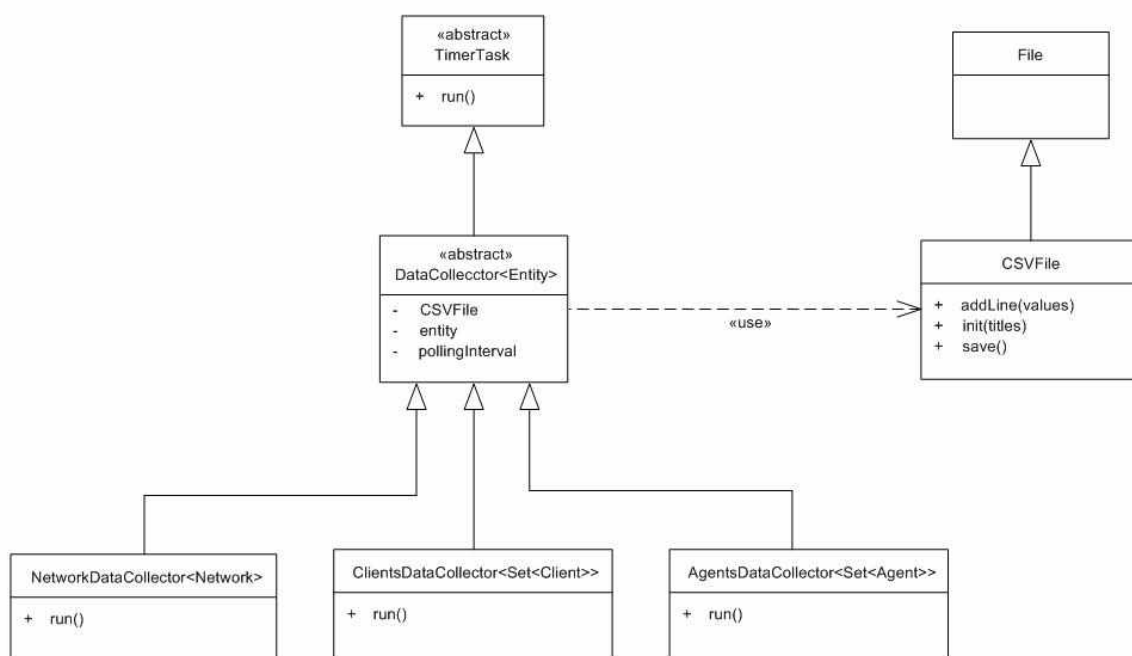


Рис. 5. Сбор ключевых показателей системы

Клиент – это сущность системы, которая с определенной периодичностью, в зависимости от конфигурации модели, отправляет запросы на сервер. Поведение клиента основывается на событийной модели (рис. 6).

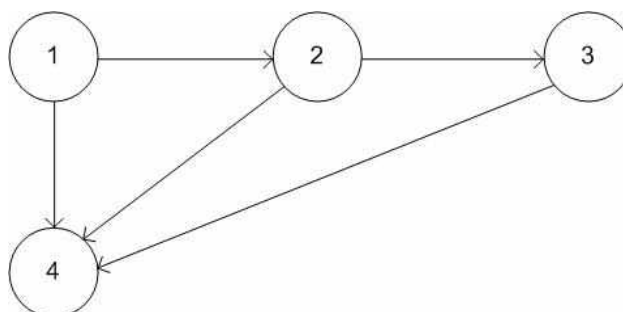


Рис. 6. Сбор ключевых показателей системы

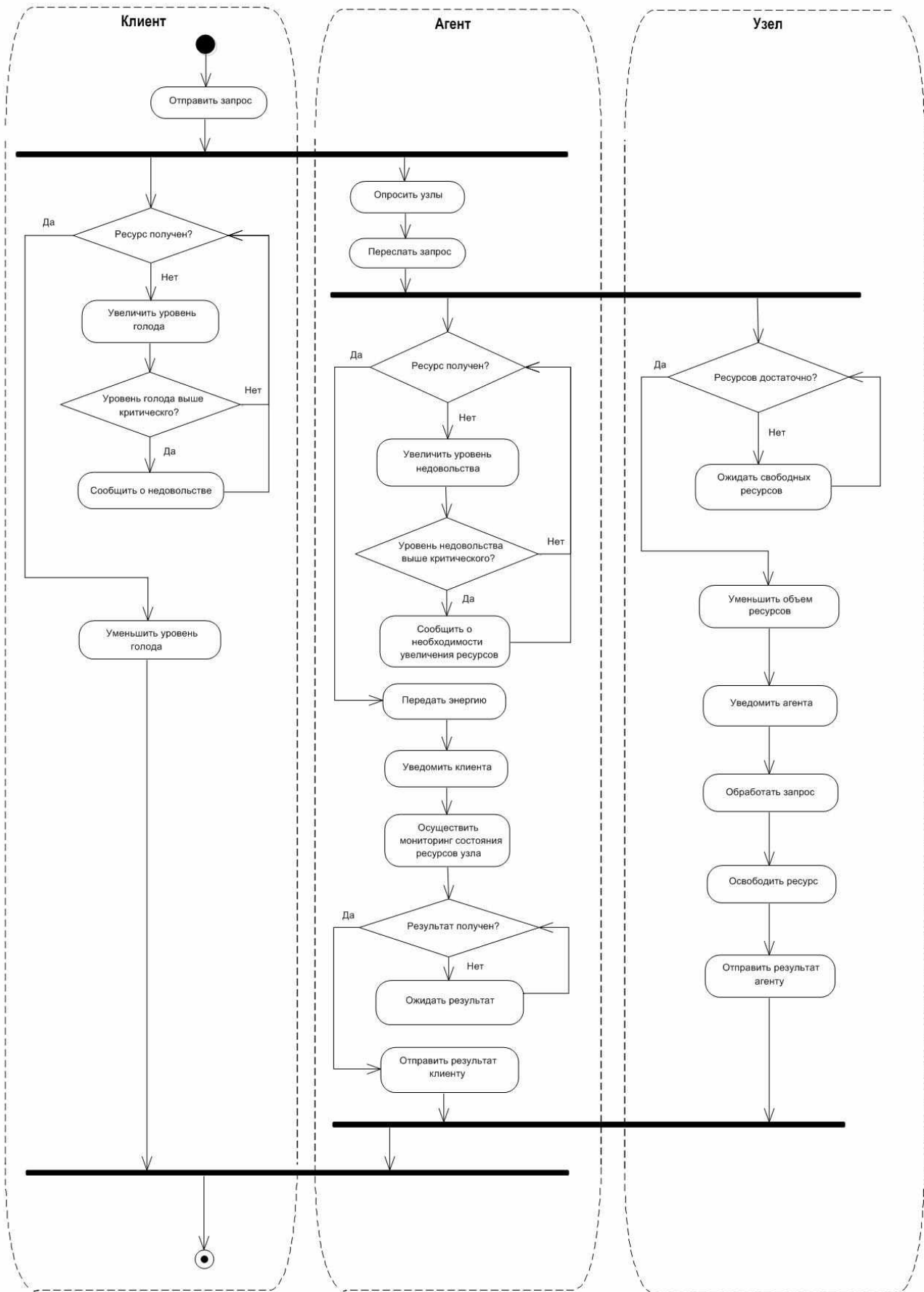


Рис. 7. Диаграмма деятельности системы

Всего выделено четыре события, при наступлении которых клиент выполняет определенные действия:

1. Отправка запроса на сервер. Клиент отправляет запрос на сервер, указывая количество необходимых ему ресурсов и интервал времени, на который они ему необходимы. После отправки запроса клиент начинает увеличивать чувство голода до тех пор, пока ресурс не будет предоставлен в полном объеме.

2. Уровень голода превышает критический уровень. С момента отправки запроса уровень голода клиента повышается и может превысить допустимый уровень, в этом случае клиент «жалуется» на обслуживание, т.е. сообщает менеджеру ресурсов о своем недовольстве. Менеджер ресурсов, в зависимости от числа неудовлетворенных клиентов, принимает решение о добавлении нового узла в сеть.

3. Создан новый узел. Под «давлением» неудовлетворенных клиентов менеджер принимает решение увеличить предоставляемый ресурс, добавив новый узел в сеть, о чём и оповещает голодных клиентов. Клиенты, в свою очередь, выгружают заявку с узла, который так и не смог предоставить необходимый ресурс в полном объеме, и отправляют запрос на только что сформировавшийся узел.

Получен ответ, предоставлен ресурс. Агент информирует пользователя, что узел может полностью удовлетворить его требования. Клиент проверяет, была ли реализована заявка вовремя. Если да, то он уменьшает количество накопленного голода с момента отправки заявки.

Разработана диаграмма деятельности (рис. 7). Клиент посылает запрос в сеть. Узел, который будет обрабатывать данный запрос, первоначально выбирается случайным образом или зависит от географического положения (выбирается ближайший к клиенту узел). После отправки запроса, ожидая получения необходимых ресурсов, узел начинает испытывать голод, который увеличивается с каждой единицей модельного времени.

На каждом узле закреплен интеллектуальный агент, который следит за его состоянием и производит мониторинг состояния ресурсов данного узла. Также агент осведомлен о других, соседних агентах, с которыми может контактировать. Агент опрашивает связанный с ним и соседние узлы для получения сведений о текущем состоянии феромона. После оценки полученной информации агент принимает решение о привлекательности узлов (чем феромон выше – тем выше привлекательность), также на уровень феромона оказывает влияние загруженность сети. Агент пересылает запрос, либо обрабатывает его сам.

Основываясь на информации о состоянии ресурсов узла, агент отправляет заявку на обработку, либо добавляет в очередь до тех пор пока ресурс не сможет в полном объеме удовлетворить заявку. После того, как заявка попадает на обработку, узел уменьшает объем предоставляемых им ресурсов, и оповещает об этом своего агента. В свою очередь, агент передаёт узлу часть своей энергии и оповещает клиента о том, что ресурс предоставлен. Далее агент производит мониторинг состояния ресурсов узла для поддержания информации об уровне выделяемого феромона в актуальном состоянии.

При увеличении уровень голода клиента может превысить критическую отметку, при этом клиент информирует менеджера ресурсов о неудовлетворительном обслуживании. Менеджер ресурсов на основании жалоб клиентов может увеличить количество ресурсов, добавив новый узел в сеть. После обработки заявки узел освобождает ресурсы и уведомляет агента о результате обработки. Агент пересылает результат клиенту.

Предложенная реализация событийной модели и диаграммы деятельности системы базируется на методике самоконфигурирования пространственно-временного ресурса, которая была разработана на кафедре ВСТ ИРИТ НГТУ им. Р.Е. Алексеева.

Экспериментальная часть

Для исследования модели была разработана мультиагентная система с применением Java-технологий в среде Eclipse.

Проведена проверка свойств открытости предложенной архитектуры. Свойство переносимости моделей обеспечено механизмами JVM. Построенная модель функционирует на широко распространенных платформах: win, *nix. Проверена расширяемость платформы по:

- новым видам собираемой статистики,
- количеству агентов, принадлежащих отдельным группам,
- новым типам узлов и клиентов, имитируемых агентами и др.

Обеспечена интероперабельность с системами управления базами данных: MS SQL Server 2005 и выше, MySQL 5, PostgreSQL. Тестирование совместимости с другими СУБД не проводилось. Обеспечена интероперабельность со средствами анализа данных: Weka, RapidMiner Studio, MS Analysis Services.

В ходе серии экспериментов удалось добиться сходимости к конечному значению количества источников ресурсов. При этом вариация ресурса в стационарном состоянии составила в среднем от 7% до 19% от разброса между максимальным и минимальным количеством ресурса, наблюдаемым за весь период моделирования.

При реализации данной модели активно использовались как общие принципы проектирования GRASP (англ. General Responsibility Assignment Software Patterns), так и более конкретные шаблоны GOF, благодаря которым архитектура системы является прозрачной и понятной. Использование шаблонов даёт нам возможность легко изменять систему и масштабировать её. Архитектурные решения, описанные в этой статье, предоставляют возможность повторного использования кода.

Библиографический список

1. Хританков, А.С. Модели и алгоритмы распределения нагрузки. Алгоритмы на основе сетей СМО // Информационные технологии и вычислительные системы. 3/2009. С. 33-48.
2. Хританков, А.С. Модели и алгоритмы распределения нагрузки. Модель коллектива вычислителей. Модели с соперником, Информационные технологии и вычислительные системы. 2/2009. С. 65–80.
3. Holland, J.H. Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity. New York: HelixBooks (AddisonWesley), 1995.
4. Erich Gamma, Richard Helm, Ralph Johnson, John Vlissides. Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software. Addison-Wesley Professional, 1994.
5. Bloch, Joshua. Effective Java Second Edition / Joshua Bloch. Prentice Hall, 2008.
6. Goetz, Brian, Tim Peierls, Joshua Bloch, Joseph Bowbeer, David Holmes, Doug Lea / Brian Goetz [et al.] // Java Concurrency in Practice. Addison-Wesley Professional, 2006.

Дата поступления
в редакцию 27.06.2014

D.V. Zhevnerchuk, D. A. Lopatin

APPLICATION OF AGENT-BASED APPROACH TO DESIGN AND IMPLEMENTATION OF THE COMPUTER SYSTEM CONFIGURATION SELF-ORGANIZATION MODELS

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

Subject: The subject of this study is the agent-base approach using in open computer systems model architecture.

Purpose: The aim is to create architecture and design templates for open computer systems modeling and researching.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on software design patterns, methodology of open systems in computer science and UML.

Findings: The results can be applied to the design and researching of scalable, extensible integrated information systems whose components operate on different hardware and software platforms.

Research limitations/implications: The present study provides a continuation and development simulation of self-organization processes in distributed spatiotemporal resources of open computer systems researching.

Originality/value: The paper describes an approach to open computing systems' properties modeling and study with using biological systems' self-organization mechanisms. It could be used in researching of open computer systems and in load balancing systems design.

Key words: agent-based approach, an intelligent agent, computer network, event model, query, activity diagram.

УДК 004.051

А.Н. Моисеев, П.В. Мисевич

**АЛГОРИТМ АУДИТА РАБОТЫ КОРПОРАТИВНЫХ
АВТОМАТИЗИРОВАННЫХ СИСТЕМ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассматривается разработка способа анализа внешней и внутренней среды функционирования автоматизированных систем (АС) с целью выявления скрытых комплексных проблем, мешающих эффективно использовать автоматизированные системы. Предложенный авторами подход направлен на формализацию работы аудиторов и преследует цели создания средств интеллектуальной поддержки работы технического персонала в организациях.

Ключевые слова: автоматизированная система, обеспечения автоматизированных систем, аудит, логистический подход, мультицелевой граф.

Практика показывает, что использование АС в организации не гарантирует получения эффекта от ее применения. Недостигнутые цели (количественные и качественные характеристики) при внедрении и эксплуатации системы являются только «симптомами» проблемы. Сама проблема (диагноз) весьма часто не очевидна. Причин может быть несколько, например:

- силовое внедрение средств автоматизации «сверху», что часто приводит к «саботажу» автоматизированной системы со стороны персонала;
- система не вписывается в сложившиеся бизнес-процессы в организации (систему внедрили, а реинжиниринг процессов или сделан без учета инструментариев автоматизации, или пока не осуществлен);
- отсутствие мотивации персонала в использовании системы и др.

Часто складывается парадоксальная ситуация. С одной стороны, истинные причины неэффективного использования автоматизированных систем необходимо искать внутри организации. С другой стороны, именно в организации созданы условия-препятствия, мешающие осознанию истинных причин, порождающих проблемы.

Одним из современных подходов к комплексу вопросов поддержки АС в течение их жизненного цикла является использование аудита. В рамках этого подхода система исследуется аудиторами (внешними, внутренними, или и теми, и другими одновременно), которые оснащены методикой проведения исследования и инструментариями, автоматизирующими их труд. Данный подход хорошо себя зарекомендовал в проблемной области информационной безопасности [1, 2].

В нашей работе ставится задача разработки стратегии проведения аудита, который позволил бы перейти от «симптомов» к «диагнозу», т.е. от констатации факта неэффективного использования средств автоматизации к конкретным причинам. Формализация последовательности шагов работы аудиторов позволит создать инструментарии автоматизации работы аудиторов в форме экспертной системы или средств интеллектуальной поддержки.

Методика проведения исследований

В рамках данной работы предлагается исследовать внутреннюю и внешнюю среду автоматизированной системы через «призму» важнейших видов обеспечений, которые прописаны в ГОСТ 24.104-85. При анализе обеспечений необходимо уделить особое внимание факторам, описанным далее.

1. Техническое обеспечение (ТО). При аудите следует выявить «узкие места» про-

граммно-аппаратного комплекса, средств коммуникации и сетевого окружения. Для выхода на типовые проблемы аудиторам необходимо оценить:

- качество оснащенности аппаратными средствами подразделений организации (компьютеры, устройства сбора, накопления, обработки, передачи и вывода информации; устройства передачи данных и линий связи; оргтехника и устройства автоматического съема информации; эксплуатационные материалы и др.);
- своевременность ремонта аппаратных средств;
- качество оснащенности коммуникационных сетей;
- степень централизации системы управления технического обеспечения;
- наличие документации на информационные системы (ИС) и на технологические процессы.

2. Программное обеспечение (ПО). При анализе специфики ПО следует уделить внимание функциональному наполнению системы: как правило, каждый производитель ПО старается минимизировать функциональное наполнение с целью сокращения затрат на создание ПО. Например, протокол системы (LOG файл) у большинства систем выполнен в виде текстового файла, который формально поддерживает «опцию» протоколирования, но не создает условий для автоматизации поиска информации в протоколе (а это является отдельной и весьма важной задачей). Т.е. перенос в БД LOG-файла «перекладывается на плечи пользователя», что необходимо учесть при поддержке системы.

Кроме этого, при анализе ПО особое внимание следует уделить следующим факторам:

1. Корректности организации взаимодействия системы с другими АС, которые используются в организации. Исследование этого качества раскладывается на следующие задачи: оценка интерфейса информационного обмена (степени его универсальности, корректности работы, удобства для пользователей).

2. Востребованности в организации отчетов, генерируемых ПО. Для анализа этого фактора необходимо проводить анализ типовых сценариев бизнес-процессов с точки зрения логистического подхода [3]. Практическая реализация этих идей приводит к построению логистических цепочек, которые отображают, откуда информация поступает в различные автоматизированные системы, как обрабатывается и кем используется.

Реже возникают проблемы с ПО, связанные с «глюками» - случайно возникающими отказами, непротоколируемыми особенностями работы, неудобным интерфейсом пользователя и другими техническими проблемами, которые могут привести к сильному нежеланию работать с уже развернутой АС.

Опыт показывает, что при проведении аудита необходимо оценить:

- качество установки ПО;
- выбор лицензии на ПО и степень ее соответствия ситуации в организации;
- потенциальные проблемы с операционной системой (корректность выбора операционной системы, устойчивость ее работы и комплекс факторов, влияющих на стабильность работы средств автоматизации);
- комплекс потенциальных и реальных проблем с драйверами;
- проблемы с антивирусными программами и другими элементами поддержки информационной безопасности системы;
- оптимальность выбора браузера;
- отставание ПО от уровня развития аппаратных средств (устаревшее ПО);
- количество и качество генерируемых системой отчетов;
- обеспечение своевременности внесения в систему данных;
- степень оперативности обработки и согласования введенных данных;
- доступность данных для пользователей и технического персонала;
- удобство формата представления данных;
- наглядность работы системы для пользователей (действие-изменение состояния системы - результат).

Пример. Как правило, информация, которая генерируется АС (отчеты, статистика, интегральные и сводные отчеты и т.д.), «дублируется другими системами» или не полностью востребована конечными потребителями. В этом случае необходимо провести модернизацию ПО с целью практической реализации идей логистики в информационных системах [3] и исключения нескольких дублирующих источников информации, отчетов, так как описанная ситуация приводит к снижению ценности информационного обеспечения анализируемой АС.

3. Информационное обеспечение (ИО). Актуальность, достоверность и отсутствие избыточности является своеобразной целевой установкой при проведении анализа информационного обеспечения.

Необходимо посмотреть с логистических позиций [3] на роль и место информации, хранимой в анализируемой АС, определить ее востребованность. Для этого требуется проанализировать работу других автоматизированных систем (которые были внедрены ранее) с целью поиска дубликатов информации. Особое внимание необходимо уделить источникам информации. Их необходимо оценить с позиций достоверности, актуальности и мотивации. Если источником информации является персонал компании, то для корректного ввода актуальных данных в систему необходимо проанализировать весь комплекс факторов, связанный с условиями труда.

Особое внимание следует уделить методике ввода информации в систему, т.к. интерактивное заполнение форм - наиболее распространенный способ для конечного пользователя не является формой, удобной для пользователей-экспертов. Этому классу пользователей намного удобнее воспользоваться конвертором их табличных форм в БД.

При проведении аудита целесообразно оценить, как осуществляется:

- переработка и анализ информации;
- роль АС в принятии управленческих решений;
- доведение решений руководства до пользователей автоматизированной системы;
- контроль исполнения решений руководства;
- получение руководством информации о результатах управления;
- ведение документооборота и роль АС в этом процессе;
- накопление информации в АС и в архивах.

Кроме этого, необходимо оценить информационное обеспечение с позиций:

- безопасности информации;
- легкости процесса администрирования и обеспечение конфиденциальности информации для отдельных групп пользователей;
- дублирования информации как в АС, так и за ее пределами.

Пример. Мотивацию применения системы для персонала следует анализировать в двух направлениях. Первое - насколько ввод информации в АС «выгоден и естественен для пользователя». Для этого необходимо оценить качество интерфейса пользователя. Затем следует определить зависимость оценки работы сотрудника от качества информации, вводимой в им в автоматизированную систему.

Второе направление - через анализ совокупности средств автоматизации выявить в организации параллельные процессы. Это позволит исключить создание различными подразделениями одинаковых по сути отчетов (пусть и в различных форматах) на базе использования инструментариев из различных автоматизированных систем.

4. Методическое обеспечение (МО) должно охватывать не только типовые сценарии для работы с АС, но и описывать:

- инструментарии, ориентированные на пользователей-экспертов;
- работу с конверторами;
- процесс прямого доступа к подсистемам БД.

При анализе аудиторами методического обеспечения особое внимание необходимо уделить наличию и качеству инструкций по работе с системой для пользователей, админи-

страторов, разработчиков. С целью максимального приближения инструкций к персоналу необходимо использовать Web-интерфейс и мультимедийную среду.

5. Организационное обеспечение (ОО) должно поддерживать эффективную работу АС на уровне регламентов. Для анализа ОО рекомендуем воспользоваться логистическим подходом [3], который позволит выделить:

- дублирующие логистические звенья;
- звенья, которые не приводят к получению корректных результатов;
- выявление некорректной стыковки бизнес-процессов по информации и по функциональному наполнению.

Для анализа структуры организации – среды, в которой работает АС, необходимо изучить:

- процесс сбора информации для АС (источники, схемы, мотивация персонала и др.);
- наличие нескольких источников одной и той же информации;
- качество информационного взаимодействия между информационными системами (ситуация при которой одна и та же информация вводится в различные системы крайне нежелательна);
- степень развития коммуникационных сетей;
- качество технического обеспечения, конфигурацию технических средств и т.д.

6. Алгоритмическое обеспечение (АО) анализируется после описанных ранее обеспечений (1-5) с целью создания алгоритмов обработки информации, генерации отчетов, которые позволили бы снять выявленные логистические, организационные, методические и прочие проблемы с целью коррекции функционального наполнения системы и ее дальнейшего более эффективного использования.

7. Математическое обеспечение (МТО) анализируется с точки зрения создания и модернизации моделей, которые положены в состав работы анализируемого программно-аппаратного комплекса.

Как правило, аудитор только оценивает корректность математической модели и эффективность алгоритмов решения типовых задач, но не может их поменять. Результатом этого этапа является перспективное задание программисту, который поддерживает работу системы с целью преодоления явных промахов создателей системы.

Обобщенный алгоритм работы аудиторов следующий:

1. Проводится анализ различных видов обеспечений (по методике, которая рассматривалась выше) автоматизированных систем с целью формирования множества «узких мест» A , которые снижают эффективность применения средств автоматизации. Таким образом, формируется множество задач - целей исследований и работ для повышения эффективности функционирования автоматизированной системы.

2. Рассматривается бинарное множество, элементами которого является пара элементов множества A . Целью этого шага является выявление ассоциативных взаимосвязей между различными «узкими местами». Например, отсутствие мотивации персонала в использовании автоматизированной системы (проблема организационного обеспечения) может быть обусловлено фактором невозможности генерации требуемых отчетов (проблема программного, методического и алгоритмического обеспечения).

3. По аналогии осуществляется анализ множеств из трех, четырех элементов множества A с целью синтеза целостной картины проблемы, снижающей эффективность применения средств автоматизации.

4. Осуществляется генерация итогового отчета, в котором содержится формулировка проблемы, ее взаимосвязанных частей и намечаются пути их решений.

После окончания формирования каждого уровня $n = 1, 2, \dots$ целей исследований рекомендуется строить n -уровневый мультицелевой граф проведения исследования. На первом уровне в графе представлены простые цели - вершины. Уровни ниже описывают составные

(из уровня 1) цели проведения исследований с целью формирования «узких мест» в работе АС и т.д. Ребра соединяют вершины-идентификаторы, охваченные ассоциативными связями.

Экспериментальная часть

Практическое применение данного подхода рассмотрим на примере АС по стимулированию труда профессорско-преподавательского состава «Рейтинг преподавателей» в Нижегородском государственном техническом университете им. Р.Е. Алексеева. Проанализируем эффективность ее функционирования с помощью предложенного способа.

Объектом аудита стала система «Рейтинг преподавателей». Она была внедрена в 2009 году, после выхода Постановления Правительства РФ (№583 от 05.08.2008) «О введении новых систем оплаты труда работников федеральных бюджетных учреждений ...». Доступ к системе осуществляется с компьютеров, установленных на кафедрах.

Рассмотрим процесс применения разработанной методики на примере аудита анализируемой системы. Применяя пункт 1 алгоритма работы, производим исследование предметной области с целью формирования списка потенциально «узких мест» в работе АС – множества A . После проведения анализа семи видов обеспечения АС (процесс описан выше), сформировано следующее простое множество A (каждый элемент – неделимый теоретический примитив):

- a_1 - нет возможности получения интегральных отчетов для преподавателей и заведующих кафедрами в удобном формате (программное обеспечение);
- a_2 - несвоевременное внесение данных преподавателями о выполненной работе (организационное обеспечение);
- a_3 - отсутствие мотивации персонала в использовании автоматизированной системы (организационное обеспечение);
- a_4 - нет возможности оперативного внесения данных в систему с домашнего компьютера (техническое обеспечение);
- a_5 - несвоевременное утверждение анкет заведующими кафедрами для выплаты премиальных надбавок.

Результаты анализа представим в форме графа на рис. 1 (первый уровень – $n=1$).

На втором шаге формируем бинарное множество, элементами которого являются пара (a_i, a_j) множества A , где $i \neq j$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, m$, где m - число элементов множества A . Каждый элемент введенного множества описывает комплексную проблему - «узкое место», которое ставит цели исследования. Элементы бинарного множества позволят более точно «поставить диагноз», т.е. сформулировать истинные причины неэффективной работы автоматизированной системы и ассоциативные связи между ними.

Результаты анализа нашей предметной области под «углом зрения» всевозможных пар - проблем описывается следующими элементами:

1. (a_1, a_3) (на рис. 1 представлена на втором уровне) описывает ситуацию, которая связана с отсутствием возможности получения интегральных отчетов для преподавателей и заведующих кафедрами в удобном формате. Анализ показал, что ее причины в отсутствии мотивации персонала, в использовании программного обеспечения, которое несовершенно в части генерации отчетов в удобной форме.

2. (a_2, a_4) (рис.1 – уровень $n=2$) описывает несвоевременное внесение данных в систему, и, как следствие, задержки с их подтверждением руководством. Это обусловлено отсутствием возможности внесения данных в систему с домашнего компьютера и слабой заинтересованности персонала (данные АС не являются единственным источником информации при начислении премий).

Остальные пары проблем в бинарном множестве не являются взаимозависимыми, поэтому не были рассмотрены.

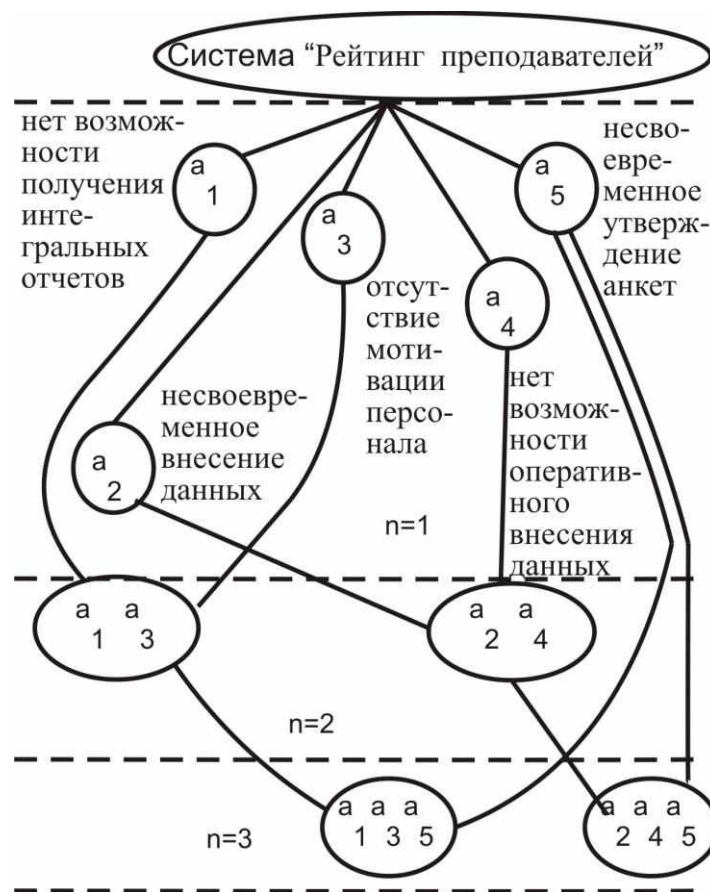


Рис. 1. Графическое представление взаимосвязанных целей анализа (мультицелевой граф)

По окончании второго шага формируется второй уровень мультицелевого графа (рис. 1, $n=2$).

На третьем шаге выполняется анализ множеств из трех элементов (a_i, a_j, a_k) множества A , где $i \neq j \neq k$, $i = 1, \dots, m$, $j = 1, \dots, m$, $k = 1, \dots, m$, где m - число элементов множества A с целью формирования проблем, состоящих из трех элементов. Результатом этого этапа в нашем примере являются следующие элементы:

1. (a_1, a_3, a_5) описывает причины несвоевременного утверждения анкет заведующим кафедрой: это отсутствие мотивации персонала (данные системы не являются решающим фактором при начислении премий) и отсутствие возможности получения интегральных отчетов (итоги работы подчиненных не представляются руководству в удобном и наглядном виде).

2. (a_2, a_4, a_5) позволяет уточнить причины несвоевременного утверждения анкет (в дополнение к п.1): отсутствие оперативного доступа к системе с домашних компьютеров.

По окончании третьего шага формируется третий уровень мультицелевого графа (рис. 1, $n=3$).

Итоговые рекомендации по аудиту автоматизированной системы «Рейтинг преподавателей» следующие:

- сделать систему более доступной для пользователей через организацию доступа к ней через Интернет;
- использовать систему в качестве единственного «законного» источника информации о деятельности преподавателей при начислении премий;
- расширить систему отчетов, генерируемых системой с целью сделать систему единственным и удобным источником информации для оценки качества функционирования кафедры, факультета (института) и вуза в целом.

Результаты

В статье формализован алгоритм проведения системного анализа предметной области функционирования АС, который направлен на выявления скрытых причин, снижающих эффективность работы АС. Применение аппарата мультицелевых графов позволило рассматривать не только простые, но и составные проблемы «под углом зрения» типовых обеспечений, прописанных в ГОСТ 24.104-85.

Библиографический список

1. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27006-2008 Информационная технология. Методы и средства обеспечения безопасности. Требования к органам, осуществляющим аудит и сертификацию систем менеджмента информационной безопасности. Information technology. Security techniques. Requirements for bodies providing audit and certification of information security management systems.
2. **Фомин, А.А.** Аудит информационной безопасности // Международный научно-технический журнал «Информационные технологии моделирования и управления». – Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2009. С. 29–36.
3. **Мисевич, П.В.** Использование логистического подхода к вопросам построения процедур выделения и преодоления аварийных ситуаций в автоматизированных системах // Системы управления и информационные технологии. 2006. N4.2(26). С. 256–261.

*Дата поступления
в редакцию 27.06.2014*

A.N. Moiseev, P.V. Misevich

ALGORITHM OF AUDIT OF CORPORATE AUTOMATED SYSTEMS WORK

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

Purpose: Development of algorithm of audit of corporate automated systems' work. Formalization of work of auditors and creation of intelligent support of technical staff in organizations.

Methodology: Experimental methods of research, systems analysis, theory of algebraic systems and graphs are used.

Results: Algorithm of audit of subject field of automated systems' functioning is formalized which aims to identify hidden causes that reduce the effectiveness of automated systems' work.

Key words: automated system, software, hardware, audit, logistic method, multi-purpose graph.

УДК 681.3.513

Е.А. Никулин

КОНГРУЭНТНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ МОДЕЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье представлена разработка методов конгруэнтных преобразований полиномиальных моделей с целью развития матричных алгоритмов преобразований линий и поверхностей. Рассматривается приведение различных полиномиальных моделей к единым шкалам и порядкам. Использован блочный подход к конгруэнтным преобразованиям. Получены алгоритмы преобразований моделей линий и поверхностей с сохранением их формы.

Ключевые слова: конгруэнтность, преобразование, полином, матрица.

Данная работа продолжает серию статей [1-5], посвященных блочному методу конструирования полиномиальных линий и поверхностей. Теперь мы займемся взаимными преобразованиями полиномиальных моделей, позволяющими из формулы объекта одного типа получить модель объекта другого типа при совпадающих графиках обоих объектов.

Преобразования линий

Обобщенная полиномиальная n -ой степени модель разных типов линий имеет вид бинарного разложения по столбцам узловой матрицы \mathbf{U} и степеням параметра t , составляющим $(n+1)$ -вектор базовых функций (ВБФ) $\mathbf{T}_n(t)=[1 \ t \ t^2 \ \dots \ t^n]^T$:

$$\mathbf{p}_n(t)=\mathbf{U}\mathbf{T}_n(t) \quad \forall t \in [a, b]. \quad (1)$$

Вот как выглядят матрица \mathbf{U} , составленная из $n+1$ -го столбца узловых элементов, числовая $(n+1) \times (n+1)$ -матрица \mathbf{H} и диапазон изменения параметра t у разных полиномиальных линий:

- модель интерполяционной линии, проходящей через $n \geq 1$ узловых точек $\mathbf{u}_0^u, \mathbf{u}_1^u, \dots, \mathbf{u}_n^u$ в отсчеты t_0, t_1, \dots, t_n произвольной шкалы параметра, имеет матрицы

$$\mathbf{U}_u=[\mathbf{u}_0^u \ \mathbf{u}_1^u \ \dots \ \mathbf{u}_n^u], \quad \mathbf{H}_u=[\mathbf{T}_n(t_0) \ \mathbf{T}_n(t_1) \ \dots \ \mathbf{T}_n(t_n)]^{-1}. \quad (2)$$

- у интерполяционной линии Эрмита степени $n \geq 3$, проходящей через узлы $\mathbf{u}_0^e, \mathbf{u}_1^e, \dots, \mathbf{u}_{n-2}^e$ в отсчеты параметра t_0, t_1, \dots, t_{n-2} с векторами концевых направлений \mathbf{V}_0^e и \mathbf{V}_{n-2}^e , матрицы имеют вид

$$\mathbf{U}_e=[\mathbf{u}_0^e \ \dots \ \mathbf{u}_{n-2}^e \ \mathbf{V}_0^e \ \mathbf{V}_{n-2}^e], \quad \mathbf{H}_e=[\mathbf{T}_n(t_0) \ \dots \ \mathbf{T}_n(t_{n-2}) \ \mathbf{T}'_n(t_0) \ \mathbf{T}'_n(t_{n-2})]^{-1}. \quad (3)$$

При выборе отсчетов параметра $t_i=i$ шкалы обеих интерполяционных моделей с матрицами (2) и (3) становятся *нормализованными*;

- у линии Безье, строящейся в *единичной* шкале $t \in [0, 1]$ на основе n -интервальной характеристической полилинии (ХП) $\mathbf{u}_0^b, \mathbf{u}_1^b, \dots, \mathbf{u}_n^b$, матрицы модели (1) следующие:

$$\mathbf{U}_b=[\mathbf{u}_0^b \ \mathbf{u}_1^b \ \dots \ \mathbf{u}_n^b], \quad \mathbf{H}_b=\begin{bmatrix} h_{00} & h_{01} & \dots & h_{0n} \\ 0 & h_{11} & \dots & h_{1n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & h_{nn} \end{bmatrix}, \quad \text{где } h_{ij}=(-1)^{j-i} C_j^i C_n^j \quad \forall 0 \leq i \leq j \leq n. \quad (4)$$

Как видно, многообразие полиномиальных моделей линий обладает как общими чертами — одинаковой формой разложения (1) и объемом исходных данных, определяющих полиномы равных степеней n , так и различиями — параметрическими шкалами (произвольная, нормализованная и единичная) и составом узловых элементов.

Рассмотрим задачу конгруэнтного преобразования одной модели линии в другую

$$\mathbf{p}_n(t_1)=\mathbf{U}_1\mathbf{H}_1\mathbf{T}_n(t_1) \Rightarrow \mathbf{p}_n(t_2)=\mathbf{U}_2\mathbf{H}_2\mathbf{T}_n(t_2)$$

с сохранением формы линии и степени n обоих полиномов. Ключ к преобразованию — приведение параметров t_1 и t_2 к единому параметру t , а обеих моделей — к единому ВБФ $\mathbf{T}_n(t)$. Составим невырожденную матрицу линейного преобразования $\mathbf{T}_n(\tau)=\mathbf{D}_n(m,s)\mathbf{T}_n(t)$ в шкалу параметра t из шкалы масштабированного и смещенного параметра $\tau=mt+s$:

$$\begin{bmatrix} 1 \\ mt+s \\ (mt+s)^2 \\ \vdots \\ (mt+s)^n \end{bmatrix} = \mathbf{D}_n(m,s) \begin{bmatrix} 1 \\ t \\ t^2 \\ \vdots \\ t^n \end{bmatrix} \Rightarrow \mathbf{D}_n(m,s) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ s & m & 0 & \dots & 0 \\ s^2 & 2ms & m^2 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s^n & C_n^1 m s^{n-1} & C_n^2 m^2 s^{n-2} & \dots & m^n \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Она обладает следующими свойствами:

- матрица $\mathbf{D}_n(1,0)=\mathbf{E}_{n+1}$ — единичная;
- матрица обратного преобразования $t=(\tau-s)/m$ равна $\mathbf{D}_n(m,s)^{-1}=\mathbf{D}_n(m^{-1},-sm^{-1})$;
- цепочка преобразований параметров $t_1=m_1t+s_1$ и $t_2=m_2t_1+s_2=m_1m_2t+m_2s_1+s_2$ выполняется произведением матриц $\mathbf{D}_n(m_2,s_2)\mathbf{D}_n(m_1,s_1)=\mathbf{D}_n(m_1m_2,m_2s_1+s_2)$.

Подстановкой в (5) нужных аргументов формируются матрицы \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 преобразований ВБФ $\mathbf{T}_n(t_1)=\mathbf{M}_1\mathbf{T}_n(t)$ и $\mathbf{T}_n(t_2)=\mathbf{M}_2\mathbf{T}_n(t)$ в единичную шкалу $t \in [0,1]$. Совмещая равношальные модели $\mathbf{p}_n(t)$, получим уравнение, решением которого является узловая матрица конгруэнтной модели:

$$\mathbf{U}_1\mathbf{H}_1\mathbf{M}_1=\mathbf{U}_2\mathbf{H}_2\mathbf{M}_2 \Rightarrow \mathbf{U}_2=\mathbf{U}_1\mathbf{H}_1\mathbf{M}\mathbf{H}_2^{-1}, \text{ где } \mathbf{M}=\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2^{-1}. \quad (6)$$

Применим метод (6) в расчете различных элементов моделей полиномиальных линий.

1. В задаче преобразования параметрической шкалы $t_1 \in [a_1, b_1] \Rightarrow t_2 \in [a_2, b_2]$ из соотношений $t_i=(b_i-a_i)t+a_i \quad \forall i=\overline{1,2}$ следуют матрицы $\mathbf{M}_i=\mathbf{D}_n(b_i-a_i, a_i)$. Тогда при неизменной матрице \mathbf{U} в (6) получаем

$$\mathbf{H}_2=\mathbf{H}_1\mathbf{M}_1\mathbf{M}_2^{-1}=\mathbf{H}_1\mathbf{M}, \text{ где } \mathbf{M}=\mathbf{D}_n(b_1-a_1, a_1)\mathbf{D}_n(b_2-a_2, a_2)^{-1}. \quad (7)$$

К примеру, в (2) дан алгоритм расчета матрицы \mathbf{H}_1 бинарного разложения интерполяционного полинома $\mathbf{p}_n(t_1)=\mathbf{U}\mathbf{H}_1\mathbf{T}_n(t_1)$ в нормализованной шкале $t_1=nt \in [0,n]$. Перейдя в единичную шкалу $t_2 \equiv t \in [0,1]$ с помощью матрицы $\mathbf{M}=\mathbf{D}_n(n,0)\mathbf{D}_n(1,0)^{-1}=\mathbf{D}_n(n,0)$, получим модель $\mathbf{p}_n(t)=\mathbf{U}\mathbf{H}_2\mathbf{T}_n(t)$ с матрицей $\mathbf{H}_2=\mathbf{H}_1\mathbf{D}_n(n,0)$. Возьмем нормализованную параболу

$$\mathbf{p}_2(t_1)=(1-1.5t_1+0.5t_1^2)\mathbf{u}_0+(2t_1-t_1^2)\mathbf{u}_1+(-0.5t_1+0.5t_1^2)\mathbf{u}_2 \quad \forall t_1 \in [0,2],$$

проходящую через три точки $\mathbf{u}_0=\mathbf{p}_2(0)$, $\mathbf{u}_1=\mathbf{p}_2(1)$ и $\mathbf{u}_2=\mathbf{p}_2(2)$. Ее матрица \mathbf{H}_1 составляется, как видно далее, из коэффициентов весовых функций этих узловых точек. Нормировка шкалы дает следующие матрицу и модель параболы $\mathbf{p}_2(t)$:

$$\mathbf{H}_2=\mathbf{H}_1\mathbf{D}_2(2,0)=\begin{bmatrix} 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -3 & 2 \\ 0 & 4 & -4 \\ 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$\mathbf{p}_2(t)=(1-3t+2t^2)\mathbf{u}_0+(4t-4t^2)\mathbf{u}_1+(-t+2t^2)\mathbf{u}_2 \quad \forall t \in [0,1].$$

Проверка $\mathbf{p}_2(0)=\mathbf{u}_0$, $\mathbf{p}_2(0.5)=\mathbf{u}_1$ и $\mathbf{p}_2(1)=\mathbf{u}_2$ убеждает, что после нормировочного сжатия шкалы t_1 полином $\mathbf{p}_2(t)$ остался интерполяционным с тем же графиком, что у модели $\mathbf{p}_2(t_1)$.

Может быть полезным и **растяжение** шкалы, например, для перевода единичной шкалы линии Безье $t \in [0,1]$ в интервал $t_2 = nt \in [0,n]$, пропорциональный числу n сегментов ее ХП. Матрица конгруэнтного преобразования равна $\mathbf{M}=\mathbf{D}_n(1,0)\mathbf{D}_n(n,0)^{-1}=\mathbf{D}_n(n^{-1},0)$. Исходя из матрицы \mathbf{H}_1 в (4), получим по (7) матрицу $\mathbf{H}_2=\mathbf{H}_1\mathbf{D}_n(n^{-1},0)$ функции $\mathbf{p}_n(t_2)=\mathbf{U}\mathbf{H}_2\mathbf{T}_n(t_2)$. Есть, скажем, парабола Безье

$$\mathbf{p}_2(t)=(1-t)^2\mathbf{u}_0+2t(1-t)\mathbf{u}_1+t^2\mathbf{u}_2 \quad \forall t \in [0,1]$$

с концевыми точками $\mathbf{u}_0=\mathbf{p}_2(0)$, $\mathbf{u}_2=\mathbf{p}_2(1)$ и матрицей \mathbf{H}_1 . В растянутой шкале $t_2=2t \in [0,2]$ матрица

$$\mathbf{H}_2=\mathbf{H}_1\mathbf{D}_2(0.5,0)=\begin{bmatrix} 1 & -2 & 1 \\ 0 & 2 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.5 & 0 \\ 0 & 0 & 0.25 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0.25 \\ 0 & 1 & -0.5 \\ 0 & -1 & 0.25 \end{bmatrix}$$

нормализованной параболы Безье

$$\mathbf{p}_2(t_2)=(1-t_2+0.25t_2^2)\mathbf{u}_0+(t_2-0.5t_2^2)\mathbf{u}_1+0.25t_2^2\mathbf{u}_2$$

дает те же концевые точки $\mathbf{p}_2(0)=\mathbf{u}_0$ и $\mathbf{p}_2(2)=\mathbf{u}_2$.

2. Теперь рассмотрим ряд задач **преобразования типа** полиномиальной линии. Эта операция полезна в редакторе линий для оперативного перехода к модели другого типа, в которой конструирование желаемой формы более удобно. Может быть также полезным отображение одновременно двух полилиний \mathbf{U}_1 и \mathbf{U}_2 , связанных первым уравнением в (6). Известно, например, что интерполяционный полином высокой степени имеет большие меж-узловые осцилляции, далеко выходящие из области расположения вершин узловой полилинии. В то же время линия Безье всегда лежит в выпуклой оболочке вершин своей ХП. Вывод на экран области гарантированного расположения интерполяционной линии позволит сделать ее интерактивное редактирование более осмысленным.

Переходы между **интерполяционной** моделью $\mathbf{p}_n(t_{\text{и}})=\mathbf{U}_{\text{и}}\mathbf{H}_{\text{и}}\mathbf{T}_n(t_{\text{и}})$ в шкале $t_{\text{и}}=nt \in [0,n]$ с матрицами $\mathbf{U}_{\text{и}}$ и $\mathbf{H}_{\text{и}}$ из (2) и **эрмитовой** моделью $\mathbf{p}_n(t_{\text{э}})=\mathbf{U}_{\text{э}}\mathbf{H}_{\text{э}}\mathbf{T}_n(t_{\text{э}})$ в другой шкале $t_{\text{э}}=(n-2)t \in [0,n-2]$ с матрицами $\mathbf{U}_{\text{э}}$ и $\mathbf{H}_{\text{э}}$ из (3) осуществляются с помощью матриц $\mathbf{M}_{\text{иэ}}=\mathbf{D}_n(n,0)$ и $\mathbf{M}_{\text{эи}}=\mathbf{D}_n(n-2,0)$ следующим образом:

$$\mathbf{U}_{\text{э}}=\mathbf{U}_{\text{и}}\mathbf{H}_{\text{и}}\mathbf{M}_{\text{иэ}}\mathbf{H}_{\text{э}}^{-1}, \quad \text{где } \mathbf{M}_{\text{иэ}}=\mathbf{M}_{\text{иэ}}^{-1}=\mathbf{D}_n(n/(n-2),0);$$

$$\mathbf{U}_{\text{и}}=\mathbf{U}_{\text{э}}\mathbf{H}_{\text{э}}\mathbf{M}_{\text{эи}}\mathbf{H}_{\text{и}}^{-1}, \quad \text{где } \mathbf{M}_{\text{эи}}=\mathbf{M}_{\text{эи}}^{-1}=\mathbf{D}_n((n-2)/n,0).$$

Оба преобразования работают при степени полинома $n \geq 3$. Возьмем, например, кубический ($n=3$) интерполяционный полином с матрицами $\mathbf{U}_{\text{и}}$ и $\mathbf{H}_{\text{и}}$ из (2) и найдем с помощью матрицы $\mathbf{M}_{\text{иэ}}=\mathbf{D}_3(3,0)$ узловую матрицу $\mathbf{U}_{\text{э}}$ конгруэнтного эрмитова полинома вида (3):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{э}} & \mathbf{u}_1^{\text{э}} & \mathbf{v}_0^{\text{э}} & \mathbf{v}_1^{\text{э}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{и}} & \mathbf{u}_1^{\text{и}} & \mathbf{u}_2^{\text{и}} & \mathbf{u}_3^{\text{и}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & 1 & 8 & 27 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{и}} & \mathbf{u}_3^{\text{и}} & \frac{-11\mathbf{u}_0^{\text{и}}+18\mathbf{u}_1^{\text{и}}-9\mathbf{u}_2^{\text{и}}+2\mathbf{u}_3^{\text{и}}}{2} & \frac{-2\mathbf{u}_0^{\text{и}}+9\mathbf{u}_1^{\text{и}}-18\mathbf{u}_2^{\text{и}}+11\mathbf{u}_3^{\text{и}}}{2} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Аналогично выполняется обратное преобразование $\mathbf{U}_{\text{э}} \Rightarrow \mathbf{U}_{\text{и}}$ (рис. 1, а):

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{и}} & \mathbf{u}_1^{\text{и}} & \mathbf{u}_2^{\text{и}} & \mathbf{u}_3^{\text{и}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{э}} & \mathbf{u}_1^{\text{э}} & \mathbf{V}_0^{\text{э}} & \mathbf{V}_1^{\text{э}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 1 & 0 & 3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1/3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1/27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & 1 & 8 & 27 \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{э}} & \frac{20\mathbf{u}_0^{\text{э}}+7\mathbf{u}_1^{\text{э}}+4\mathbf{V}_0^{\text{э}}-2\mathbf{V}_1^{\text{э}}}{27} & \frac{7\mathbf{u}_0^{\text{э}}+20\mathbf{u}_1^{\text{э}}+2\mathbf{V}_0^{\text{э}}-4\mathbf{V}_1^{\text{э}}}{27} & \mathbf{u}_1^{\text{э}} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Изображение векторов $\mathbf{V}_0^{\text{э}}$ и $\mathbf{V}_1^{\text{э}}$ (для компактности они укорочены в пять раз) дополнительно к узловой сетке $\mathbf{U}_{\text{и}}$ позволяет оценить концевые направления интерполяционной линии еще до ее построения.

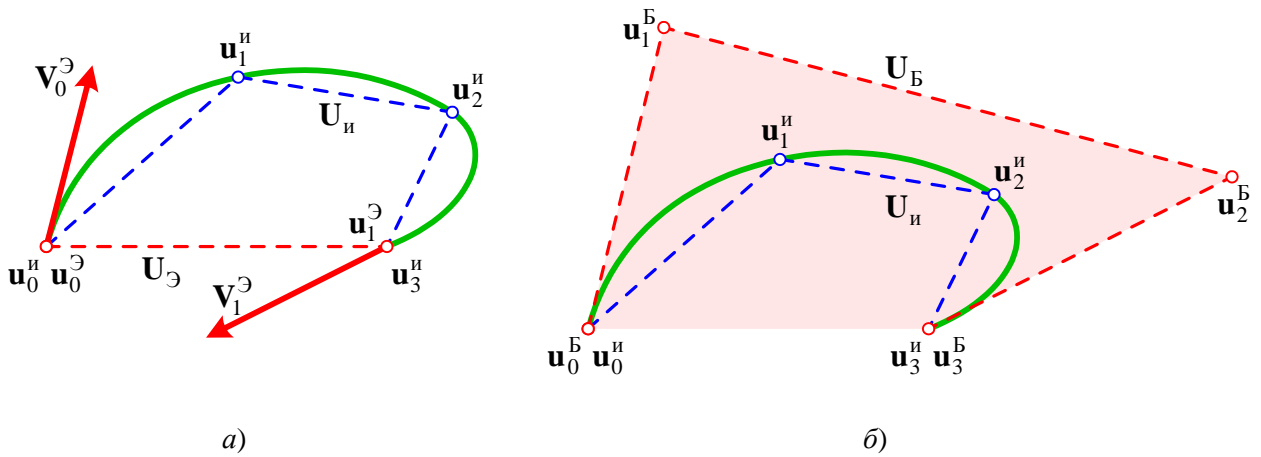


Рис. 1. Конгруэнтные преобразования типов линии

Для переходов между моделями интерполяционной линии $\mathbf{p}_n(t) = \mathbf{U}_{\text{и}} \mathbf{H}_{\text{и}} \mathbf{T}_n(t) \forall t_{\text{и}} \in [0, n]$ и линии Безье $\mathbf{p}_n(t) = \mathbf{U}_{\text{Б}} \mathbf{H}_{\text{Б}} \mathbf{T}_n(t) \forall t \in [0, 1]$ нужны матрицы $\mathbf{M}_{\text{иБ}} = \mathbf{D}_n(n, 0)$ и $\mathbf{M}_{\text{Би}} = \mathbf{D}_n(n^{-1}, 0)$:

$$\mathbf{U}_{\text{Б}} = \mathbf{U}_{\text{и}} \mathbf{H}_{\text{и}} \mathbf{D}_n(n, 0) \mathbf{H}_{\text{Б}}^{-1}, \quad \mathbf{U}_{\text{и}} = \mathbf{U}_{\text{Б}} \mathbf{H}_{\text{Б}} \mathbf{D}_n(n^{-1}, 0) \mathbf{H}_{\text{и}}^{-1}.$$

Результат преобразования $\mathbf{U}_{\text{и}} \Rightarrow \mathbf{U}_{\text{Б}}$ показан на рис. 1, б, где из узловой полилинии $\mathbf{u}_0^{\text{и}} \mathbf{u}_1^{\text{и}} \mathbf{u}_2^{\text{и}} \mathbf{u}_3^{\text{и}}$ порядка $n=3$ получена ХП $\mathbf{u}_0^{\text{Б}} \mathbf{u}_1^{\text{Б}} \mathbf{u}_2^{\text{Б}} \mathbf{u}_3^{\text{Б}}$ линии Безье и построена ее выпуклая оболочка:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{Б}} & \mathbf{u}_1^{\text{Б}} & \mathbf{u}_2^{\text{Б}} & \mathbf{u}_3^{\text{Б}} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{и}} & \mathbf{u}_1^{\text{и}} & \mathbf{u}_2^{\text{и}} & \mathbf{u}_3^{\text{и}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & 1 & 8 & 27 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 \\ 0 & 3 & -6 & 3 \\ 0 & 1 & 3 & -3 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^{\text{и}} & \frac{-5\mathbf{u}_0^{\text{и}}+18\mathbf{u}_1^{\text{и}}-9\mathbf{u}_2^{\text{и}}+2\mathbf{u}_3^{\text{и}}}{6} & \frac{2\mathbf{u}_0^{\text{и}}-9\mathbf{u}_1^{\text{и}}+18\mathbf{u}_2^{\text{и}}-5\mathbf{u}_3^{\text{и}}}{6} & \mathbf{u}_3^{\text{и}} \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3. Рассмотрим, наконец, задачу преобразования порядка полиномиальной линии, определяющего степень ее полинома n и размер узловой матрицы \mathbf{U} . Изменение порядка возможно как в сторону повышения, так и понижения, но всегда фактическая степень полинома остается неизменной. Понять это явление помогают два простых примера:

- фактическая степень $n=1$ полинома $p_n(t)=1+2t$ может быть повышена до любой формальной степени $n'>n$, при которой линия $p_{n'}(t)=1+2t+0t^2+\dots+0t^{n'}$ задается $n'+1$ -й точкой, лежащей на одной прямой;
- формальная степень $n \geq 2$ полинома $p_n(t)=3t+0t^2+\dots+0t^n$ понижается до фактической степени $n'=1$, при которой линия $p_{n'}(t)=3t$ определяется всего двумя точками.

Отсюда видно, что понижение формального порядка полиномиальной линии возможно

лишь при особом расположении узловых точек, создающем хотя бы один нулевой старший коэффициент полинома. Порядок полиномиальной линии можно понизить на число последних нулевых коэффициентов, называемое дефектом степени полинома. Повышение же порядка возможно на любое число, но при этом дефект степени появляется либо увеличивается.

Все сказанное эквивалентно тому, что преобразование $n \Rightarrow n'$ порядка ВБФ

$$\mathbf{T}_n(t) = \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{T}_{n'}(t), \quad (9)$$

записанное с помощью $(n+1) \times (n'+1)$ -матрицы $\mathbf{E}_{n+1, n'+1}$ с элементами $e_{ii} = 1 \ \forall i = \overline{1, \min\{n, n'\} + 1}$ и $e_{ij} = 0 \ \forall i \neq j$, при $n < n'$ (в сторону увеличения порядка) осуществимо всегда, так как

$$\begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ t^n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & 1 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \vdots \\ t^n \\ \vdots \\ t^{n'} \end{bmatrix},$$

а при $n > n'$ (в сторону уменьшения порядка) лишь при фактической незначимости в полиноме $\mathbf{p}_n(t) = \mathbf{U} \mathbf{H} \mathbf{T}_n(t)$ степеней $t^{n'+1} \div t^n$, когда матрица коэффициентов $\mathbf{S} = \mathbf{U} \mathbf{H} = [\mathbf{s}_0 \ \dots \ \mathbf{s}_n \ \mathbf{O} \ \dots \ \mathbf{O}]$ имеет $n' - n > 0$ последних нулевых столбцов.

Подставив (9) в преобразование $\mathbf{p}_n(t_1) = \mathbf{U}_1 \mathbf{H}_1 \mathbf{T}_n(t_1) \Rightarrow \mathbf{p}_{n'}(t_2) = \mathbf{U}_2 \mathbf{H}_2 \mathbf{T}_{n'}(t_2)$ общего вида, получим аналогичное (6) уравнение, решением которого является узловая матрица конгруэнтной модели n' -го порядка:

$$\mathbf{U}_1 \mathbf{H}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{E}_{n+1, n'+1} = \mathbf{U}_2 \mathbf{H}_2 \mathbf{M}_2 \Rightarrow \mathbf{U}_2 = \mathbf{U}_1 \mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{H}_2^{-1}, \text{ где } \mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{M}_2^{-1}. \quad (10)$$

Здесь матрицы $\mathbf{M}_1 = \mathbf{D}_n(b_1 - a_1, a_1)$ и $\mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_{n'}(b_2 - a_2, a_2)$ выполняют перевод параметров $t_1 \in [a_1, b_1]$ и $t_2 \in [a_2, b_2]$ в единичную шкалу $t \in [0, 1]$. Заметим, что в [3, (8)] выведена сходная формула конгруэнтного изменения порядка нормированной линии Безье с матрицей $\mathbf{M} = \mathbf{E}_{n+1, n'+1}$, совпадающей с (10) при $\mathbf{M}_1 = \mathbf{E}_{n+1}$ и $\mathbf{M}_2 = \mathbf{E}_{n'+1}$.

В качестве примера преобразуем узловую полилинию $\mathbf{U}_n = \mathbf{u}_0^n \mathbf{u}_1^n \mathbf{u}_2^n \mathbf{u}_3^n$ нормализованной интерполяционной линии порядка $n=3$ (см. рис. 1, а) в ХП $\mathbf{U}_B = \mathbf{u}_0^B \mathbf{u}_1^B \mathbf{u}_2^B \mathbf{u}_3^B \mathbf{u}_4^B \mathbf{u}_5^B$ нормированной линии Безье порядка $n'=5$:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_B &= \mathbf{U}_n \mathbf{H}_n \mathbf{D}_3(3,0) \mathbf{E}_{4,6} \mathbf{H}_B^{-1} = \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^n & \mathbf{u}_1^n & \mathbf{u}_2^n & \mathbf{u}_3^n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 2 & 3 \\ 0 & 1 & 4 & 9 \\ 0 & 1 & 8 & 27 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 9 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 27 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -5 & 10 & -10 & 5 & -1 \\ 0 & 5 & -20 & 30 & -20 & 5 \\ 0 & 0 & 10 & -30 & 30 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & -20 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \mathbf{y} \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^n & \frac{-\mathbf{u}_0^n + 18\mathbf{u}_1^n - 9\mathbf{u}_2^n + 2\mathbf{u}_3^n}{10} & \frac{-6\mathbf{u}_0^n + 27\mathbf{u}_1^n - \mathbf{u}_3^n}{20} & \frac{-\mathbf{u}_0^n + 27\mathbf{u}_2^n - 6\mathbf{u}_3^n}{20} & \frac{2\mathbf{u}_0^n - 9\mathbf{u}_1^n + 18\mathbf{u}_2^n - \mathbf{u}_3^n}{10} & \mathbf{u}_3^n \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

матрицы коэффициентов полинома Безье $\mathbf{p}_5(t) = \mathbf{U}_B \mathbf{H}_B \mathbf{T}_5(t)$ (рис. 2, а)

$$\mathbf{U}_B \mathbf{H}_B = \begin{bmatrix} \mathbf{u}_0^n & \frac{-11\mathbf{u}_0^n + 18\mathbf{u}_1^n - 9\mathbf{u}_2^n + 2\mathbf{u}_3^n}{2} & \frac{18\mathbf{u}_0^n - 45\mathbf{u}_1^n + 36\mathbf{u}_2^n - 9\mathbf{u}_3^n}{2} & \frac{-9\mathbf{u}_0^n + 27\mathbf{u}_1^n - 27\mathbf{u}_2^n + 9\mathbf{u}_3^n}{2} & \mathbf{O} & \mathbf{O} \end{bmatrix}$$

дефект степени равен двум, поэтому формальная степень $n'=5$ может быть понижена до $n'-2=3$ с пересчетом ХП редуцированного полинома Безье $\mathbf{p}'_3(t) = \mathbf{U}'_B \mathbf{H}'_B \mathbf{T}_3(t)$ (рис. 2, б):

$$\begin{aligned}
 & [\mathbf{u}'_0^B \ \mathbf{u}'_1^B \ \mathbf{u}'_2^B \ \mathbf{u}'_3^B] = \mathbf{U}_B \mathbf{H}_B \mathbf{E}_{6,4} \mathbf{H}_B^{-1} = \\
 & = [\mathbf{u}_0^B \ \mathbf{u}_1^B \ \mathbf{u}_2^B \ \mathbf{u}_3^B \ \mathbf{u}_4^B \ \mathbf{u}_5^B] \begin{bmatrix} 1 & -5 & 10 & -10 & 5 & -1 \\ 0 & 5 & -20 & 30 & -20 & 5 \\ 0 & 0 & 10 & -30 & 30 & -10 \\ 0 & 0 & 0 & 10 & -20 & 10 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5 & -5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -3 & 3 & -1 \\ 0 & 3 & -6 & 3 \\ 0 & 0 & 3 & -3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^{-1} = \\
 & = \left[\mathbf{u}_0^B \ \frac{-5\mathbf{u}_0^B + 18\mathbf{u}_1^B - 9\mathbf{u}_2^B + 2\mathbf{u}_3^B}{6} \ \frac{2\mathbf{u}_0^B - 9\mathbf{u}_1^B + 18\mathbf{u}_2^B - 5\mathbf{u}_3^B}{6} \ \mathbf{u}_3^B \right].
 \end{aligned}$$

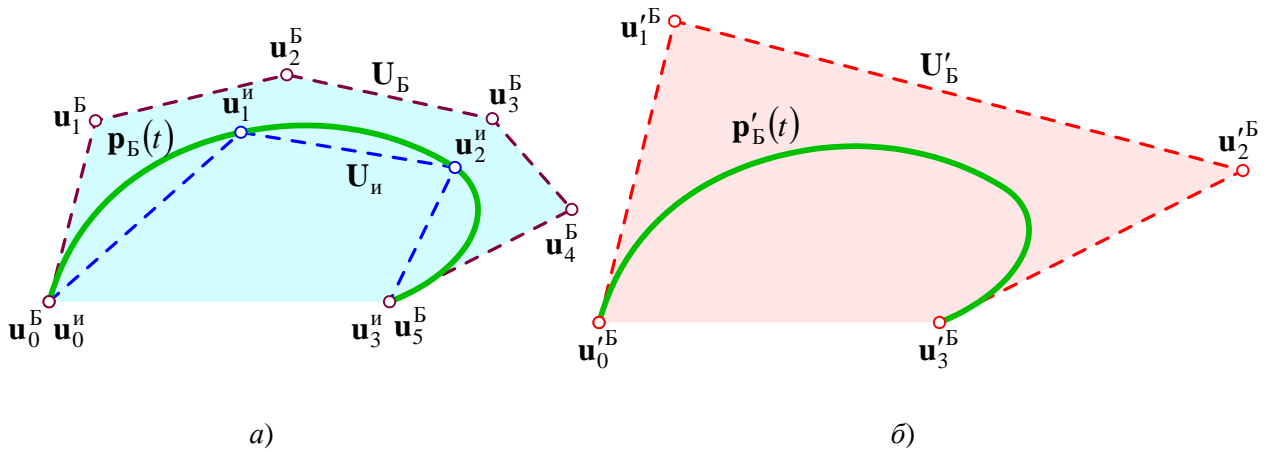


Рис. 2. Конгруэнтные преобразования порядков линии

Преобразования поверхностей

Расширим область применения метода конгруэнтных преобразований на полиномиальные модели поверхностей (интерполяционные, Эрмита, циклические [5], Кунса, Безье [3, 4]), обобщенно представляемые двухпараметрическим бинарным разложением

$$\mathbf{p}_{n,m}(t, \tau) = \mathbf{T}_n^T(t) \mathbf{H}^T \mathbf{U} \mathbf{N} \mathbf{T}_m(\tau) \quad \forall t \in [a, b], \tau \in [\alpha, \beta].$$

Задача преобразования модели $\mathbf{p}_{n,m}(t_1, \tau_1) \Rightarrow \mathbf{p}_{n',m'}(t_2, \tau_2)$ с сохранением формы поверхности решается приведением параметров $\{t_1, \tau_1\}$ и $\{t_2, \tau_2\}$ в единичные шкалы $t, \tau \in [0, 1]$ путем преобразований ВБФ $\mathbf{T}_n(t_1) = \mathbf{M}_1 \mathbf{T}_n(t)$, $\mathbf{T}_{n'}(t_2) = \mathbf{M}_2 \mathbf{T}_{n'}(t)$, $\mathbf{T}_m(\tau_1) = \mathbf{L}_1 \mathbf{T}_m(\tau)$ и $\mathbf{T}_{m'}(\tau_2) = \mathbf{L}_2 \mathbf{T}_{m'}(\tau)$ с помощью матриц $\mathbf{M}_1 = \mathbf{D}_n(b_1 - a_1, a_1)$, $\mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_{n'}(b_2 - a_2, a_2)$, $\mathbf{L}_1 = \mathbf{D}_m(\beta_1 - \alpha_1, \alpha_1)$ и $\mathbf{L}_2 = \mathbf{D}_{m'}(\beta_2 - \alpha_2, \alpha_2)$, а по (9) — к единым порядкам $\{n', m'\}$. Совмещая равношкальные и равнопорядковые модели $\mathbf{p}_{n',m'}(t, \tau)$, получим аналогичное (10) уравнение

$$\mathbf{E}_{n'+1, n'+1} \mathbf{M}_1^T \mathbf{H}_1^T \mathbf{U}_1 \mathbf{N}_1 \mathbf{L}_1 \mathbf{E}_{m'+1, m'+1} = \mathbf{M}_2^T \mathbf{H}_2^T \mathbf{U}_2 \mathbf{N}_2 \mathbf{L}_2, \tag{11}$$

в решениях которого далее будут использованы матрицы

$$\begin{aligned}
 \mathbf{M} &= \mathbf{M}_1 \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{M}_2^{-1} = \mathbf{D}_n(b_1 - a_1, a_1) \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{D}_{n'}(b_2 - a_2, a_2)^{-1}, \\
 \mathbf{L} &= \mathbf{L}_1 \mathbf{E}_{m+1, m'+1} \mathbf{L}_2^{-1} = \mathbf{D}_m(\beta_1 - \alpha_1, \alpha_1) \mathbf{E}_{m+1, m'+1} \mathbf{D}_{m'}(\beta_2 - \alpha_2, \alpha_2)^{-1}.
 \end{aligned} \tag{12}$$

1. В задаче преобразования параметрических шкал $t_1 \in [a_1, b_1] \Rightarrow t_2 \in [a_2, b_2]$ и $\tau_1 \in [\alpha_1, \beta_1] \Rightarrow \tau_2 \in [\alpha_2, \beta_2]$ при равных матрицах $\mathbf{U}_1 = \mathbf{U}_2$ и порядках $n = n', m = m'$ из (11) и (12) следуют аналогичные (7) формулы пересчета матриц бинарного разложения:

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{H}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^{-1}, \quad \mathbf{N}_2 = \mathbf{N}_1 \mathbf{L}_1 \mathbf{L}_2^{-1}.$$

Переведем, например, нормализованную модель гиперболического параболоида (рис. 3)

$$\mathbf{p}_{2,2}(t_1, \tau_1) = [t_1 - 1 \quad t_1^2 - 2t_1 + 2\tau_1 - \tau_1^2 \quad t_1 - 1] \quad \forall t_1, \tau_1 \in [0, 2]$$

с порядками $n=m=2$ и матрицами $\mathbf{H}_1 = \mathbf{N}_1$ из (8) в произвольные симметричные шкалы $t_2, \tau_2 \in [-1, 1]$ с теми же порядками $n'=m'=2$:

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{L}_1 = \mathbf{D}_2(2, 0) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{M}_2 = \mathbf{L}_2 = \mathbf{D}_2(2, -1) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 1 & -4 & 4 \end{bmatrix},$$

$$\mathbf{H}_2 = \mathbf{N}_2 = \begin{bmatrix} 1 & -1.5 & 0.5 \\ 0 & 2 & -1 \\ 0 & -0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & 0 \\ 0 & 0 & 4 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -1 & 2 & 0 \\ 1 & -4 & 4 \end{bmatrix}^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix}.$$

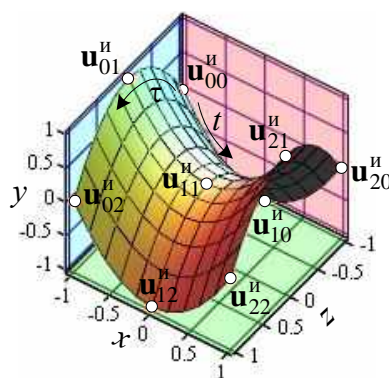


Рис. 3. Конгруэнтное преобразование шкал

В результате конгруэнтная модель той же поверхности принимает вид

$$\begin{aligned} \mathbf{p}_{2,2}(t_2, \tau_2) &= \\ &= \begin{bmatrix} 1 & t_2 & t_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ -0.5 & 0 & 0.5 \\ 0.5 & -1 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [-1 & 0 & -1] & [-1 & 1 & 0] & [-1 & 0 & 1] \\ [0 & -1 & -1] & [0 & 0 & 0] & [0 & -1 & 1] \\ [1 & 0 & -1] & [1 & 1 & 0] & [1 & 0 & 1] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 & -0.5 & 0.5 \\ 1 & 0 & -1 \\ 0 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ \tau_2 \\ \tau_2^2 \end{bmatrix} = \\ &= [t_2 \quad t_2^2 - \tau_2^2 \quad \tau_2] \end{aligned}$$

2. В задаче **преобразования типа** полиномиальной поверхности (у каждого типа свои параметрические шкалы, узловая матрица \mathbf{U} и метод вычисления матриц \mathbf{H} и \mathbf{N}) из уравнения (11) с разными матрицами $\mathbf{U}_1 \neq \mathbf{U}_2$, но одинаковыми порядками $n=n'$ и $m=m'$, получаем

$$\mathbf{U}_2 = (\mathbf{H}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{H}_2^{-1})^T \mathbf{U}_1 (\mathbf{N}_1 \mathbf{L}_1 \mathbf{L}_2^{-1} \mathbf{N}_2^{-1}) = (\mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{H}_2^{-1})^T \mathbf{U}_1 (\mathbf{N}_1 \mathbf{L} \mathbf{N}_2^{-1}). \quad (13)$$

Заметим, что в [3, (12)] выведена сходная формула конгруэнтного изменения порядков $n \Rightarrow n'$ и $m \Rightarrow m'$ поверхности Безье с матрицами $\mathbf{M} = \mathbf{E}_{n+1, n'+1}$ и $\mathbf{L} = \mathbf{E}_{m+1, m'+1}$, совпадающими с (12) при всех единичных матрицах

$$\mathbf{M}_1 = \mathbf{D}_n(1, 0) = \mathbf{E}_{n+1}, \quad \mathbf{M}_2 = \mathbf{D}_{n'}(1, 0) = \mathbf{E}_{n'+1}, \quad \mathbf{L}_1 = \mathbf{D}_m(1, 0) = \mathbf{E}_{m+1}, \quad \mathbf{L}_2 = \mathbf{D}_{m'}(1, 0) = \mathbf{E}_{m'+1}.$$

Конгруэнтное преобразование одной полиномиальной модели поверхности в другую равнопорядковую модель производится подстановкой в (13) матриц $\{\mathbf{U}_1, \mathbf{H}_1, \mathbf{N}_1, \mathbf{M}_1, \mathbf{L}_1\}$ и

$\{\mathbf{U}_2, \mathbf{H}_2, \mathbf{N}_2, \mathbf{M}_2, \mathbf{L}_2\}$, соответствующих типам поверхностей и их шкалам. Результаты трех преобразований показаны на рис. 4: в верхнем ряду заданы узловые сети интерполяционных моделей (в центре – эрмитова), а в нижнем ряду построены характеристические сети Безье.

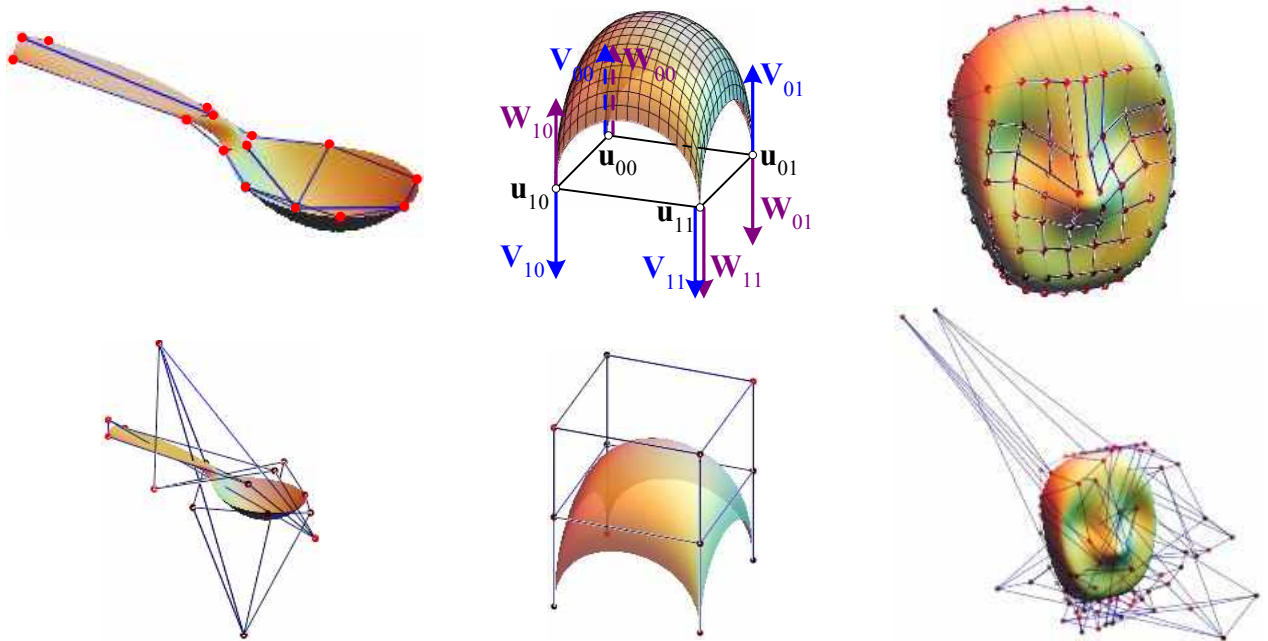


Рис. 4. Конгруэнтные преобразования типов поверхностей

3. Ну и наконец, общая задача конгруэнтного преобразования модели полиномиальной поверхности $\mathbf{p}_{n,m}(t_1, \tau_1) \Rightarrow \mathbf{p}_{n',m'}(t_2, \tau_2)$, включая пересчет узловой матрицы $\mathbf{U}_1 \Rightarrow \mathbf{U}_2$ и преобразования порядков $n \Rightarrow n'$ и $m \Rightarrow m'$, имеет похожее на (13) решение

$$\mathbf{U}_2 = (\mathbf{H}_1 \mathbf{M}_1 \mathbf{E}_{n+1, n'+1} \mathbf{M}_2^{-1} \mathbf{H}_2^{-1})^T \mathbf{U}_1 (\mathbf{N}_1 \mathbf{L}_1 \mathbf{E}_{m+1, m'+1} \mathbf{L}_2^{-1} \mathbf{N}_2^{-1}) = (\mathbf{H}_1 \mathbf{M} \mathbf{H}_2^{-1})^T \mathbf{U}_1 (\mathbf{N}_1 \mathbf{L} \mathbf{N}_2^{-1})$$

с матрицами \mathbf{M} и \mathbf{L} из (12).

Изменение каждого порядка n и / или m возможно как в сторону повышения, так и понижения, но всегда **фактические степени полинома остаются неизменными**. Повышение одного или обоих порядков модели создает в узловой сети \mathbf{U}_2 избыточное количество вершин, позволяющее путем их перемещения повысить изгибаемость поверхности, недостижимую при меньших порядках.

Работа алгоритма изменения порядков характеристической сети поверхности Безье проиллюстрирована на рис. 5:

- исходная поверхность (а) порядков $n=4$ и $m=3$ построена на сетке размера 5×4 узлов и имеет в матрице коэффициентов $\mathbf{S} = \mathbf{H}^T \mathbf{U} \mathbf{N}$ одну нижнюю нулевую строку. Это означает, что степень n имеет дефект, равный 1, а фактический t -порядок полинома $\mathbf{p}_{4,3}(t, \tau)$ составляет $n' = n - 1 = 3$;
- возможность уменьшения формального порядка $n=4$ до фактического $n'=3$ подтверждает конгруэнтная поверхность (б), построенная на сетке минимальной узловой размерности 4×4 . Матрица коэффициентов такой поверхности не имеет нулевых последних ни строк, ни столбцов, и ни один из порядков не может быть понижен;
- третья конгруэнтная поверхность (в) демонстрирует возможность одновременного понижения у поверхности (а) формального t -порядка $n=4$ до фактического значения $n'=3$ и повышения τ -порядка $m=3$ до формального $m'=6$ с дефектом степени $m' - m = 3$.

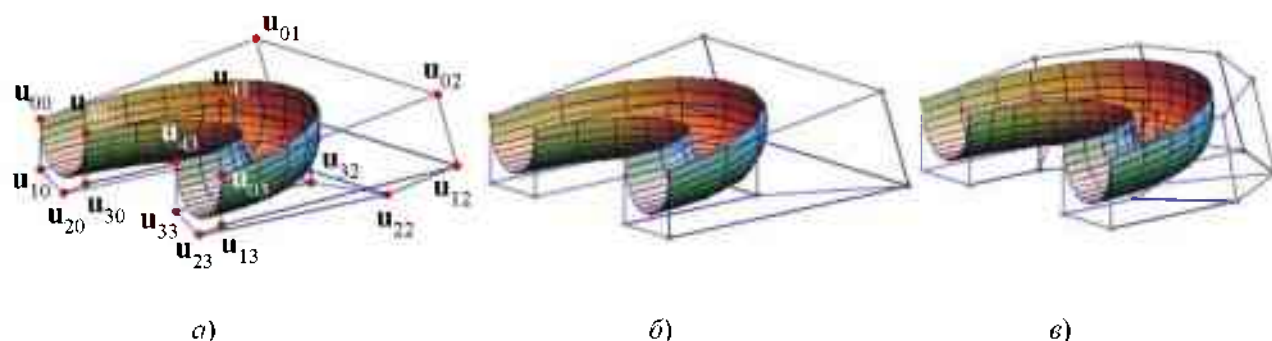


Рис. 5. Конгруэнтные изменения порядков поверхности Бэзье

В результате предпринятых усилий разработан универсальный алгоритм конгруэнтного, не изменяющего форму объекта, преобразования параметрических шкал, типов и порядков полиномиальных линий и поверхностей. Обозначены условия, при которых становится возможным понижение порядков полиномов до минимально возможных значений.

Библиографический список

1. Никулин, Е.А. Построение составных линий с различными свойствами сопряжения и произвольными условиями фиксации сегментов // Информационные технологии: тр. НГТУ / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2006. Т. 58. Вып. 11. С. 5–12.
2. Никулин, Е.А. Прямой параметрический синтез сплайновых линий // Системы обработки информации и управления: тр. НГТУ / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2007. Т. 65. Вып. 14. С. 123–130.
3. Никулин, Е.А. Новый метод изменения порядков кривых и поверхностей Бэзье // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2011. №1 (86). С. 70–71.
4. Никулин, Е.А. Матричные методы рекластеризации составных объектов Бэзье // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2012. №2 (95). С. 92–101.
5. Никулин, Е.А. О разрешимости задачи циклической интерполяции // Труды Нижегород. гос. техн. ун-та им. Р.Е. Алексеева / Нижегород. гос. техн. ун-т. – Н. Новгород, 2014. №1 (103). С. 59–65.

Дата поступления
в редакцию 27.06.2014

E.A. Nikulin

CONGRUENT TRANSFORMATION OF POLYNOMIAL MODELS

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

Subject: Design of methods of congruent transformations polynomial models.

Purpose: Development of matrix algorithms transformations of lines and surfaces.

Methodology: Bringing different polynomial models of a single scale and orders.

Originality: Block approach is used for congruent transformations.

Findings: Algorithms for transformation models of curves and surfaces while maintaining their shape are obtained.

Key words: congruence, transformation, polynome, matrix.

УДК: 654.078

А.В. Березин

РАЗРАБОТКА МУЛЬТИАГЕНТНОЙ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА СЕТЕВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Статья посвящена разработке мультиагентной системы мониторинга сетевого оборудования, описаны методы и принципы, которые были использованы при работе над системой мониторинга, представлено описание создаваемой системы.

Ключевые слова: мультиагентный, мониторинг, сеть, гетерогенный.

Вендоры сетевого оборудования стараются сделать свой продукт уникальным, даже если функционал у устройств разных производителей один и тот же, у них различается система команд и идентификаторы OID. Развитие информационных технологий подразумевает под собой не только возможность собирать и накапливать информацию, но и осуществлять ее анализ, делая на основании его результатов конкретные выводы, полезные для соответствующей отрасли, чего не могут дать большинство из существующих сейчас на рынке систем мониторинга [1], что, в свою очередь, переходит в обязанности сетевых инженеров и системных администраторов, делая их труд напряженным, однообразным и утомительным.

Гетерогенная сеть, т.е. сеть, где используется оборудование различных вендоров, является типичной для среднего и крупного бизнеса в России. Проблемой является то, что ни одна из существующих сегодня систем мониторинга (NMS) не может дать рекомендаций по возможной проблемной ситуации, поэтому требуется их интеллектуализировать.

Теоретический анализ

Типовые задачи, решаемые системой мониторинга:

- сбор информации с сетевого оборудования;
- обработка и хранение собранных данных;
- анализ данных на наличие отклонений;
- выдача рекомендаций при наличии зафиксированных отклонений.

Для их решения предлагается использовать средства интеллектуальной поддержки принятия решения, а для описания предметной области - универсальный аппарат фреймов, который совместно с протоколом SNMP позволяет автоматизировать синтез средств интеллектуальной поддержки.

Фреймовая модель для системы мониторинга имеет следующий вид (рис. 1).

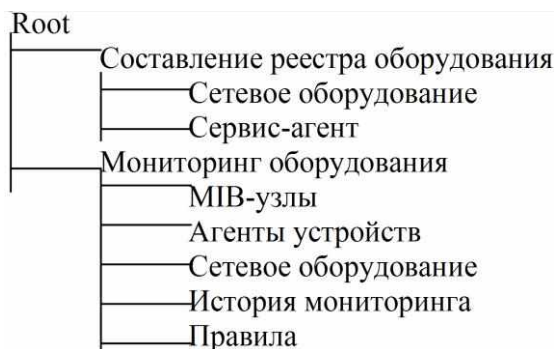


Рис. 1. Иерархия фреймов

В табл. 1 представлен пример структуры фрейма.

Таблица 1

Структура фрейма «Опрос оборудования»

Имя слота	Значение слота	Домен	Дескриптор
Имя фрейма: Опрос оборудования			
Слот 1: IP адрес устройства	сетевой адрес устройства	автоматический опрос устройства на предмет наличия его IP адреса	при выполнении этого условия передается управление во 2 слот
Слот 2: DNS имя устройства	имя, присвоенное устройству	автоматический опрос устройства на предмет наличия его DNS имени	при получении данного значения выполняется слот 3
Слот 3: ID устройства	идентификатор устройства	автоматические назначение идентификатора	после выполнения этого условия передается управление слоту 4
Слот 4: ID модели устройства	идентификатор модели устройства	автоматическое присвоение сетевому оборудованию идентификатора модели	
Дескриптор: собрать информацию об устройстве			

При возникновении ситуации, когда невозможно получить данные по слоту 1, управление передается другому фрейму – поиск оборудования.

Фреймовая модель описывает типовые ситуации, возникающие при решении типовых задач мониторинга, которые описаны с помощью сценариев.

Противоречия, характерные для систем мониторинга сети:

- неуниверсальность систем мониторинга: каждая компания создает свой собственный программный продукт, который не может быть перенесен в другую корпоративную среду [2];
- отсутствие стандарта в контролируемых параметрах: есть некоторый небольшой повторяющийся во всех системах мониторинга набор параметров, который дополнительно расширяется другими параметрами, которые добавляются по желанию разработчиков или заказчиков [3];
- пассивный сбор данных: система мониторинга формирует определенную статистику, но не может указать на причину, по которой возникают сбои, а также не может дать рекомендаций по их устранению.

Данная работа посвящена проблеме создания основы, базы для интеллектуализации систем мониторинга сетей.

Система мониторинга подразумевает зависимость от человека, который может не только следить за ней, но и вмешиваться в ее работу. Такое вмешательство не всегда производится квалифицированным или уполномоченным на то персоналом, что может нарушить работу самой системы. Чтобы этого избежать, необходимо, чтобы система мониторинга могла работать в полуавтономном режиме как экспертная система, могла сама давать необходимые рекомендации.

При построении систем управления и мониторинга в режиме реального времени каждый практик неизбежно сталкивается с проблемой построения аппарата ситуационного опи-

сания [4] и интерфейса, который наглядно отображает ситуации в предметной области функционирования АС.

Свойства корпоративных компьютерных сетей:

- гетерогенность [5];
- изменчивость параметров во времени;
- изменчивость каталога установленных устройств;
- модифицируемость и расширяемость.

В данной работе предложена модель фреймового представления объектов при проектировании информационного обеспечения системы мониторинга процессов корпоративной IP-сети, отличающаяся легкой расширяемостью и модифицируемостью, подстраиваясь таким образом под различные условия использования.

Как показали исследования, данная модель характеризуется высоким уровнем универсальности и легко переносима с одной предметной области на другую. Система мониторинга состоит из двух частей: статическое ядро, переносимое с одной NMS на другую, и подсистемы взаимодействия с окружающей средой, которая требует адаптации для каждой конкретной сетевой структуры. Такого типа адаптация заключается в том, что система мониторинга настраивается на конкретные модели и параметры оборудования. В ядро входит вся логика работы программы: экспертная система, система управления агентами, база знаний, база данных, фреймовая подсистема, «скелеты» агентов.

Фрейм любого вида – это та минимально необходимая структурированная информация, которая однозначно определяет данный класс объектов. Наличие фрейма позволяет относить объект к тому классу, который им определяется [6].

Фрейм является структурой данных для представления стереотипной ситуации. С каждым фреймом ассоциирована информация разных видов. Одна ее часть указывает, каким образом следует использовать данный фрейм, другая – что предположительно может повлечь за собой его выполнение, третья – что следует предпринять, если эти ожидания не подтвердятся [6].

Фреймовая модель – инструментарий концептуального проектирования БД – информационного обеспечения: фрейм с именем «Опрос оборудования» определяет состав таблицы «Устройство»; «Сбор csv лог-файлов» – «Правила csv агента», «SNMP» – «Модель устройства», «Конкретизация вендора» – «MIB устройства», «Настройка агента» – «Агент устройства», «Выделение необходимой информации» – «MIB модели устройства», «Анализ значений» – «История параметров устройства», «Обращение к БЗ для поиска соответствующего решения» – «Правила для агентов», «Запись истории мониторинга» – история мониторинга.

Методика

Для мониторинга и управления сетями для стека TCP/IP создано два протокола: SNMP (Simple Network Management Protocol) [7, 8, 9, 10] и CMOT (Common Management information protocol Over TCP) [11]. В последнее время применение протокола CMOT ограничено [12]. Обычно управляющая прикладная программа воздействует на сеть по цепочке SNMP-UDP-IP-Ethernet [12].

Основной концепцией протокола SNMP является то, что вся необходимая для управления устройством информация хранится на самом устройстве – коммутаторе, маршрутизаторе и т.п. – в так называемой базе данных информации управления (MIB – Management Information Base).

Существует несколько стандартов на базы данных управляющей информации для протокола SNMP. Основные – стандарты MIB-I [13], MIB-II [14] и версия базы данных для удаленного управления RMON MIB [15]. Кроме этого существуют стандарты для специальных устройств MIB конкретного типа (например, MIB для концентраторов или MIB для модемов), а также частные MIB конкретных фирм-производителей оборудования.

Спецификация MIB-I определяла только операции чтения значений переменных. Операции изменения или установки значений объекта являются частью спецификаций MIB-II. Версия MIB-I определяет 114 объектов, которые подразделяются на 8 групп.

В версии MIB-II был существенно (до 185) расширен набор стандартных объектов, а число групп увеличилось до десяти.

База данных MIB-II не дает легальной статистики по характерным ошибкам кадров Ethernet, что впоследствии было реализовано в новом стандарте RMON MIB [15], который специально ориентирован на сбор детальной статистики по протоколу Ethernet.

Основной элемент любой системы управления сетью – схема взаимодействия «менеджер–агент–управляемый объект» [16]. Агент наполняет MIB управляемого объекта текущими значениями его характеристик, а менеджер извлекает данные из MIB. Таким образом, агент является посредником между управляемым объектом и менеджером располагающимся, обычно, на отдельной станции сетевого управления (NMS – Network Management Station). Агент предоставляет менеджеру только те данные, которые предусматриваются MIB. Узнать MIB, поддерживаемые устройством, можно из его документации.

SNMP, как непосредственно сетевой протокол, предоставляет только набор команд для работы с переменными MIB.

Для именованной переменной базы MIB и однозначного определения их форматов используется дополнительная спецификация, называемая SMI – Structure of Management Information.

При описании переменных MIB и форматов протокола SNMP спецификация SMI опирается на формальный язык ASN.1, принятый ISO в качестве нотации для описания терминов коммуникационных протоколов. Имена переменных MIB могут быть записаны как в символьном, так и в числовом форматах. Символьный формат используется для представления переменных в текстовых документах и на экране дисплея, а числовые имена – в сообщениях протокола SNMP.

Составное числовое имя объекта SNMP MIB соответствует полному имени этого объекта в дереве регистрации объектов стандартизации ISO (объекты баз MIB SNMP зарегистрированы во всемирном дереве регистрации стандартов ISO).

Пространство имен объектов ISO имеет древовидную иерархическую структуру. От корня этого дерева отходят три ветви, соответствующие стандартам, контролируемым ISO, ITU и совместно ISO-ITU. В свою очередь, организация ISO создала ветвь для стандартов, создаваемых национальными и международными организациями (ветвь org). Стандарты сети Интернет создавались под руководством министерства обороны США (Department of Defense, DoD), поэтому стандарты MIB попали в поддерево dod-internet, а далее – в группу стандартов управления сетью – ветвь mgmt.

Объекты любых стандартов, создаваемых под покровительством ISO, однозначно идентифицируются составными символьными именами, начинающимися от корня этого дерева. В сообщениях протоколов применяются однозначно соответствующие им составные числовые имена (Object Identifier – OID). Каждая ветвь дерева имен объектов нумеруется в дереве целыми числами слева направо, начиная с единицы; эти числа и заменяют символьные имена. Поэтому полное символьное имя объекта MIB имеет вид: iso.org.dod.internet.mgmt.mib, а полное числовое имя: 1.3.6.1.2.1.

Как видно, базы MIB в сочетании с протоколом SNMP представляют собой основу для мониторинга и управления сетями, позволяющую оперировать параметрами сетевых устройств на различных уровнях модели OSI/ISO. Именно значения MIB-переменных, получаемых непосредственно с наблюдаемых сетевых устройств с помощью протокола SNMP, предлагается использовать в данной работе для мониторинга состояния компьютерной сети.

Преимущества использования MIB-переменных заключаются в следующем:

- охват различных уровней сетевого взаимодействия;
- считывание данных непосредственно с наблюдаемого сетевого устройства;

- отсутствие необходимости захвата (сниффинга) и анализа трафика, что необходимо в случае использования данных, извлекаемых из пакетов, и что проблематично в случае мониторинга высокоскоростных магистралей.

Экспериментальная часть

Выясним, какая архитектура сети максимально упростит управление ею. В самой простой архитектуре (рис. 2) одна станция управления отвечает за всю сеть. Когда сеть расширяется до размера, когда одна NMS больше не может всем управлять, необходимо будет переходить на более распределенную архитектуру. Ее идея: использовать две или более станций управления и расположить их максимально близко к управляемым ими узлам.

В обеих архитектурах для отправки и получения трафика управления используется Интернет. Это вызывает проблемы, связанные с безопасностью и общей надежностью. Наилучшим решением будет использование для выполнения всех функций по управлению сетью частных каналов (VPN), которые, в основном, выделены для трафика управления, хотя их можно использовать и в других целях. Использование частных каналов имеет преимущество: строки «сообщество» никогда не отправляются через Интернет. Использование частных каналов также подходит для архитектуры с одной NMS. Если корпоративная сеть состоит исключительно из частных каналов, а интернет-подключения выделены только для внешнего трафика, использование частных каналов для трафика управления становится очевидным.

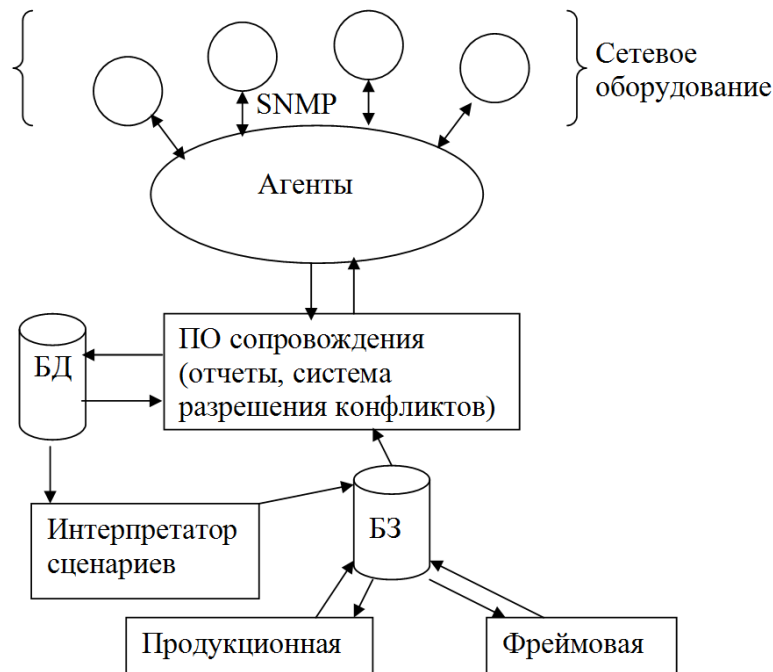


Рис. 2. Архитектура системы мониторинга

Результаты

В ходе работы созданы модель и программный комплекс, позволяющие повысить эффективность мониторинга компьютерной сети предприятия. Это осуществляется за счет выдачи рекомендаций по сложившимся ситуациям.

В работе получены следующие основные теоретические и практические результаты:

1. Предложена модель фреймов для построения программы сетевого мониторинга;
2. Разработана структура специального программного обеспечения мониторинга компьютерной сети, позволяющего давать рекомендации по сложившейся ситуации;

3. Произведена апробация программы на данных реально действующей сети НГТУ кафедры «Менеджмент».

Библиографический список

1. **Олифер, В.Г.** Средства анализа и оптимизации локальных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер // Центр Информационных Технологий CITFORUM, 1998. URL: <http://citforum.ru/nets/optimize/> (дата обращения: 30.01.2014).
2. Полный мониторинг сети. Кто как монитрит свою сеть... URL: <http://forum.nag.ru/forum/index.php?showtopic=45571&st=80> (дата обращения: 30.01.2014).
3. Полезные SNMP MIB object (OID) для Cisco URL: http://www.opennet.ru/base/net/cisco_snmp.txt.html (дата обращения: 30.01.2014).
4. **Мисевич, П.В.** Сценарно-ситуационный подход к проектированию средств интеллектуальной поддержки процесса функционирования автоматизированных систем // Системы управления и информационные технологии. 2007. N2.1(28). С. 166–171.
5. **Олифер, В.Г.** Транспортная подсистема неоднородных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер // Центр Информационных Технологий CITFORUM, 1998. URL: <http://citforum.ru/nets/tpns/contents.shtml> (дата обращения: 30.01.2014).
6. **Минский, М.** Фреймы для представления знаний / М. Минский. – М.: Мир, 1979. – 152 с.
7. Case J., Fedor M., Schoffstall M., Davin J. A Simple Network Management Protocol (SNMP), RFC 1157, SNMP Research Inc., 1990.
8. Rose M. Bulk. A Convention for Defining Traps for use with the SNMP, RFC 1215, 1991.
9. Rose M., McCloghrie K., Davin J. Bulk Table Retrieval with the SNMP, RFC 1187, 1990.
10. Schoffstall M., Davin J., Fedor M., Case J. SNMP over Ethernet, RFC 1089, 1989.
11. Waldbusser S. Remote network monitoring management information base, RFC 1271, 1991.
12. **Семенов, Ю.А.** Телекоммуникационные технологии. // ИТЭФ-МФТИ. 2013. URL: <http://book.iter.ru/1/intro1.htm> (дата обращения: 30.01.2014).
13. McCloghrie K. Management Information Base for Network Management of TCP/IP-based internets. RFC 1156, 1990.
14. McCloghrie K., Rose M. Management information base for network management of TCP/IP-based internets: MIB-II, RFC 1213, 1991.
15. Thottan M. J. Anomaly detection in IP Networks // IEEE Transactions on signal processings, vol.51, no.8, 2003, University of California Berkeley.
16. **Олифер, В.Г.** Основы компьютерных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер.– Питер, 2009. – 352 с.

*Дата поступления
в редакцию 27.06.2014*

A.V. Berezin

DEVELOPMENT OF NETWORK EQUIPMENT MULTI-AGENT MONITORING SYSTEM

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

Purpose: tools creation on the basis of frames. It automates multi-agent system monitoring construction and supports all network equipment of heterogeneous networks.

Design/methodology/approach. Proposed theoretical framework is based on three mutually complementary perspectives: frames, multi-agency and expert systems.

Findings. It is possible, for example, to apply findings in companies with large network.

Research limitations/implications. The present study provides a starting-point for further researches in the international industrial sector.

Originality/value. Frame model representation of objects is offered while designing aids of monitoring system intellectual support.

Key words: multi-agency, monitoring, network, heterogeneity.

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

УДК 621.791.01

Б.П. Конищев¹, Е.А. Пигалова², Н.А. Курников²

ДИНАМИКА СВАРОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ НА ОСНОВЕ ЭМПИРИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ПРИМЕНЕНИЕ РЯДА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРИЕМОВ ПО СНИЖЕНИЮ ДЕФОРМАЦИОННЫХ ОТКЛОНЕНИЙ КОНТУРА СВАРНОЙ АВИАЦИОННОЙ КОНСТРУКЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ОАО НАЗ «Сокол»²

Рассмотрены вопросы возникновения остаточных деформаций и напряжений. Приведена методика замеров деформаций контура сварной авиационной конструкции. Исследовано влияние ряда технологических приемов на изменение величины деформационных отклонений контура сварной авиационной конструкции.

Ключевые слова: остаточные деформации и напряжения, сварная авиационная конструкция, методы предупреждения сварочных деформаций.

Сварка как способ соединения материалов получила широкое развитие. Преимущества сварных соединений по сравнению с другими типами неразъемных соединений весьма значительны. Однако в сварочном процессе имеются свои недостатки. В процессе сварки возникают напряжения и деформации, которые в ряде случаев могут оказать отрицательное влияние на качество сварной конструкции. Во время изготовления сварных конструкций искажаются проектные формы и размеры изделий, на восстановление которых затрачивается много трудовых и временных ресурсов. Между тем, правильное построение технологического процесса сборки и сварки, а также выбор рациональных режимов сварки, как правило, позволяют избежать чрезмерных деформаций [1].

Одной из важных задач в совершенствовании изготовления сварных конструкций является улучшение их технологичности, повышение надежности и долговечности. Решение этих вопросов связано с совершенствованием методов расчета и проектирования конструкций, улучшением технологии их изготовления.

Поскольку речь идет об авиационной технике, следовательно, о конструкции, разрушение которой влечет за собой человеческие жертвы, задачи повышения качества, надежности, работоспособности и долговечности приобретают особо важное значение для предприятия-изготовителя.

При проектировании сварных конструкций необходимо считаться с возможностью появления в них значительных остаточных деформаций и напряжений и принимать меры для их предотвращения или ограничения в таких пределах, при которых влияние их не будет опасным.

Впервые на возникающие при сварке деформации и напряжения и на необходимость их учета указал изобретатель электрической дуговой сварки металлическим электродом Н.Г. Славянов. Он отметил, что причиной появления сварочных напряжений является неравномерный нагрев изделия при сварке, вызывающий местные пластические деформации. При

этом он еще тогда указывал на разницу проявления сварочных напряжений в хрупких и пластичных металлах, а также на особую опасность напряжений, появляющихся при сварке жестко закрепленных деталей. Н.Г. Славянов разработал и некоторых меры борьбы с вредным влиянием напряжений (предварительный подогрев изделия, проковка сварных швов и др.), которые применяются и в настоящее время.

Необходимо отметить, что появление деформаций и напряжений в результате воздействий, оказываемых при обработке, не является исключительно особенностью сварных конструкций. Общеизвестно, что деформации и напряжения появляются при применении всех методов обработки металла. Это относится к литью, прокатке, штамповке, клепке, вальцовке, обработке резанием, термической обработке и другим методам. Изготовление сложнейших сварных конструкций стало возможным благодаря решению учеными ряда научных проблем, в том числе и проблемы управления сварочными деформациями и напряжениями.

По эксплуатационным условиям и по условиям прочности необходимо обеспечивать определенную точность изготовления конструкций, поэтому появление в них сварочных деформаций является нежелательным. В связи с этим разработка мер для предупреждения сварочных деформаций является одной из основных задач технологического процесса изготовления сварных конструкций.

Основным источником образования собственных напряжений при сварке является неравномерный разогрев свариваемых деталей. При рассмотрении процесса образования собственных сварочных напряжений следует учитывать следующие обстоятельства. Термический цикл при сварке, то есть период нагрева и охлаждения свариваемых элементов, представляет собой нестационарный тепловой процесс, интенсивно меняющийся в функции времени; температура каждой точки изделия зависит от двух параметров – ее координат и рассматриваемого момента времени.

Физико-механические свойства металла в течение термического цикла непрерывно меняются параллельно изменениям температуры. В некоторой степени изменяются в зависимости от температуры физические характеристики металла: коэффициент температурного расширения, коэффициент теплопроводности и т.д. В значительно большей мере зависят от температуры механические свойства металлов: пределы прочности и текучести, модуль упругости и т.д. Законы изменения механических свойств металлов в зависимости от температуры изучены лишь частично.

Значительное влияние на развитие деформаций оказывают геометрические параметры свариваемых элементов. Учет этих параметров затруднителен, так как металл при сварке находится в различных фракционных состояниях. В сварочной ванне металл находится в жидком состоянии, в прилегающей к ванне зоне – в пластическом, в более удаленной – упруго-пластическом и упругом. Указанные обстоятельства затрудняют определение напряжений, образуемых в процессе сварки, расчетным путем. При сварочном процессе образуются напряжения всех трех родов: первого рода – макроскопические, второго рода – уравнивающиеся в микроскопических объемах, третьего рода – уравнивающиеся в ультрамикроскопических объемах.

В результате неравномерного нагрева элемента при сварке в нем возникают объемные напряжения по различным направлениям в пространстве. В элементах относительно небольшой толщины, например, меньше 30 мм, компонент собственных напряжений, направленный по толщине, весьма мал. Поле собственных напряжений при сварке рассматривается весьма часто как плоскостное. Во многих типах соединений, например, в продольных швах, в элементах больших толщин поля собственных напряжений условно принимаются как одноосные.

Существуют следующие факторы, вызывающие напряженно-деформационное состояние сварной конструкции:

- а) остаточные продольные пластические деформации укорочения в пластической зоне;
- б) равномерная или неравномерная по толщине пластическая деформация укорочения в поперечном направлении;

в) несовпадение центра тяжести поперечного сечения зоны пластических деформаций укорочения с центром тяжести поперечного сечения свариваемых элементов;

г) структурные изменения, вызванные сварочным нагревом.

Сварочные остаточные деформации и напряжения в конструкциях в большинстве случаев являются недопустимым дефектом, снижающим эксплуатационные показатели конструкции и ухудшающим ее внешний вид. Поэтому при производстве многих сварных конструкций возникает необходимость их снижения до значений, обусловленных техническими условиями на изготовление конструкции. Другими словами, возникает производственная необходимость управлять развитием сварочных деформаций и напряжений, чтобы получить оптимальное их значение.

По вопросам сварочных деформаций и напряжений имеются различные классификации методов их снижения. Рассмотрим классификацию, основанную на принципиальных возможностях предупреждения и устранения их.

Методы предупреждения:

- регулирование теплового состояния металла сварного соединения при сварке;
- активное нагружение свариваемых элементов в процессе сварки;
- компенсация деформаций.

Регулирование теплового состояния металла при сварке можно достичь интенсивным теплоотводом от зоны шва, а также применением сварки концентрированными источниками нагрева.

Среди наиболее известных способов активного нагружения отметим растяжение деталей в процессе сварки, сопутствующую вибрационную и ультразвуковую обработку.

Компенсация деформаций может быть достигнута рациональным конструированием, применением рациональной последовательности сборки и сварки конструкции, закреплением изделий в процессе сварки в приспособлениях, созданием предварительной деформации конструкции, обратной сварочной.

Методы устранения:

- силовое (механическое) воздействие на сварное соединение внешними силами;
- тепловое воздействие на сварное соединение.

Силовое воздействие на сварное соединение может быть осуществлено растяжением сварного соединения, прокаткой роликами зоны шва, вибрационной или взрывной обработкой зоны шва.

Среди способов теплового воздействия наиболее распространенными являются термообработка, термофиксация и термическая правка сварного соединения.

Вследствие сварочных деформаций возможны искажения геометрических сечений элементов и конструкций в целом. Это явление может привести к появлению неучтенных напряжений при эксплуатации конструкции и выходу её из строя. Искажение формы изделия может существенно изменить эксплуатационные характеристики сварного изделия, кроме того, остаточные деформации ухудшают внешний вид изделия.

Рассмотрим возникающие сварочные деформации на примере сварной авиационной конструкции, свариваемой аргонодуговой сваркой с вращающейся дугой.

Аргонодуговая сварка с вращающейся дугой представляет собой способ сварки с обширным неравномерным тепловложением в зону шва. Изделие имеет протяженные швы сложной криволинейной конфигурации. Размеры поперечного сечения швов также различны. Это связано с широким диапазоном свариваемых толщин.

Причины возникновения сварочных усадочных деформаций в сварной авиационной конструкции:

- литейная усадка шва при кристаллизации;
 - структурные превращения, происходящие в металле в результате нагрева и охлаждения.
- Кроме того, на величину сварочных деформаций влияют следующие факторы:
- способ сварки;

- размеры швов;
- условия закрепления конструкции.

Каркас сварной авиационной конструкции жестко крепится в стапеле. Панели обшивки закладываются в проемы каркаса с максимально допустимым зазором 0,2 мм (рис. 1).

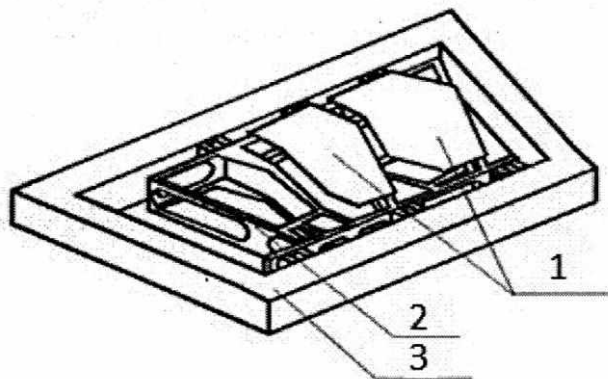


Рис. 1. Условие закрепления сварной авиационной конструкции:
1 – панели, 2 – каркас; 3 – стапель

В качестве экспериментальной части были сделаны замеры размеров контуров готовых обшивок сварной авиационной конструкции, собранных и сваренных ранее различными технологическими приемами сварки.

Для замеров деформаций контура сварная авиационная конструкция после окончания сварочных работ закладывалась в специальный стенд. С верхней и нижней сторон каркаса на стенде располагаются измерительные рубильники вдоль третьего, шестого и девятого элемента поперечного силового набора (рис. 2). Сварная авиационная конструкция размещалась между рубильниками, выдерживая размерный зазор между контурами верхними и нижним рубильником 5 ± 1 мм. После установочных работ проводятся замеры расстояния от контура сварной авиационной конструкции до верхнего и нижнего рубильника.

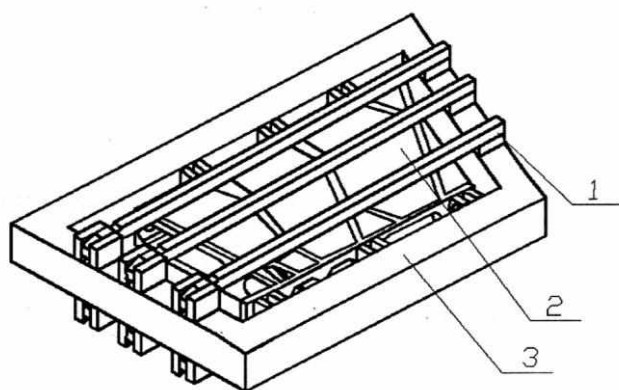


Рис. 2. Специальный измерительный стапель:
1 – измерительные рубильники; 2 – сварная авиационная конструкция;
3 – каркас измерительного стапеля

Порядок выполнения замеров:

1. Закладываем сварную авиационную конструкцию в измерительный стапель (рис. 2).
2. Выставляем сварную авиационную конструкцию по рубильникам, выдерживая равномерный зазор по верху и низу.
3. Закрепляем конструкцию прижимами стапеля, не создавая напряжений.

4. Выполняем замеры контура сварной авиационной конструкции по верхнему и нижнему рубильникам стапеля.

Приведем результаты замеров сварной авиационной конструкции по шестому элементу поперечного силового набора (рис. 3):

- сварка панелей выполнена ручной аргодуговой сваркой;
- сварка панелей выполнена автоматической аргодуговой сваркой без присадочной проволоки;
- сварка панелей выполнена автоматической аргодуговой сваркой с применением присадочной проволоки.

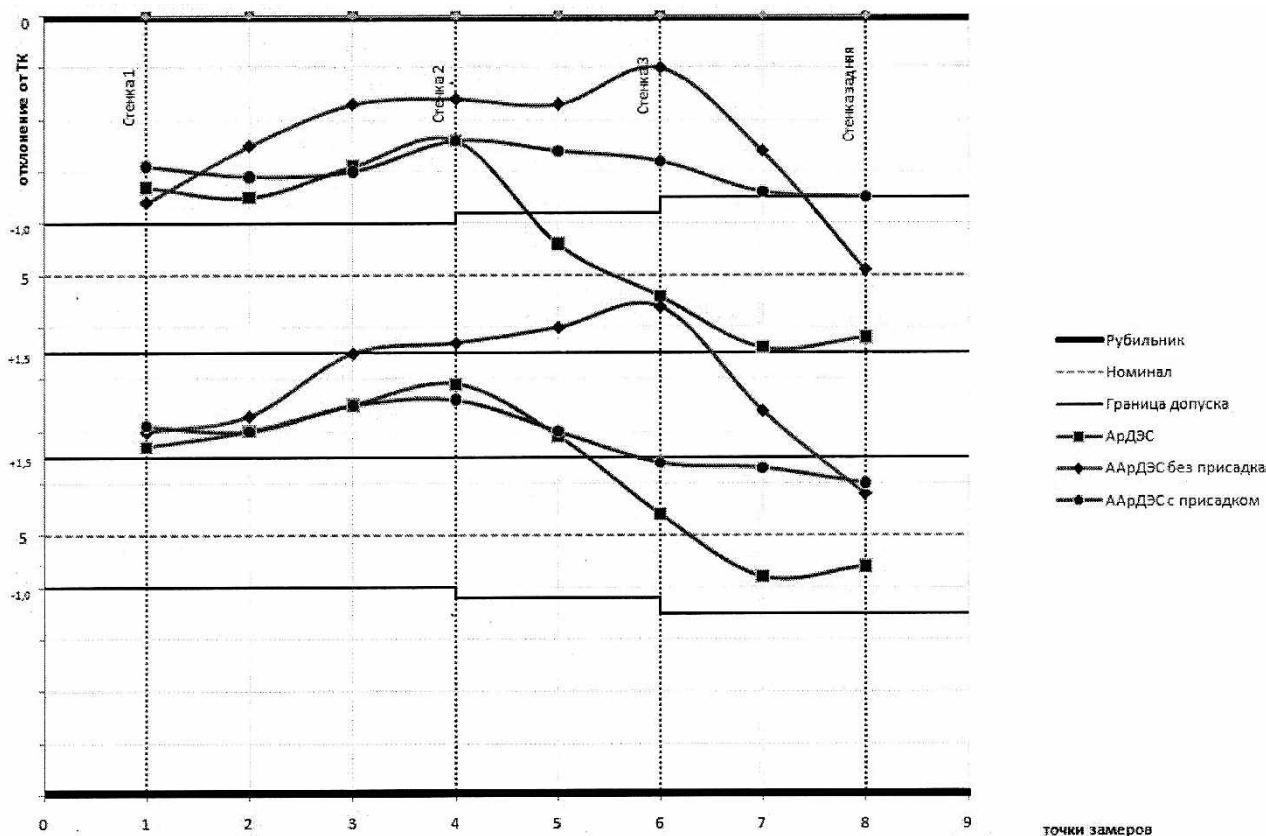


Рис. 3. Модель деформаций контура сварной авиационной конструкции

Анализируя полученные результаты измерений и построенный график, делаем выводы. Деформационные изменения контура исследуемого изделия выходят за пределы допустимых значений. Технологическими причинами возникновения сварочных усадочных деформаций являются:

- большое местное тепловложение в зонах перехода с одной толщины на другую;
- различный теплоотвод каждого участка шва, связанный с криволинейной конфигурацией шва;
- недостаточная жесткость прихватки.

В процессе исследования отклонений теоретического контура сварной авиационной конструкции был проведен анализ влияния ряда технологических приемов.

В результате были сделаны следующие выводы:

1. Было достигнуто снижение отклонений до 2,5 мм от теоретического контура.
2. Было установлено, что сварка дает всего лишь 30% полученных деформаций по изготовлению сварной авиационной конструкции, остальной процент приходится на сборочные операции.

Для дальнейшего снижения отклонений необходимо:

- применение автоматической аргодуговой сварки с присадочной проволокой;
- изменение конструкции, а именно, увеличение толщины полок каркаса сварной авиационной конструкции в зонах сварного шва;
- определение деформаций при сварке элементов каркаса и каркаса в целом;
- применение технологического комплекса измерений и инспекционного контроля на основе бесконтактных оптических систем оцифровки и измерений, что позволит наиболее точно определить деформации как отдельных элементов, так и конструкции в целом.

Библиографический список

1. **Винокуров, В.А.** Сварочные деформации и напряжения / В.А. Винокуров. – М.: Машиностроение, 1968. – 236 с.
2. **Баранов, М.С.** Технология производства сварных конструкций / М.С. Баранов. – М.: Машиностроение, 1966. – 332 с.
3. **Мавлютов, Р.Р.** Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций / Р.Р. Мавлютов. – М.: Наука, 1981. – 141 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2014*

В.Р. Konishchev¹, Е.А. Pigalova², N.A. Kurnikov²

DYNAMICS OF WELDING STRAINS ON THE BASIS OF EMPIRICAL DATA AND APPLICATION OF TECHNOLOGICAL RECEPTIONS OF DECREASE STRAIN DEVIATIONS OF WELDED CONTOUR OF AVIATION CONSTRUCTIONS

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R.E. Alexeev¹,
JSC NAP «Sokol»²

The article deals with problems of origination of residual strain and stress. The measuring technique of strain of the welded contour of aviation construction is given. The influence of technological receptions on variation of values of strain deviations of welded contour of aviation construction is studied.

Key words: residual strain and stress, welded aviation construction, methods of prevention welding deformations.

УДК 621.9.06

С.Г. Синичкин

АНАЛИЗ ИСХОДНОЙ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДЛЯ ЕЁ МОДЕРНИЗАЦИИ НА БАЗЕ ПРОГРАММИРУЕМОГО КОНТРОЛЛЕРА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрена методика анализа исходной системы управления с целью её модернизации на базе программируемого логического контроллера. Отмечен общий порядок проектирования системы управления с программируемым контроллером. Выделены два этапа анализа исходной системы управления. Показаны форма таблиц и методика их заполнения при анализе источников сигналов и исполнительных элементов для системы управления с программируемым контроллером.

Ключевые слова: программируемые логические контроллеры, модернизация, исходная система управления, источники сигналов, исполнительные элементы.

В настоящее время системы управления технологическим оборудованием часто выполняют с использованием программируемых логических контроллеров (ПЛК), что связано со значительными преимуществами такого варианта [1, 2], по сравнению с построением системы управления на аппаратной основе с жесткой логикой. По этой причине целесообразно выполнять модернизацию систем управления также на базе ПЛК. Далее рассмотрены общий порядок проектирования системы управления с ПЛК (СУ ПЛК) с целью модернизации исходной системы управления (ИСУ) оборудованием и важные этапы анализа ИСУ, являющиеся основой для разработки СУ ПЛК.

1. Общий порядок проектирования систем управления технологическим оборудованием с применением ПЛК

Разработку системы управления на базе ПЛК для замены ИСУ рекомендуется выполнять в следующей последовательности. В начале выполняют анализ ИСУ, цель которого – определение порядка функционирования технологического оборудования, исполнительных и контролируемых элементов (датчиков), органов управления. При этом выявляется последовательность отдельных операций и формирования сигналов, подтверждающих их выполнение для различных режимов работы. В процессе анализа используют различные способы графического представления порядка работы ИСУ: составляют таблицы включения исполнительных элементов и соответствующих им элементов контроля, вычерчивают циклограммы работы агрегатов, составляют временные диаграммы, поясняющие работу отдельных устройств и т.п.

В завершение этого этапа необходимо составить подробный перечень исполнительных элементов и источников сигналов, оформленный в виде таблиц.

В таблицах отмечают условия работы источников сигналов (например, напряжение питания) и потребляемые токи выходными исполнительными элементами. Эти сведения необходимы для выбора входных и выходных модулей ПЛК. После их выбора назначают порядок расположения модулей в центральном монтажном блоке ПЛК и блоках расширения. Затем производят адресацию входных, выходных, промежуточных и временных элементов с учетом правил реализации этих элементов на данном ПЛК (таймеры, мультивибраторы, счетчики).

Логическое взаимодействие входных и выходных сигналов определяется логическими уравнениями, которые составляют в процессе описания работы системы управления, в соответствии с алгоритмом работы и циклограммами или непосредственно по релейно-

контактной или бесконтактной схеме ИСУ. Далее, на основе уравнений вычерчивают релейно-контактный эквивалент (РКЭ) управляющей программы УП с использованием символов релейно-контактных схем (РКС). РКЭ относится к справочной информации по СУ ПЛК и оказывается полезным на этапе эксплуатации для обслуживания СУ и устранения отказов.

Пользуясь уравнениями и РКЭ, разрабатывают управляющую программу (УП) и вводят её в память ПЛК по каналу связи с компьютером, который выполняет функции инструмента разработки УП и программатора. После окончания ввода программы производят ее проверку и отладку совместно с объектом управления.

При необходимости, подключив программатор, можно произвести корректировку программы непосредственно у технологического оборудования. Для этого в настоящее время часто используют ПК типа ноутбук. Отлаженная программа при необходимости может быть выведена на бумажный носитель (листинг УП).

Производят вычерчивание принципиальной схемы, составляют спецификацию аппаратов, разработку конструкции станции управления, схем соединений (монтажных) и расположения электрооборудования. Блоки 9-10 (рис. 1) могут выполняться параллельно с разработкой программы ПЛК или даже опережать ее, что является одним из важных преимуществ реализации систем управления на основе ПЛК, поскольку значительно сокращаются затраты времени на проектные работы.

Описанный алгоритм проектирования представлен для наглядности в виде блок-схемы на рис. 1.



Рис. 1. Блок-схема алгоритма проектирования системы управления с применением ПЛК

2. Первичный анализ ИСУ

Одна из главных задач анализа ИСУ связана с установлением логики ее работы. Как правило, логика работы системы управления с ПЛК сохраняется прежней (если заказчик не предъявляет дополнительных требований), поэтому она записывается на основе анализа работы ИСУ. При модернизации релейно-контактных ИСУ описание логики работы СУ ПЛК можно выполнить по принципиальной схеме ИСУ, после функционального разделения всех ее элементов на источники сигналов (ИС), исполнительные (ИЭ) и промежуточные элементы (ПЭ), к которым можно отнести элементы счета, временные и т.д. Эта операция требует внимательного анализа принципиальной схемы ИСУ.

Дело в том, что в исходной релейно-контактной СУ все элементы, выполняющие функции ИС (кнопки, переключатели, путевые или конечные выключатели), связаны с ИЭ (электромагниты, магнитные пускатели, сигнальные лампы) через контакты промежуточных реле, которые и обеспечивают необходимую логику работы устройства.

Таким образом, для каждого исполнительного элемента имеется свой релейно-контактный блок. Между этими блоками может быть весьма сложная связь из-за наличия в разных блоках контактов одних и тех же промежуточных реле, контактов взаимных блокировок реверсивных магнитных пускателей, общих конечных выключателей и т.п.

В этом случае разработке СУ ПЛК должно предшествовать решение следующих важных вопросов, которые и входят в круг задач первичного анализа ИСУ:

1. Установление общего количества фактических ИС, ИЭ, наличия временных и других функциональных элементов.

2. Анализ функций путевых и конечных выключателей, поскольку от них зависит правильная работа оборудования и безопасность обслуживающего персонала. Кроме того, по этим функциям необходимо решить вопрос о возможности их использования в качестве ИС (т.е. для подключения к входам ПЛК) или оставить в цепях исполнительных элементов, которые будут подключены к выходам ПЛК.

3. Анализ возможных аварийных ситуаций при нарушении работы какого-либо выхода модуля или «зависания» ПЛК и разработка мер по их устранению.

Только после решения этих вопросов можно приступить к выполнению следующих этапов разработки СУ ПЛК: составлению таблиц входов, выходов и логических уравнений; разработке управляющей программы; разработке электрических и конструктивных схем.

На первом этапе решаются два первых вопроса о разделении элементов ИСУ на две группы: ИС и ИЭ, которые необходимо подключать к входам и выходам ПЛК.

На втором этапе проводят анализ логики работы ИСУ с учетом принятых решений на первом этапе, и выполняют формализованное описание работы ИСУ логическими уравнениями для последующей разработки управляющей программы контроллера.

Если ИСУ выполнена на бесконтактной элементной базе или с программной реализацией на устаревшей базе, задача анализа первого этапа упрощается. Это связано с тем, что в таких ИСУ входные и выходные сигналы уже функционально сформированы и могут быть использованы в СУ ПЛК. В тех же случаях, когда ИСУ выполнена на релейно-контактной базе, содержит большое количество реверсивных магнитных пускателей (МП) с взаимными блокировками, кнопок, путевых и конечных выключателей и к СУ ПЛК предъявляются повышенные требования по надежности, задача первого этапа становится достаточно сложной и предполагает несколько решений, т.е. является многовариантной. Это особенно важно в тех случаях, когда МП ИСУ имеют запас по ресурсу работы. Тогда приходится в СУ ПЛК использовать ряд элементов ИСУ, и в первую очередь, МП, катушки которых обычно рассчитаны на напряжение 220 В переменного тока. При возможности замены МП, целесообразно их выбирать с катушками на напряжение 24 В постоянного тока, что позволит использовать для управления ими выходные модули ПЛК с увеличенным числом выходов (32 или 48) и с транзисторными силовыми ключами. Это обеспечит значительное снижение числа и стоимости выходных модулей.

3. Составление таблиц источников сигналов и исполнительных элементов

Итогом решения вопросов первого этапа является установление фактических ИС и ИЭ, которые необходимо подключать к входам и выходам ПЛК, что позволяет составить таблицы с перечнем ИС и ИЭ для новой системы управления. По этим таблицам определяется количество входов и выходов ПЛК, питающие напряжения для входных и выходных цепей, что дает возможность произвести выбор типов и числа входных и выходных модулей ПЛК.

Для анализа ИС и ИЭ заполняют соответствующие таблицы, фрагменты которых представлены в таблицах 1 и 2. В заголовке таблицы подчеркивают вид сигналов (входные или выходные), которые заносят в таблицу и внизу указывают, сколько листов таблицы занимает перечень данного вида сигналов и номер текущего листа.

В первом столбце таблицы указывают наименование (функцию) сигнала, во втором – приводят его позиционное обозначение из принципиальной схемы ИСУ, далее выписывают из спецификации тип ИС или ИЭ, что необходимо для последующего уточнения возможных режимов их работы (по напряжению питания, по роду тока и т.д.) или подбора элементов для их замены.

В четвертом столбце таблицы указывают точку подключения ИС или ИЭ. Например, указывают, что сигнал поступает в шкаф автосклейки (ША), на клеммную колодку X10, на контакт 3 проводом 89. Номер провода записывается в кружочке для наглядности и удобства последующего использования при разработке принципиальной и других электрических схем новой системы управления: $\textcircled{89}$ – ША – X10 – 3.

В пятом столбце таблицы указывают род тока и величину напряжения питания ИС, а для ИЭ – напряжение питания, род и величину тока, потребляемого нагрузкой.

Сведения этого столбца используют для выбора типов модулей ПЛК. Типы модулей записывают в шестом столбце таблицы. Номер модуля указывает порядок их расположения в центральном блоке ПЛК или блоках расширения.

В седьмом столбце можно указать адрес, присвоенный входу или выходу модуля ПЛК, к которому будет подключен данный ИС или ИЭ (на этапах размещения модулей в ПЛК или разработки программы). Заполняется после выбора ПЛК и определения местоположения модулей.

Приведенная форма таблицы для систематизации и анализа ИС и ИЭ отличается наглядностью и информативностью и может быть рекомендована для подготовки информации об исходной системе с целью модернизации. Заполнение такой таблицы полезно и при разработке системы управления с ПЛК для вновь проектируемого технологического оборудования.

Составление таблицы дает возможность выбрать типы и количество модулей ПЛК, решить вопрос об их размещении и адресации, и далее разрабатывать принципиальную схему, а затем схему соединений.

По результатам анализа табл. 1 видно, что в исходной системе управления питание ИС (переключатели и конечные выключатели) осуществлялось напряжением 110 В постоянного тока, что было связано с используемой элементной базой, в качестве которой применялись блоки матричной логики. Поскольку в составе ПЛК УПУ-ТП-2М отсутствуют входные модули с таким напряжением питания, но имеются входные модули, рассчитанные на напряжение питания входных цепей напряжением 110 В переменного тока (тип МВД-02), они и были использованы для СУ ПЛК. При этом питание ИС и их входных цепей было осуществлено непосредственно от выходных обмоток трансформатора, с которых подавалось напряжение на выпрямители для получения напряжения 110 В постоянного тока в исходной системе управления. Такой прием оказался рациональным, поскольку исключалась необходимость применения дополнительного источника питания.

Таким образом, при разработке СУ ПЛК для модернизации исходной системы управления очень важен тщательный её анализ.

Таблица 1

Входные сигналы агрегата РЗ

Наименование сигнала	Позиционное обозначение источника (приемника) сигнала	Тип источника (приемника) сигнала	Местоположение сигнала (контакт, разъем, модуль)	Характеристика сигнала (напряжение/ток ^x)	Тип (номер) модуля ПЛК и N контакта ^{xx}	Адрес ^{xx}	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Ручной режим склейки – полный цикл	S227	Выключатель КЕ011УХЛЗ, исполнение 3, черный «С»	Ⓢ9 – ША-Х10-3	=110В			
2. Ручной режим склейки – неполный цикл	S228	«-»	Ⓢ9 – ША-Х10-9	=110В			
3. Стоп авто-склейки	S242	Выключатель КЕ011УХЛЗ, исполнение 2, красный «С»	Ⓢ9 – ША-Х9-10	=110В			
4. Рама вверх	S241	Выключатель КЕ011УХЛЗ, исполнение 3, черный «С»	Ⓢ4 – ША-Х9-10	=110В			
5. Контроль рамы сверху	S243.1	Выключатель путевой ВП-15Д-21Б 221-54У2.8	Ⓢ5 – ША-Х10-6	=110В			
	S243.2		Цепь 15 – 136	~220В			Рулонная зарядка
Общий провод (-) (-)	Источник питания БП (G3)		Ⓢ8 – ША-Х13 Х14	+24В =110В			

Примечание: ^x – ток для ИЭ^{xx} – заполняется после выбора ПЛК и определения местоположения модулей.

Всего листов:

Лист .

Таблица 2

Выходные сигналы агрегата РЗ

Наименование сигнала	Позиционное обозначение источника (приемника) сигнала	Тип источника (приемника) сигнала	Местоположение сигнала (контакт, разъем, модуль)	Характеристика сигнала (напряжение/ток ^{хх})	Тип (номер) модуля ПЛК и N контакта ^{хх}	Адрес ^{хх}	Примечание
1	2	3	4	5	6	7	8
1. Вводной вентиль	Y53	Пневмо-распределитель МПР ПТУ2-053-553-81	Ⓢ7 – ША-Х10-1	$U=24В$ $I=0.15А$	МДВ-01		
2. Блокировка рамы на защелке	Y54	Пневмо-распределитель МПР ПТУ2-053-553-81	Ⓢ23 – ША-Х12-7	$U=24 В$ $I \leq 0,15 А$	МДВ-01		$R_{об. п.} = 250 Ом$
3. Рама вниз 1. 2.	Y55 Y57	«-» «-»	Ⓢ24 – ША-Х12-8 Ⓢ26 – ША-Х12-10	$U=24 В$ $I \leq 0,15 А$	МДВ-01		
4. Рама вверх 1. 2.	Y56 Y58	«-» «-»	Ⓢ25 – ША-Х12-9 Ⓢ27 – ША-Х13-1	$U=24 В$ $I \leq 0,15 А$	МДВ-01		
5. Поддув полотна, нож	Y59	«-»	Ⓢ23 – ША-Х13-2	$U=24 В$ $I \leq 0,15 А$	МДВ-01		

Всего листов:

Лист

Библиографический список

1. Управление автоматическими линиями с помощью ЭВМ / В.В. Крыленко [и др.]. – М.: Машиностроение, 1983. – 140 с.
2. **Синичкин С.Г.** Программируемые контроллеры и их применение для модернизации систем управления технологическим оборудованием: учеб. пособие / С.Г. Синичкин; НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2008. – 211 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2014*

S.G. Sinichkin

ANALYSIS OF THE ORIGINAL CONTROL SYSTEM FOR ITS MODERNIZATION ON THE BASE OF PROGRAMMABLE CONTROLLER

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

The method of analysis of the control system for its modernization based on the programmable controller is used. General procedure of designing a control system with programmable controller and two stages of analysis of the original control system are shown. The form of tables and method of their filling in process of analysis signal sources and executive elements for control system with programmable controller are shown.

Key words: programmable logic controllers, modernization, the original control system, sources of signals, actuators.

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

УДК.681.783;68.137

В.В. Бирюков¹, В.А. Грачев¹, Т.С. Лукоянова¹, А.Ю. Порошенков², А.С. Раевский¹

ВЛИЯНИЕ ПАРАЗИТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЛАЗЕРНЫХ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ НА ПОЛОСУ ПРОПУСКАНИЯ КАНАЛА АНАЛОГОВОЙ ВОЛС

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
ФГУП «ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», Н. Новгород²

Приведены результаты измерения полного сопротивления лазерного излучателя в СВЧ-диапазоне. Описана схема экспериментальной установки. Представлены результаты эксперимента. Рассчитаны RLC -параметры лазерного диодного модуля и на их основе получены амплитудно-частотные характеристики. Исследовано влияние паразитных параметров лазерного излучателя на его частотную характеристику.

Ключевые слова: аналоговая волоконно-оптическая линия связи, лазерный излучатель, паразитные параметры, частотные характеристики лазерного излучателя.

Введение

В настоящее время наряду с системами передачи цифровых сигналов активно развиваются системы передачи широкополосных аналоговых сверхвысокочастотных (СВЧ) сигналов по волоконно-оптическим линиям связи (ВОЛС). Интерес к данным системам вызван необходимостью снижения потерь при передаче сигналов между удаленными СВЧ блоками и антеннами.

В технике оптических систем передачи наиболее часто благодаря своей относительной простоте используется прямая модуляция тока накачки лазера. В качестве источников модулированного оптического сигнала широко применяются одномодовые полупроводниковые лазеры с длиной волны излучения 1,55 мкм и выходной мощностью до 50 мВт.

Общее быстродействие лазерного излучателя с непосредственной модуляцией за счет управления током инжекции определяется не только технологическими особенностями структуры лазерного кристалла. Ограничение полосы модуляции в СВЧ-диапазоне вызвано паразитными электрическими эффектами, возникающие вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов, требуемых для его подсоединения к вводу модулирующего сигнала. Их необходимо учитывать при практической реализации прототипа ВОЛС. Знание данных параметров дает возможность оптимизировать схему драйвера для получения максимальной ширины полосы пропускания и минимальной неравномерности коэффициента передачи в ней [1].

Результаты исследований

Производители лазерных диодных модулей, отмечая в описании своей продукции основные электрические и оптические параметры модуля, не указывают ни полное сопротивление излучателя, ни его RLC -параметры, к которым относятся: сопротивление и емкость кристалла, индуктивность выводов, реактивные сопротивления корпуса излучателя. Необходи-

димо обладать информацией о данных параметрах, так как они оказывают существенное влияние на полосу пропускания аналогового волоконно-оптического тракта.

Для нахождения точных значений паразитных RLC -параметров лазерного диода существует метод, включающий в себя следующие основные этапы [2]:

- составление адекватной математической модели замещения ЛИ;
- оценка параметров элементов в полученной модели;
- составление системы уравнений, описывающей модель лазера;
- решение системы уравнений, описывающей полученную модель.

Схема замещения ЛИ показана на рис. 1. Она складывается из схемы замещения чипа лазерного диода (ЛД) и схемы замещения корпуса ЛИ [3].

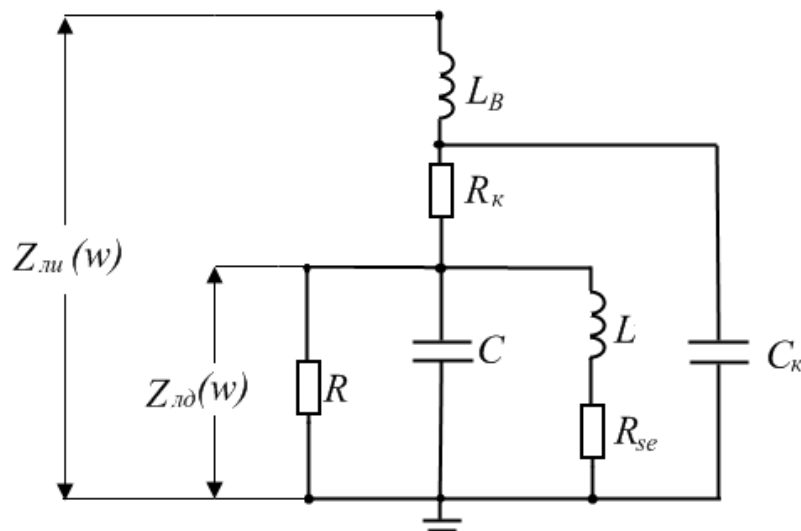


Рис. 1. Схема замещения лазерного излучателя

На рис. 1 введены следующие обозначения: $Z_{\text{ли}}(\omega)$ – комплексное сопротивление соответственно ЛИ; $Z_{\text{лд}}(\omega)$ – комплексное сопротивление соответственно чипа ЛД; C – диффузионная ёмкость чипа; R – сопротивление чипа; L – индуктивность чипа, обусловленное спонтанным излучением; R_{se} – сопротивление чипа, обусловленная спонтанным излучением; L_B – индуктивность выводов; R_k – сопротивление корпуса; C_k – емкость корпуса.

Эквивалентная электрическая схема лазерного диода для модулирующих частот в упрощенном варианте представлена в виде параллельной RLC -цепочки, состоящей из активной, емкостной и индуктивной составляющих импеданса лазерного кристалла.

Индуктивность выводов L_B представляет собой индуктивность монтажных электрических соединений лазерного излучателя с внешними выводами.

Полный модулирующий ток возбуждается приложенным к цепи напряжением. Модуляция выходного оптического излучения вызывается только активной компонентой модулирующего тока, протекающей через активное сопротивление R . На высоких частотах общий ток модуляции уменьшается из-за блокирующего действия индуктивности L_B , причем часть общего тока ответвляется паразитной емкостью C . Необходимо учитывать также наличие элементов корпуса C_k . В результате эффективность модуляции быстро уменьшается с ростом частоты модуляции.

Выражение для нахождения комплексного сопротивления чипа ЛД имеет вид:

$$Z_{\text{лд}}(\omega) = \frac{R \cdot (j\omega L + R_{se}) / j\omega C}{(j\omega L + R_{se} + R) / j\omega C + R \cdot (j\omega L + R_{se})}. \quad (1)$$

Комплексное сопротивление ЛИ определяется по формуле:

$$Z_{\text{ЛИ}}(\omega) = \frac{Z_{\text{ЛД}}(\omega) + R_{\text{К}}}{j\omega C_{\text{К}} \cdot (Z_{\text{ЛД}}(\omega) + R_{\text{К}}) + 1} + j\omega L_{\text{В}}. \quad (2)$$

Для измерения полного сопротивления ЛИ была собрана установка на основе векторного анализатора цепей ZVA-40 фирмы Rohde&Schwarz. Структурная схема лабораторной установки показана на рис. 2.

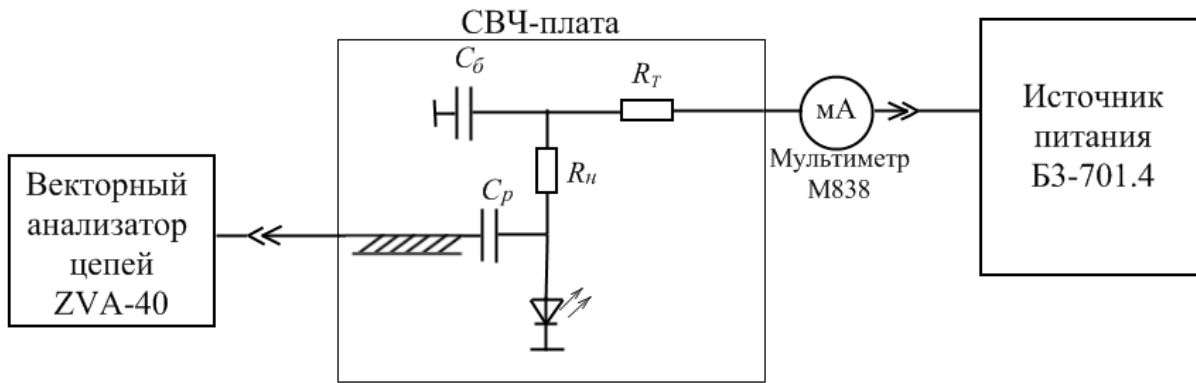


Рис. 2. Структурная схема лабораторной установки

СВЧ-плата содержит коаксиально-микростриповый переход, необходимый для соединения платы и векторного анализатора цепей с помощью коаксиального кабеля. С помощью векторного анализатора цепей производится измерение частотных зависимостей коэффициента стоячей волны (КСВ), активной и реактивной составляющих полного сопротивления. Необходимый ток накачки ЛИ определяется резисторами R_T , R_H и напряжением источника питания.

На рис. 3 представлена эквивалентная схема измеряемой цепи, которая совмещает в себе элементы схемы СВЧ платы, схему замещения ЛИ, монтажную емкость C_M и индуктивность соединительной линии L_M (индуктивность прямого отрезка проводника).

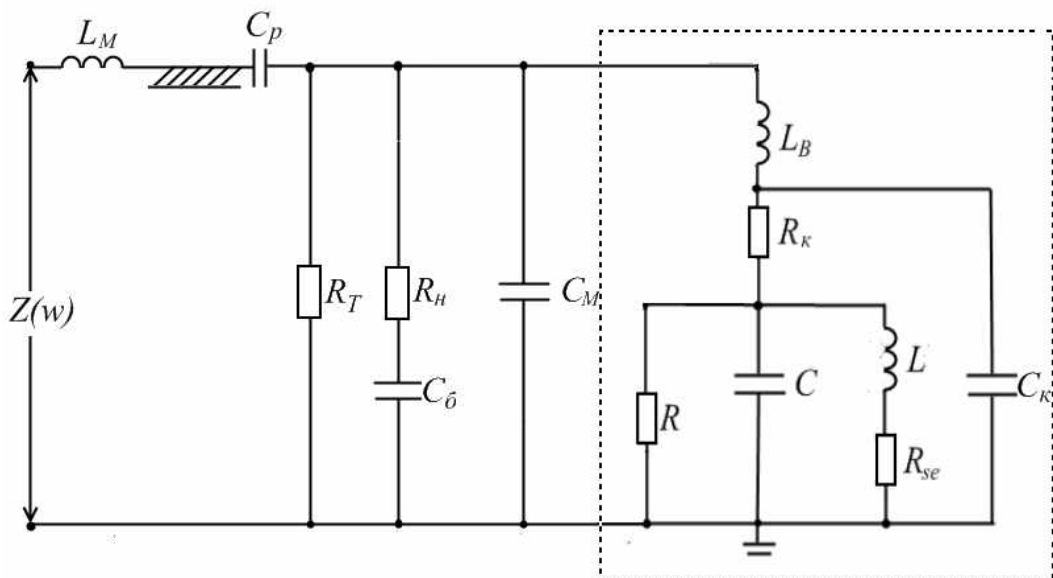


Рис. 3. Эквивалентная схема измеряемой цепи

Параметры L_M и C_M – «паразитные», их необходимо учитывать при подключении цепи к измерительному прибору и лазерного излучателя к драйверу. При расчетах используем их оценки: $C_M = 1,5$ пФ, $L_M = 2,6$ нГн. Некоторые параметры схемы известны: $R_T = 110$ Ом, $R_H = 50$ Ом, $C_0 = C_p = 100$ пФ, эффективная диэлектрическая проницаемость подложки $\varepsilon_{эф} = 3,06$, длина линии $l = 0,01$ м, волновое сопротивление линии $Z_B = 50$ Ом.

Для нахождения полного сопротивления измерительной схемы используем формулу преобразования сопротивлений вдоль линии передачи [4]:

$$Z_n(\omega) = Z_B \frac{Z_H + jZ_B \operatorname{tg}(\beta l)}{Z_B + jZ_H \operatorname{tg}(\beta l)}, \quad (3)$$

где $\beta l = \sqrt{\varepsilon_{эф}} \frac{2\pi f}{c} l$ - электрическая длина линии.

Сопротивление нагрузки определяется следующим образом:

$$Z_H(\omega) = \frac{1}{j\omega C_p} + \frac{\left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) \cdot R_T \cdot Z_{ЛИ}^*(\omega)}{\left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) \cdot R_T + Z_{ЛИ}^*(\omega) \left(\frac{1}{j\omega C_0} + R_H\right) + R_T \cdot Z_{ЛИ}^*(\omega)}, \quad (4)$$

где $Z_{ЛИ}^*(\omega)$ - комплексное сопротивление ЛИ с учетом его подключения к драйверу. Оно вычисляется по следующей формуле:

$$Z_{ЛИ}^*(\omega) = \frac{Z_{ЛИ}(\omega) \cdot \frac{1}{j\omega C_M}}{Z_{ЛИ}(\omega) + \frac{1}{j\omega C_M}}. \quad (5)$$

Используя ранее записанные формулы (1) - (5), можем найти полное сопротивление цепи $Z(\omega)$, изображенной на рис. 3:

$$Z(\omega) = Z_n(\omega) + j\omega L_M. \quad (6)$$

Для нахождения точных значений RLC -параметров составим систему уравнений:

$$\begin{cases} Z(\omega_1, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_1(\omega_1) + j \operatorname{Im} Z_1(\omega_1) \\ Z(\omega_2, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_2(\omega_2) + j \operatorname{Im} Z_2(\omega_2) \\ \dots \\ Z(\omega_N, R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M) = \operatorname{Re} Z_N(\omega_N) + j \operatorname{Im} Z_N(\omega_N) \end{cases}, \quad (7)$$

где $R, C, L, R_{se}, R_k, L_B, C_k, C_M$ - неизвестные величины, а $\omega_i, \operatorname{Re} Z_i(\omega_i), \operatorname{Im} Z_i(\omega_i)$ - измеряемые величины.

Система из N комплексных уравнений распадается на $2N$ действительных уравнения. Следовательно, для определения восьми (в нашем случае) неизвестных величин достаточно произвести измерения активных и реактивных составляющих полных сопротивлений ЛИ на четырех частотах и, используя выражения (1)–(6), записать систему из четырех комплексных уравнений (7).

Система решается численными методами. В качестве начальных приближений искомым величинам используются их оценки. Возьмем уже ранее рассчитанные оценочные значения RLC -параметров из [2].

В эксперименте использовался лазерный диодный модуль LDI-DFB-1550, который может работать как в непрерывном, так и в импульсном режимах.

Графики зависимостей активной и реактивной составляющих полного сопротивления от частоты при отсутствии тока накачки представлены на рис. 4, *а* и 4, *б* соответственно. Аналогичные зависимости были сняты при номинальном токе накачки ЛД $I = 68$ мА. Они приведены на рис. 5, *а*, *б*.

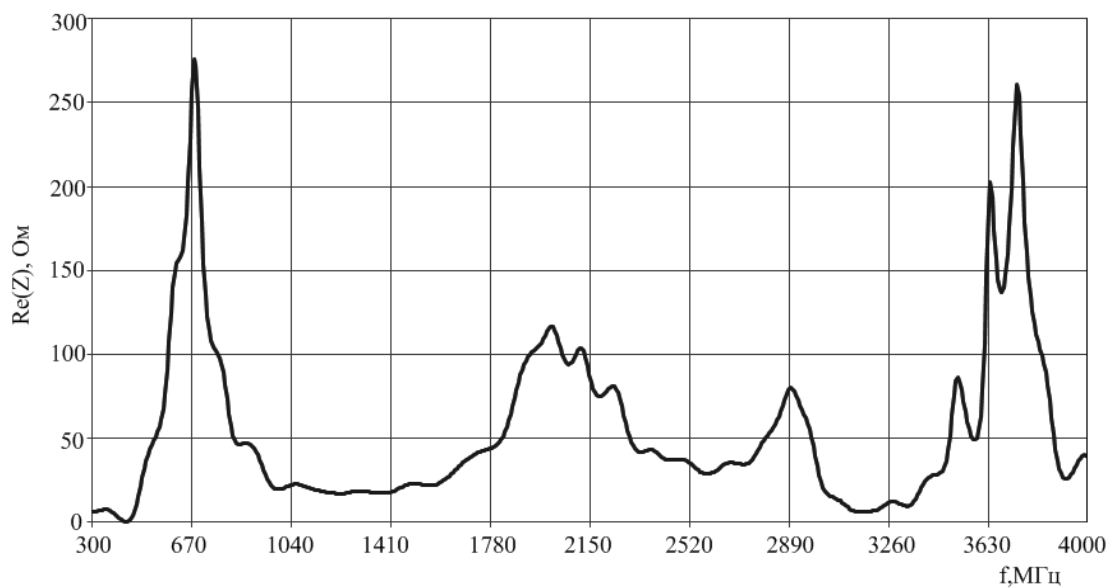
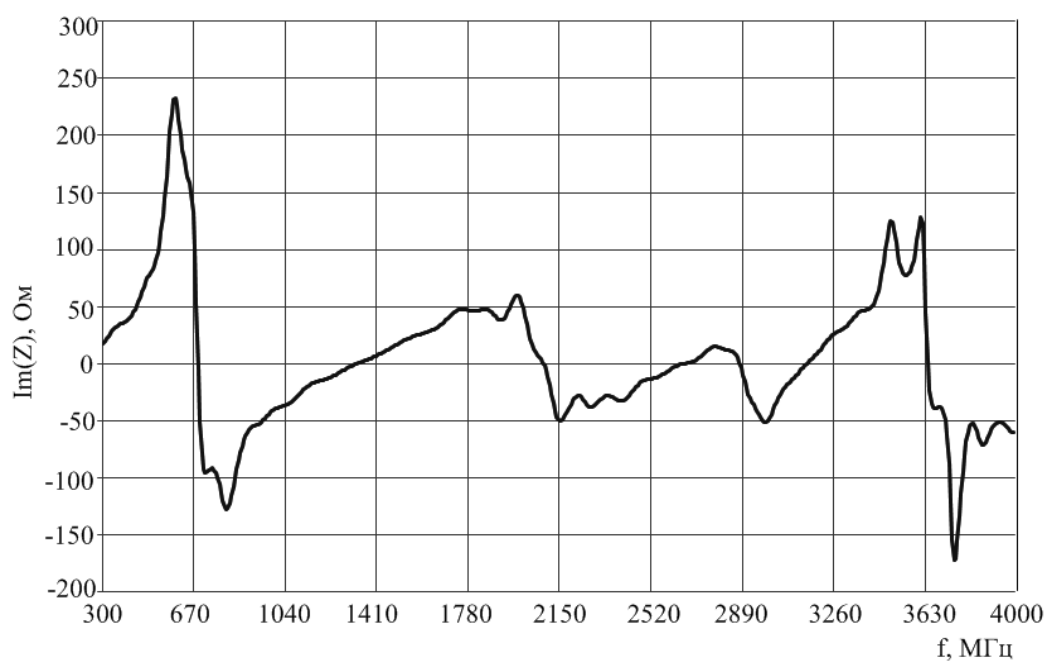
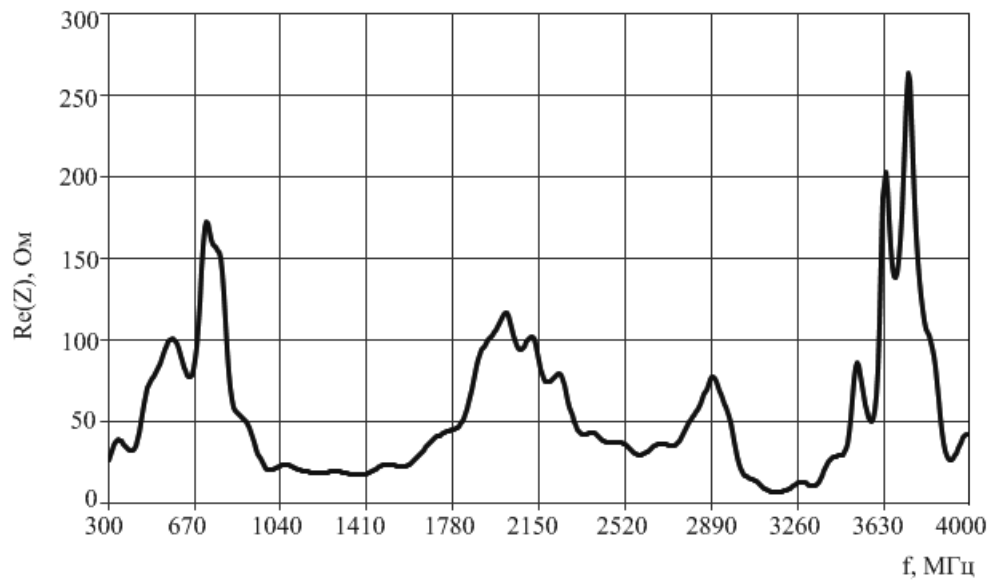
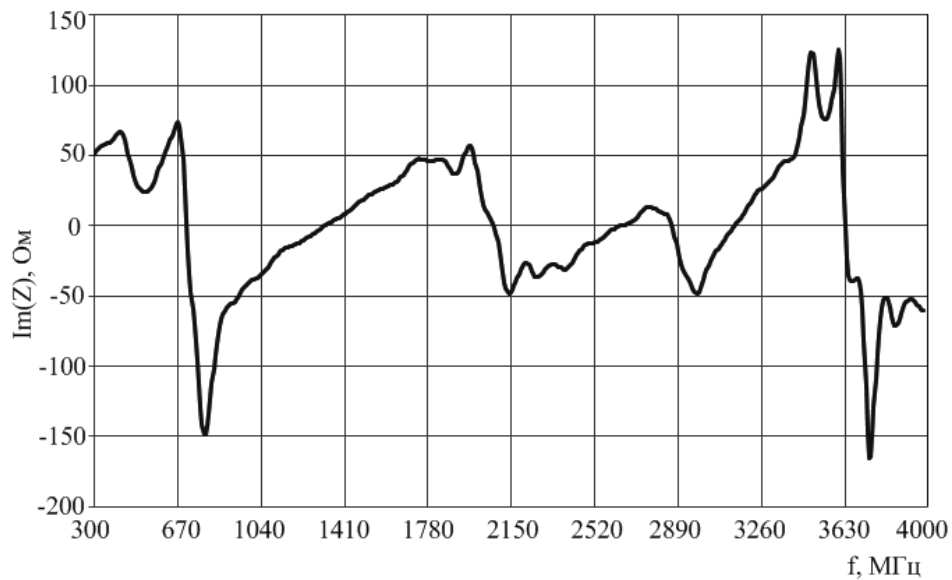
*а)**б)*

Рис. 4. Частотные зависимости активной (*а*) и реактивной (*б*) составляющих полного сопротивления при отсутствии тока накачки



а)



б)

Рис. 5. Частотные зависимости активной (а) и реактивной (б) составляющих полного сопротивления при номинальном токе накачки $I = 68$ мА

Измеренные значения реальных и мнимых частей полных сопротивлений лазерного излучателя сведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерения реальной и мнимой частей полного сопротивления

Частота, f , МГц		335,714	971,429	1535,714	1978,571	2700,00	3500,00	3800,00
Ток, мА	Часть	Сопротивление, Ом						
		0	Re(Z)	7,256	20,844	22,211	109,085	35,018
Im(Z)	28,488		-44,237	21,885	60,328	2,174	125,209	-79,861
68	Re(Z)	38,345	21,695	22,721	109,560	35,732	63,715	126,439
	Im(Z)	55,675	-45,678	21,996	57,142	2,501	123,640	-76,803

Результаты измерений полного импеданса лазерного излучателя, представленные в табл. 1, требуются для решения системы уравнений (7) относительно RLC -параметров лазера согласно описанной методике.

Для расчета значений RLC -параметров лазерного излучателя была написана программа в среде MatLab, выполняющая решение составленной системы уравнений. Используется встроенный алгоритм решения системы нелинейных уравнений, содержащих комплексные числа. Рассчитанные значения RLC -параметров лазерного излучателя представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчета RLC -параметров лазерного излучателя

Ток, мА	Параметры						
	R , Ом	L , пГн	C , нФ	R_{se} , Ом	R_{κ} , Ом	C_{κ} , пФ	L_{β} , нГн
0	1	1,1	3	0,2	2,1	11	3
68	0,9	1,0	3	0,18	2,0	10	2

Определив RLC -параметры можно рассчитать частотную характеристику (ЧХ) лазерного излучателя. ЧХ модуляции лазерного диода представляет собой зависимость значения амплитуды импульса оптического излучения от частоты модуляции, отражает динамические свойства источника излучения и характеризует его инерционность. ЧХ имеет ограниченную верхнюю частоту. Граничная частота определяется как частота, на которой сигнал уменьшился в $\sqrt{2}$ раза, т.е. амплитуда сигнала с фотоприемника становится равной $A(f_{гр}) = A_0/\sqrt{2}$.

Для получения частотной характеристики ЛИ целесообразно подключить ЛИ к драйверу, что соответствует реальному режиму работы. В этом случае эквивалентная схема для расчёта ЧХ ЛИ будет иметь вид, изображенный на рис. 6.

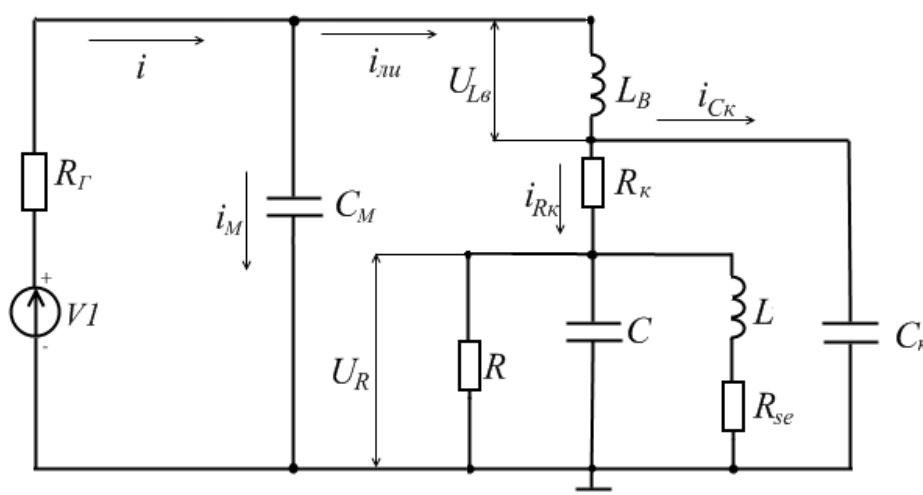


Рис. 6. Эквивалентная схема для моделирования ЧХ

Для расчета ЧХ ЛИ используем оценку внутреннего сопротивления драйвера из статьи [2], то есть будем считать, что $R_{\Gamma} = 35$ Ом.

К полупроводниковому лазеру подводится модулирующее напряжение от генератора со стабильной амплитудой, равной $U_0 = 1,8$ В, и периодически изменяющейся частотой.

Амплитудно-частотной характеристикой электрической цепи называют модуль ее

комплексной частотной характеристики (КЧХ), то есть модуль коэффициента передачи (передаточной функции).

Коэффициент передачи цепи определяет реакцию цепи на внешнее воздействие и равен отношению выходной величины (напряжение, ток) к входной величине (напряжение, ток), которые выражены в комплексной форме. Передаточная функция по напряжению определяется по формуле:

$$K_U(j\omega) = U_{\text{вых}}(j\omega)/U_{\text{вх}}(j\omega), \quad (8)$$

где $U_{\text{вых}}(j\omega) = U_R(j\omega)$, $U_{\text{вх}}(j\omega) = U_0$. При этом полное комплексное сопротивление цепи, изображенной на рис. 6, будет определяться по формуле:

$$Z(\omega) = Z_{\text{ли}}^*(\omega) + R_{\Gamma}. \quad (9)$$

Для оценки влияния паразитных элементов корпуса на ширину полосы пропускания лазерного излучателя построим на одном графике две кривые, рассчитанные при разных значениях RLC -параметров. В качестве первого примера используем значения, взятые из табл. 2, при токе, равном 68 мА. Для второго варианта используем произвольные меньшие значения RLC -параметров корпуса. Было выяснено, что при внесении изменений в значения параметров элементов чипа лазерного диода (C , L , R , R_{se}) практически не происходит изменение АЧХ, а существенное влияние оказывают величины параметров корпуса: C_k , L_B , и R_k .

Графики зависимости модуля КЧХ в логарифмическом масштабе от частоты модуляции при ток, равном 68, при двух вариантах значений параметров корпуса показаны на рис. 7.

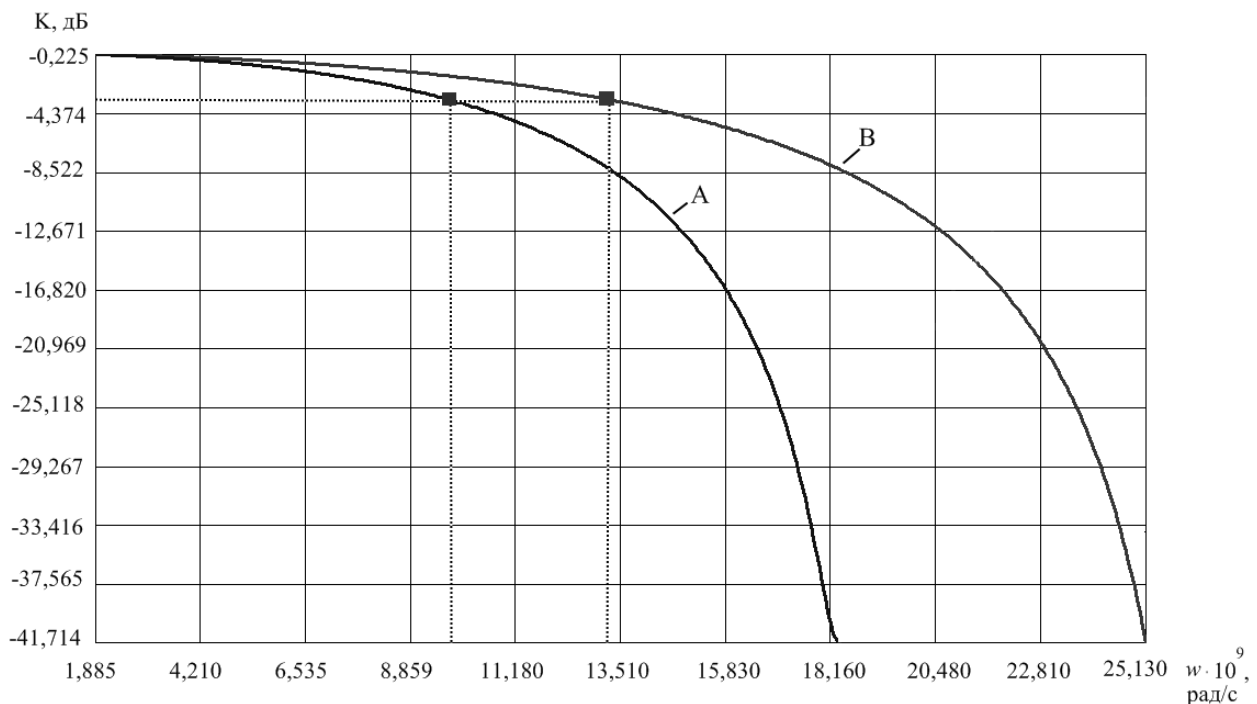


Рис. 7. Рассчитанные амплитудно-частотные характеристики лазерного излучателя

На рис. 7: кривая А получена при $C_k = 10$ пФ, $L_B = 2$ нГн, $R_k = 2$ Ом; кривая В – при $C_k = 5$ пФ, $L_B = 1$ нГн, $R_k = 1$ Ом.

Из рис. 7 видно, что по уровню минус 3 дБ верхние частоты полосы пропускания составляют $f = 1,471$ ГГц (кривая А) и $2,001$ ГГц (кривая В). Таким образом, уменьшение индуктивности выводов с 2 нГн до 1 нГн, уменьшение контактного сопротивления с 2 Ом до 1 Ом и уменьшение емкости корпуса с 10 пФ до 5 пФ приводит к увеличению полосы пропускания по уровню на 530 МГц.

Выводы

В данной работе проведены измерения полного сопротивления лазерного излучателя в СВЧ-диапазоне. Описана схема экспериментальной установки. Представлены результаты эксперимента.

Рассчитаны *RLC*-параметры лазерного диодного модуля и на их основе получены амплитудно-частотные характеристики. Исследовано влияние паразитных элементов корпуса на полосу пропускания лазерного излучателя. Существенное ограничение на ширину полосы модуляции полупроводниковых одномодовых лазеров накладывают паразитные элементы корпуса, наибольший вклад из которых дает индуктивность выводов.

Для расширения полосы пропускания лазерного излучателя, а следовательно и увеличения скорости передачи информации, необходимо компенсировать или исключить наличие паразитных электрических эффектов, возникающих вследствие влияния конструкции электрических выводов лазерного кристалла и монтажных элементов.

Библиографический список

1. Шантырь, В.А. Передача радиоастрономических сигналов от антенны радиотелескопа в аппаратное помещение обсерватории по волоконно-оптическим линиям: Сообщения ИПА РАН. – СПб.: ИПА РАН, 2012. №186. – 28 с.
2. Новиков, Н. С. Влияние *RLC*-параметров лазеров на скорость передачи информации мощных оптических передатчиков / Н. С. Новиков, И. В. Крюкова, Н. Н. Чуковский // Наука и образование (электронное издание). 2012. 77-30569/352332. №3. С. 1-11. <http://technomag.edu.ru/doc/352332.html>
3. Тсанг, У. Полупроводниковые инжекционные лазеры. Динамика, модуляция, спектры / У.Тсанг. – М.: Радио и связь. 1990. – 455 с.
4. Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ / Д.М. Сазонов. – М.: Высш. шк., 1988. – 432 с.

Дата поступления
в редакцию: 03.06.2014

V.V. Biryukov¹, V.A. Grachev¹, T.S. Lukoyanova¹, A.Y. Poroshenkov², A.S. Raevskii¹

THE INFLUENCE OF PARASITIC PARAMETERS LASER OSCILLATORS ON BANDWIDTH OF ANALOG FIBER TRANSMISSION LINE

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev¹,
Scientific research Institute of measuring systems n.a. J.E. Sedakov, N. Novgorod²

Purpose: Determination of parasitic *RLC*-parameters of the laser oscillator and the calculation of its frequency response.

Design/methodology/approach: The used methodology is based on the exact calculation of parameters equivalent circuit the laser oscillator using experimentally determined frequency dependencies of the real and imaginary parts impedance of the laser oscillator.

Findings: Knowledge of parasitic parameters the laser oscillator enables optimization of driver circuit for maximum bandwidth and minimum uneven gain in it.

Research limitations/implications: These results provide a starting point for further studies of the effect *RLC*-parameters of the laser oscillator on the frequency characteristics of the transmitting optical module analog fiber optic link.

Originality/value: Investigated the effect of the parasitic parameters of laser oscillator on its bandwidth by modulation of the pump current.

Key words: analog fiber transmission line, the laser oscillator parasitic parameters, frequency characteristics of the laser oscillator.

УДК 621.039

А.В. Безносков, Т.А. Бокова, А.Д. Зудин, А.В. Львов, А.О. Соловьёв, А.С. Черныш

**ПУТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ КИСЛОРОДА
СВИНЦОВОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Исследование процессов, сопровождающих регулирование окислительного потенциала тяжелых жидкометаллических теплоносителей с использованием эжекции окислительных или восстановительных газовых смесей падающими струями теплоносителя на его свободный уровень с захватом мелкодисперсной фазы газа.

Ключевые слова: окислительный потенциал, свинцовый и свинец- вислоутовый теплоноситель, диспергация, модель, массообменник.

В настоящее время ведутся работы по проектированию и конструированию реакторных установок на быстрых нейтронах, охлаждаемых тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями – свинцом и свинцом-висмутом. Баковая компоновка реакторного контура БРЕСТ предполагает, что основное оборудование: активная зона, парогенераторы, насосы – погружены в общий бак с теплоносителем (той или иной геометрии). В контуре имеются развитые свободные поверхности теплоносителя в реакторном блоке в отличие от РУ АПЛ, в которых свободные уровни имелись только в емкостях, выполняющих роль компенсаторов объема (буферных емкостях и др.), и в сливных камерах главных циркуляционных насосов со щелевыми уплотнениями вала. Наличие развитых свободных поверхностей теплоносителя и существенно (в два–три раза) меньшие скорости теплоносителя в контуре создают условия для эффективной сепарации газовых пузырей из объема теплоносителя. В баковых компоновках энергоблоков АЭС с ТЖМТ гидравлическое сопротивление реакторного контура существенно меньше, чем сопротивление РУ петлевых компоновок АПЛ, поэтому у главных циркуляционных насосов (ГЦН) РУ типа БРЕСТ и СВБР 75/100 предусматривается установка осевых рабочих колес, имеющих существенно меньший напор, чем у центробежных и диагональных ГЦН АПЛ. Осевые насосы не могут обеспечивать эффективную прокачку ТЖМТ через эжекционные устройства, аналогично подобным устройствам в РУ АПЛ.

Эксплуатация систем со свинцовым теплоносителем и сплавами на его основе при температурах более 400-450°C может осуществляться только при наличии защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов (сталей). Необходимым условием формирования и доформирования защитных покрытий на основе соединений компонентов сталей с кислородом является наличие в ТЖМТ примеси термодинамически активного кислорода на уровне, способном обеспечивать образование и сохранение соединений соответствующих оксидов на поверхности материалов.

Особенностью расплавов свинца и свинца-висмута является их сравнительно высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам. В связи с этим одной из важнейших проблем, возникающих при использовании данных теплоносителей, является обеспечение коррозионной стойкости контактирующих с ними материалов. В настоящее время основным методом, применяемым для защиты конструкционных сталей от коррозии в среде расплавов свинца и свинца-висмута, является кислородная пассивация конструкционных материалов. Пассивация заключается в формировании и поддержании на их поверхностях тонких (1-10 мкм), хорошо сцепленных с основой, плотных оксидных пленок, препятствующих развитию коррозионных процессов. При наличии таких пленок коррозионная стойкость конструкционных материалов многократно возрастает. Поскольку в этом методе пассивации основу защитных покрытий составляют оксидные соединения компонентов ста-

лей, то их стабильность определяется термодинамической активностью кислорода в теплоносителе. Основу защитных покрытий составляет смешанный оксид железа - магнетит Fe_3O_4 . При эксплуатации установок возможно снижение концентрации растворенного кислорода в расплаве до значений, равных или меньших равновесных с Fe_3O_4 , что приводит к разрушению пассивационных покрытий. С другой стороны, присутствие в контуре значительного количества кислорода нежелательно, так как это может привести к накоплению недопустимого количества оксидов теплоносителя, таким образом:

- при слишком низкой термодинамической активности кислорода ($< 10^{-4}$) в расплаве свинца-висмута или свинца не обеспечивается надежная антикоррозионная защита конструкционных сталей;
- при перенасыщении теплоносителя кислородом образуются шлаковые «блокады» на теплообменных участках контура, происходит нарушение проектных тепло-гидравлических характеристик циркуляционного контура, отклонение от штатных режимов эксплуатации, снижение ресурса работы оборудования.

Поэтому в процессе эксплуатации установок необходимо контролировать качество теплоносителя, поддерживая содержание растворенного кислорода на определенном уровне.

Целью проводимых работ являлась разработка научно-технических рекомендаций по конструктивным решениям, местам установки в контуре и режимам использования более простых и эффективных устройств регулирования окислительного потенциала в контурах со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями.

Практическая значимость: предполагается, что в результате проведенных исследований будет создано устройство, с помощью которого можно будет регулировать содержание кислорода в контуре, более простое, экономичное и эффективное, чем существующие на данный момент.

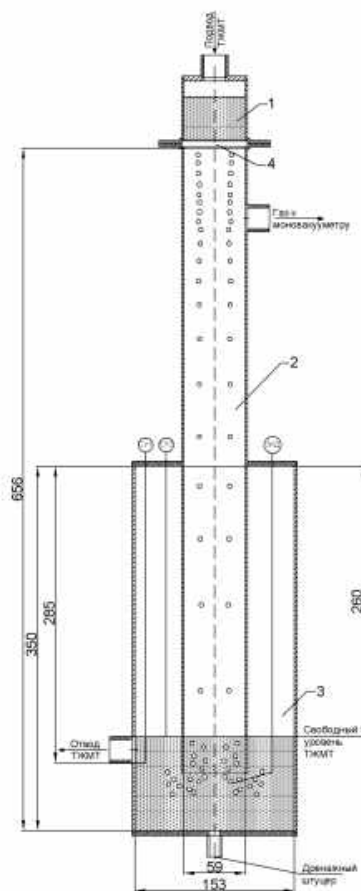


Рис. 1. Модель газового массообменника:

1 - напорная камера; 2 - вакуумная камера; 3 - приемная емкость; 4 - сменные пластины

На первом этапе проводились испытания газового массообменника МГМ2-ФТ3 в составе циркуляционного стенда со свинцовым теплоносителем в условиях, приближенных к натурным. Макетный образец газового массообменника МГМ2-ФТ3 предназначен для регулирования содержания примеси кислорода в свинцовом (свинец-висмутовом) теплоносителе, циркулирующем в составе соответствующего высокотемпературного жидкометаллического контура.

Газовый массообменник (рис. 1) содержит электрообогреваемый стальной цилиндрический корпус внутренним диаметром 59 мм, высотой 665 мм с жидкометаллическим теплоносителем и вакуумной камерой, в объеме которой падают струи жидкого металла, истекающие из сменной пластины с разным количеством отверстий и разными диаметрами отверстий, а также приемная емкость внутренним диаметром 153 мм, высотой 350 мм, в которую стекает жидкий металл. Сменные пластины имеют отверстия истечения $\varnothing 2, 3, 4, 5$ мм. Испытания проводились с пластиной с отверстиями истечения $\varnothing 4$ мм.

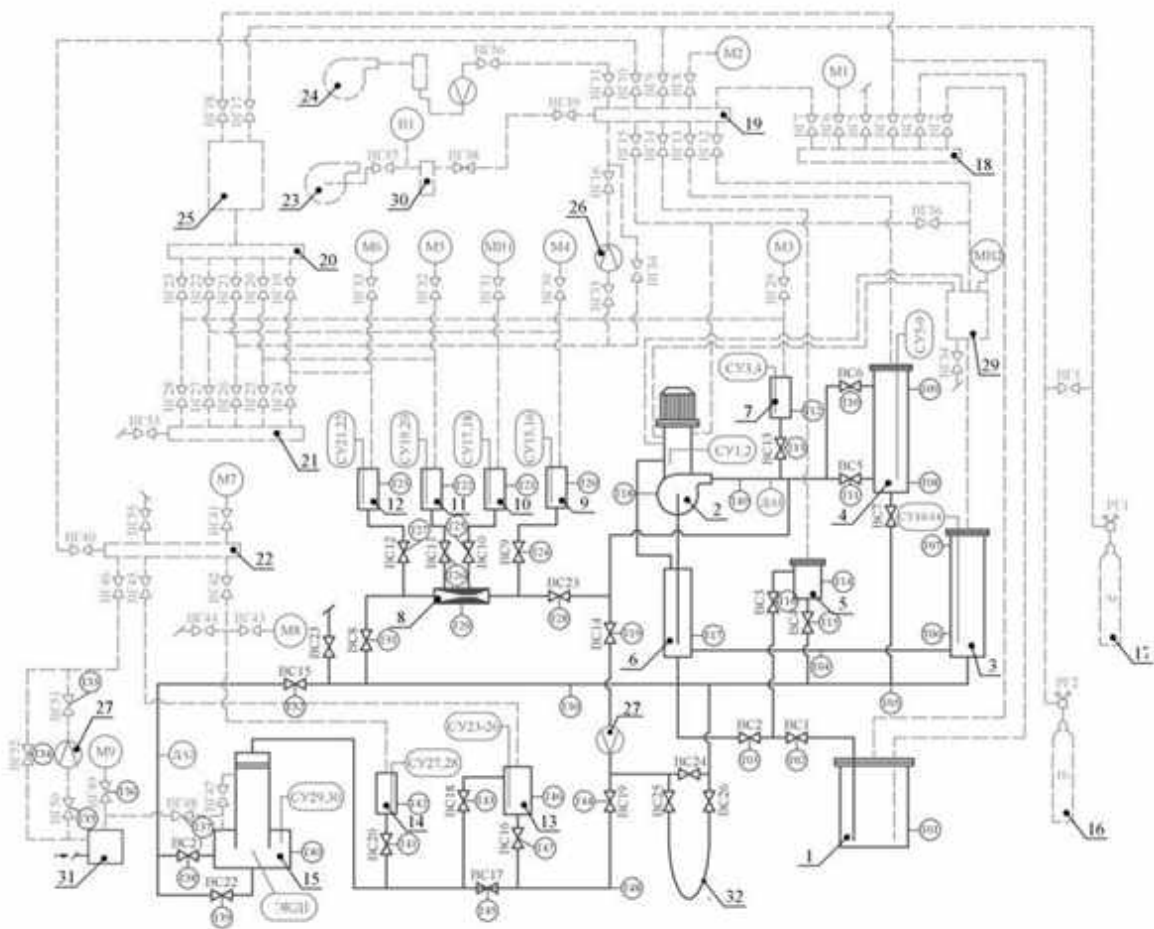


Рис. 2. Схема экспериментального стенда ФТ-3:

1 - бак плавильный; 2 - насос жидкометаллический; 3 - ёмкость сливная; 4 - ёмкость напорная; 5 - фильтр; 6 - патрубок всасывания; 7 - бачок отжимной насоса; 8 - эжектор; 9 - бачок отжимной входа в эжектор; 10, 11 - бачки отжимные эжектора; 12 - бачок отжимной выхода из эжектора; 13 - расходомерная ёмкость; 14 - бачок отжимной газового массообменника; 15 - газовый массообменник; 16 - баллон водородный; 17 - баллон аргоновый; 18 - коллектор высокого давления; 19 - коллектор низкого давления; 20 - коллектор высокого давления отжимных бачков эжектора; 21 - коллектор низкого давления отжимных бачков эжектора; 22 - газовый коллектор газового массообменника; 23 - вакуумный насос; 24 - компрессор; 25 - ёмкость газовая аккумулирующая; 26 - газовый расходомер; 27 - газовый расходомер газового массообменника; 28 - магнитный расходомер; 29 - холодильник; 30 - ловушка; 31 - увлажнитель; 32 - участок "экспресс-замораживания"

Сбоку напорной камеры расположен штуцер с трубой $\varnothing 23,0$ мм для подвода газа в вакуумную камеру. В приемной емкости установлены электроконтактные сигнализаторы уровня с подвижным центральным электродом. К напорной камере подключен трубопровод подвода теплоносителя от напора циркуляционного насоса. К приемной емкости подключен трубопровод отвода теплоносителя от газового массообменника к емкости насоса.

Результаты одной из серии экспериментов с подачей водорода в рабочую камеру газового массообменника (в газовой системе контура ТЖМТ – аргон) представлены на рис. 3, 4, 5.



Рис. 3. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,8 м³/ч)

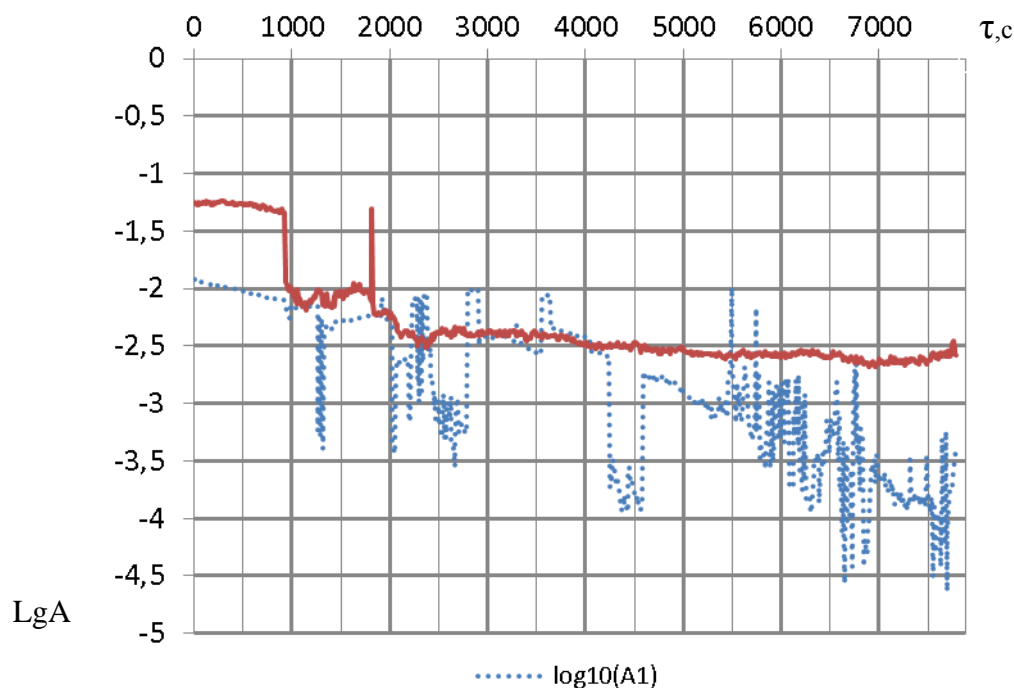


Рис. 4. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 при подаче увлажненного водорода (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,78 м³/ч)

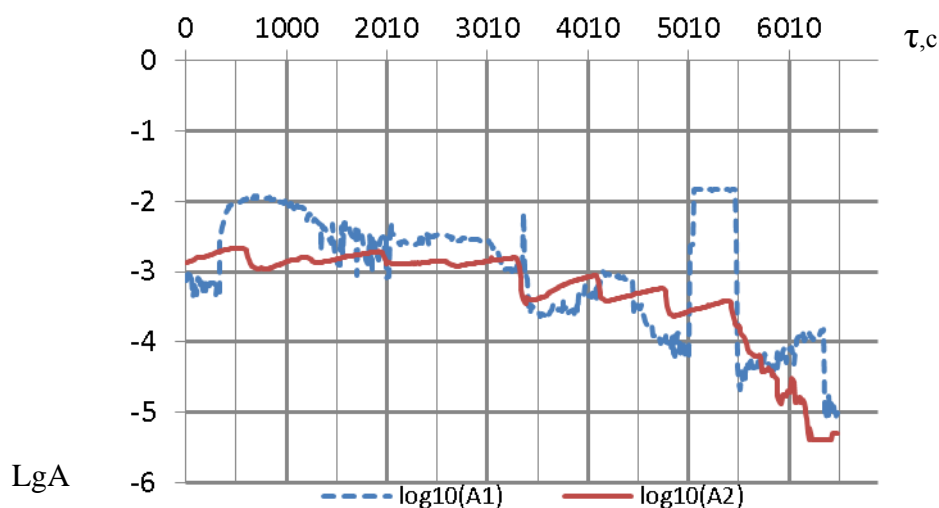


Рис. 5. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-3 при подаче сухого водорода (температура теплоносителя 450-460°C, расход 0,78 м³/ч)

Обсуждение результатов показывает следующее.

На всех графиках можно видеть скачки активности кислорода, это можно объяснить налипанием на стенку датчика активности пузырей кислорода или шлака. Это является недостатком конструкции применяемого в экспериментах устройства измерения активности кислорода.

Сравнивая динамику раскисления ТЖМТ при подаче сухого и увлажненного водорода, мы видим более плавное изменение активности в экспериментах на увлажненном водороде, в отличие от скачкообразной кривой динамики раскисления на сухом водороде, где каждый скачок соответствовал подаче сухого водорода в эжекционную камеру газового массообменника. Также можно отметить, что при подаче увлажненного водорода процесс эжекции струй теплоносителя в газовой камере идет менее эффективно. По графикам видно, что через два часа после начала эксперимента активность кислорода при подаче увлажненного водорода меньше на порядок, чем активность на сухом водороде. Это объясняется наличием кислорода в увлажненном водороде. При подаче такого водорода динамика раскисления ТЖМТ замедляется окислительными процессами.

На втором этапе эксперимента исследовались характеристики способа регулирования концентрации кислорода в ТЖМТ путем взаимодействия теплоносителя со струями эжектирующих окислительных или восстановительных газовых смесей в газовой полости осевого насоса.

Решаемой задачей являлось создание экспериментального стенда (рис. 6) со свинцовым теплоносителем, снабженного линиями ввода восстановительной (водородосодержащей) газовой смеси для очистки реакторного контура от твердой фазы частиц оксида свинца, а также линией ввода окислительной (кислородосодержащей) газовой смеси для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура. На верхних торцевых поверхностях труб постоянного напора насосов выполнены радиальные канавки формирования падающих струй теплоносителя, а надтрубное пространство труб постоянного напора сообщено с линиями подачи восстановительной и окислительной газовых смесей из газовой системы в газовый объем под свободный уровень теплоносителя. Сформировавшиеся струи теплоносителя захватывают пузырьки подаваемой газовой смеси в поток теплоносителя, что позволяет при необходимости, определяемой пока-

заниями датчика активности кислорода в свинце, вводить в контур либо окислительную газовую смесь для допассивации поверхностей контура, либо восстановительную газовую смесь для уменьшения содержания кислорода в ГЖМТ и (или) очистки теплоносителя и контура от твердой фазы оксидов теплоносителя.

Основные характеристики стенда ФТ-4 НГТУ

1. Теплоноситель – расплав свинца марки С0 ГОСТ 3778-98.
2. Масса теплоносителя $1 \cdot 10^4$ кг.
3. Температура свинцового теплоносителя – 450 – 500 °С, кратковременно 550 °С.
4. Расход теплоносителя, максимальный до $2.0 \cdot 10^3$ кг/ч (до 200 м³/ч).
5. Термодинамическая активность кислорода в свинцовом теплоносителе 10^{-5} - 10^{-4} до 10^0 плюс твердая фаза оксидов свинца.
6. Привод электронасоса – электродвигатель асинхронный, 2 шт., $n_{ном}=1500$ об/мин и 3000 об/мин, $N_{ном}$ до 50 кВт, с частотным регулированием скорости вращения.
7. Мощность электро-нагревательных спиралей стенда, суммарная до 100 кВт, напряжение 380/220 В.
8. Подшипник скольжения электронасоса контура свинцового теплоносителя на первом этапе – гидростатический щелевого типа.
9. Рабочее колесо и выпрямляющий аппарат – сменные, 2 компонента ЦКБМ и 2 компонента НГТУ.
10. Газ в системе газа: аргон, водород, аргоно-водородная и аргоно-кислородная смеси.
11. Система обогрева оборудования и трубопровода контура свинцового теплоносителя – электрическая, нихромовыми спиралями с кордиеритовыми бусами.

Принципиальная схема и компоновка контура

В состав контура свинцового теплоносителя входят следующие основные элементы (рис. 6):

- электронасос стенда с установленной в нем моделью проточной части ГЦН;
- задвижка регулирования расхода теплоносителя в контуре;
- парогенератор (теплообменный модуль);
- расходомерное устройство с отжимными бачками;
- струевыпрямитель;
- трубопроводы Ду 200 мм основного циркуляционного контура;
- сильфонный компенсатор Ду 200 осевого типа;
- бачки отжимные для замера давления на входе в электронасос и в его напорной камере;
- плавбак (бак дренажный);
- фильтр механический;
- трубопроводы и арматура систем очистки, заполнения и дренажа свинцового теплоносителя;
- подсистема контроля и регулирования содержания кислорода в свинцовом теплоносителе и очистки контура и теплоносителя от нерастворенных оксидов свинца;
- контрольно-измерительные приборы, входящие в систему сбора обработки и предоставления информации.

Экспериментальный участок представляет линию ввода восстановительной (водородосодержащей) газовой смеси для очистки контура от твердой фазы частиц оксида свинца, а также линию ввода окислительной (кислородосодержащей) газовой смеси для формирования и доформирования оксидных защитных покрытий на поверхностях конструкционных материалов контура в объем над трубой постоянного напора насоса.

В ходе проведения эксперимента были получены динамики изменения активности кислорода при подаче восстановительных (рис. 7) и окислительных (рис. 8) газовых смесей. Температура свинца составляла 490°С, расход 120 м³/ч.

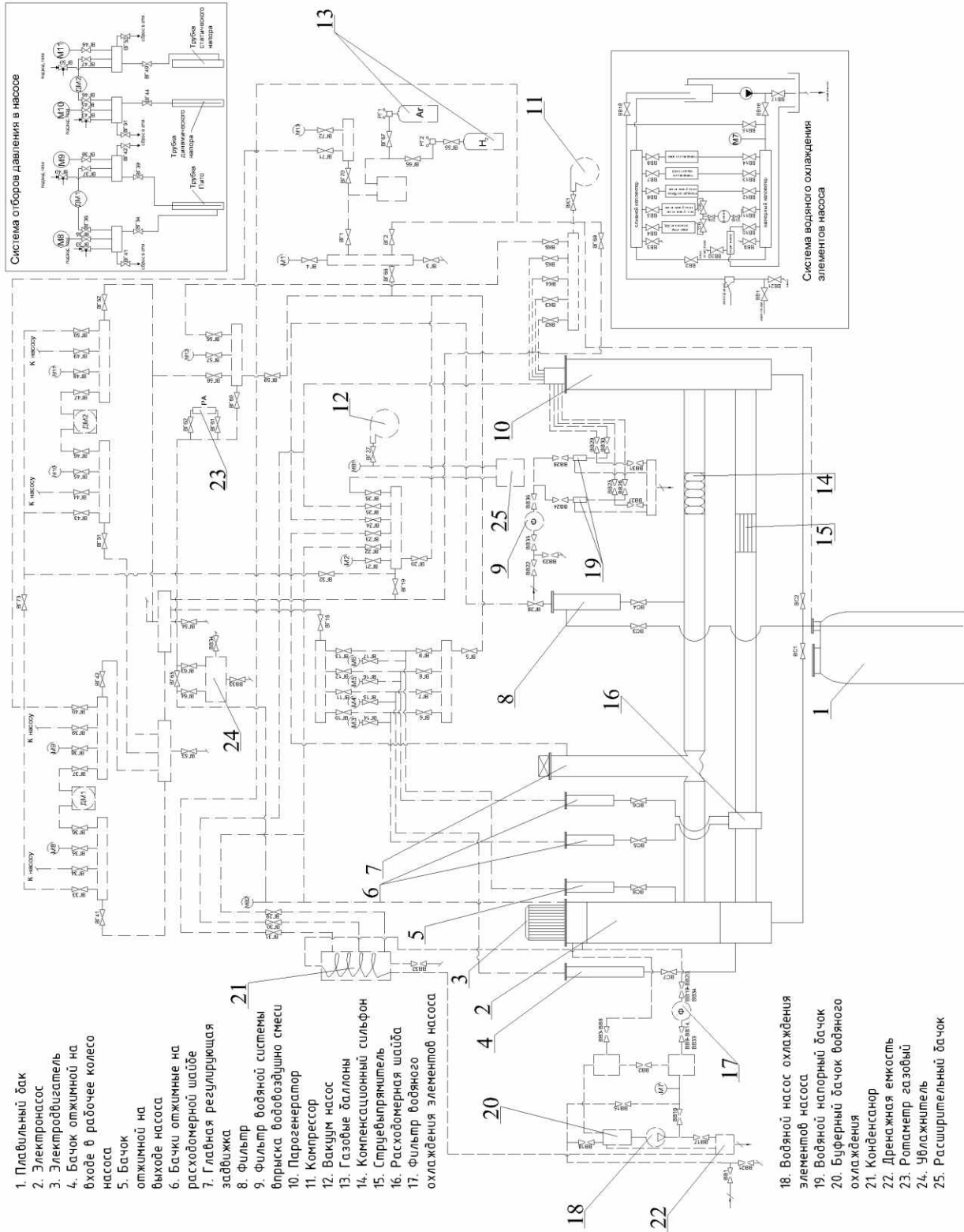


Рис. 6. Схема экспериментального стенда ФТ-4

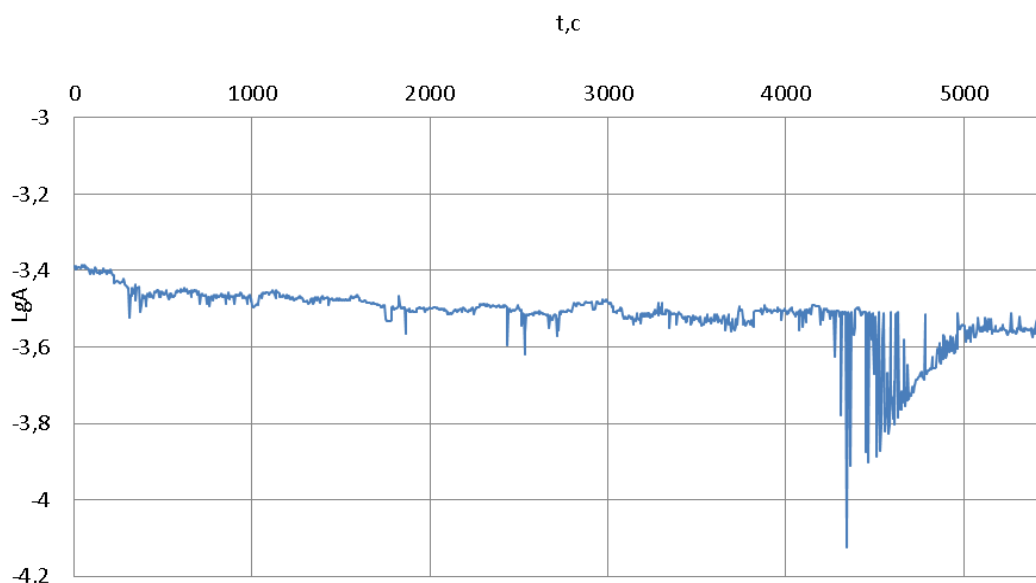


Рис. 7. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-4 НГТУ при подаче сухого водорода (температура теплоносителя 450-500°С, расход свинца 120 м³/ч, расхода водорода 0,4 г/ч)

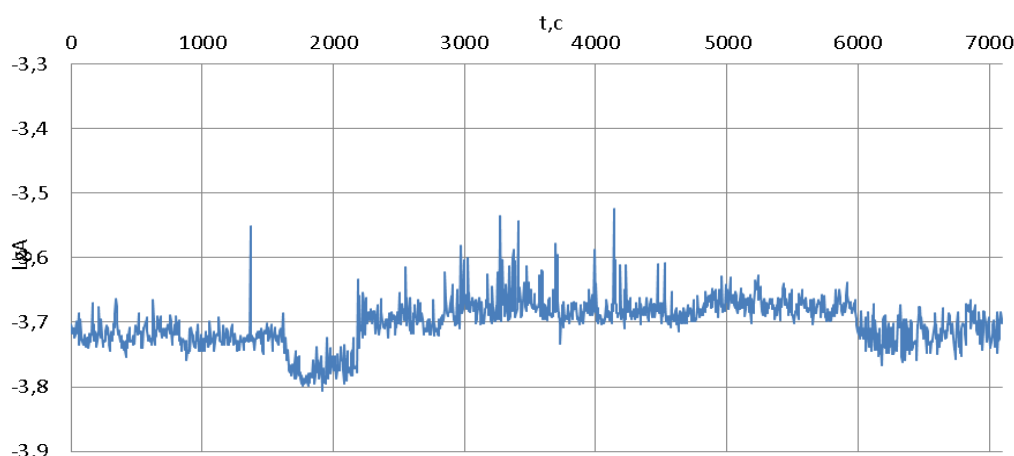


Рис. 8. Изменение окислительного потенциала теплоносителя в процессе эксперимента в серии испытаний на стенде ФТ-4 НГТУ при подаче кислорода (температура теплоносителя 490°С, расход свинца 120 м³/ч, расхода кислорода 36 г/ч)

Проведенные серии экспериментов подтвердили принципиальную возможность применения предложенного метода для поддержания заданного кислородного режима в энергетических контурах с ТЖМТ.

Преимущества данного метода:

- устройство формирует двухкомпонентный поток: жидкометаллический теплоноситель – газовые (газопаровые, восстановительные, нейтральные, окислительные) смеси с размерами пузырей 1.0 – 2.0 мм и менее;
- простота и малые массогабаритные показатели конструкции;
- отсутствие вращающихся частей и специальных электронагревателей, входящих в его состав;
- возможность использования осевых насосов, входящих в состав баковых реакторных контуров со свинцовым и свинец-висмутовым теплоносителями для работы устройства;
- отсутствие каналов с малыми проходными сечениями (менее 3.0 мм) для исключения их забивания примесями;
- возможность принудительной продувки каналов устройства водородосодержащими газовыми средами;

- возможность замены устройства при «горячем» состоянии контура;
- возможность контроля расхода эжектируемого газа при пусконаладочных работах или постоянно в процессе эксплуатации.

В процессе исследования метода:

- создан стенд и проведены исследования на воде;
- создан стенд и проведены исследования на "малом" объеме свинца;
- создан стенд для проведения исследований на "большом" объеме свинца.

Данный тип устройства после проведенных соответствующих испытаний может быть рекомендован для реакторных установок БРЕСТ и СВБРР.

Библиографический список

1. **Безносков, А. В.** Оборудование, компоновка и режимы эксплуатации контуров с тяжелыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – М., 2011.
2. **Славинский, М.П.** Физико-химические свойства элементов / М.П. Славинский. – М. 1952.
3. **Мартынов, П.Н.** Процессы шлакообразования в свинцово-висмутовом контуре. Предупреждение и ликвидация последствий // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: программа и тезисы докладов конференции. – Обнинск. ГНЦ РФ ФЭИ, 1998. С. 53.

*Дата поступления
в редакцию: 17.06.2014*

A.V. Beznosov, T.A. Bokova, A.D. Zudin, A.V. Lvov, A.O. Soloviev, A.S. Chernysh

WAYS OF REGULATING THE THERMODYNAMIC ACTIVITY OXYGEN LEAD COOLANT

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

Purpose: This paper describes the study of the processes accompanying the regulation of oxidative capacity heavy liquid metal with ejection oxidizing or reducing gas mixtures falling jets on its free coolant level with the capture of fine gas phase.

Design/methodology/approach: To maintain the rated oxygen content in a HLHC melt, the NNSTU specialists offer a method of ejecting oxidizing and fuel-rich gas mixtures in the volume of the circulating coolant owing to falling HLHC jets, for example, from the main circulation pump (MCP) constant head tube. The falling coolant jets capture bubbles of the relevant gaseous mixture into the coolant flow, which enables, in case of any need determined by the oxygen-in-lead activity sensor, to introduce into the HLHC either an oxidizing gaseous mixture for additional passivation of the loop surfaces or a fuel-rich gas mixture for reducing the oxygen content in the HLHC and/or purifying the coolant and the loop from the solid phase of the coolant oxides.

Findings: In such a manner, regulation of the oxidizing potential and purification of the coolant and the loop from oxygen are carried out due to the jets formed in grooves on the end surfaces of the constant head tubes contacting the relevant gaseous mixture, and formation of an extended gas bubble surface contacting the coolant as a result of falling of the jets onto the coolant free surface.

Research limitations/implications: The paper contains research results for regulating the oxidizing potential of a lead coolant using the method under review on the NNSTU FT-4 bench during testing the MCP flow part models designed by the NNSTU. The method under review may be used in conjunction with oxygen input devices by means of dissolving tablets of HLHC oxides or as an alternative method.

Originality/value: Advantages of this method:

- Formation of two-component flow: liquid metal coolant - gas (gas-steam, recovery, neutral, oxidative) mixed with bubble size 1.0 - 2.0 mm or less;
 - Simplicity and small dimensions and weight design;
 - No moving parts and special electric heaters in its composition;
 - The use of axial flow pumps are part of the tank reactor circuits with lead and lead-bismuth coolant to operate the device;
 - Lack of channels with small flow passages (less than 3.0 mm) to prevent them clogging impurities;
 - The possibility of a forced purge device channels hydrogen-gas service;
 - The ability to control the flow of gas ejected during commissioning or permanently during operation.
- oxidizing potential, lead end lead-bismuth heat carrier, dispersant, model, mass-transfer apparatus

Key words: oxidation potential, lead and lead - bismuth coolant, dispersion make, model, massoobmennyyh.

УДК 621.039.4

А.Н. Ганичев, Ю.И. Аношкин

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АППАРАТОВ ВОЗДУШНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ В КАЧЕСТВЕ АЛЬТЕРНАТИВНОГО СПОСОБА ОТВОДА ТЕПЛА ОТ АТОМНОЙ СТАНЦИИ МАЛОЙ МОЩНОСТИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируется возможность использования аппаратов воздушного охлаждения в качестве альтернативного способа отвода тепла от АЭС малой мощности на базе корабельной установки КЛТ-40С. Проведен анализ различных видов теплопередающих поверхностей с целью определения оптимальной с точки зрения эффективности теплопередачи, величины аэродинамического сопротивления, металлоемкости и технологичности.

Ключевые слова: аппарат воздушного охлаждения, атомная станция малой мощности, оребрение, коэффициент оребрения.

Основное направление развития современной атомной энергетики – развитие сети малых АЭС, базирующейся на модульных ядерных реакторах сравнительно небольшой мощности. Применение атомных реакторов малой мощности (100 - 180 МВт тепловых), более 30 лет используемых в судовых и корабельных атомных энергетических установках, для энергообеспечения труднодоступных отдаленных районов России долгое время оставалось вне поля зрения специалистов и широкой общественности [1]. Приоритеты в области энергетики в прошлом принадлежали развитию единой энергосистемы на основе создания крупных генерирующих мощностей (1500 МВт тепловых в блоке) и строительства гигантских энергокомплексов. Вместе с тем зона децентрализованного энергоснабжения занимает порядка двух третей территории России и характерна тем, что именно на этой территории проживают группы населения, уровень жизни которых в значительной степени зависит от энергообеспечения поселков и соответствующих производств. С другой стороны, эта зона обладает значительными запасами полезных ископаемых, добыча которых сдерживается или сворачивается из-за отсутствия или большой стоимости инфраструктуры, прежде всего энергетики и транспорта. Очевидно, что для этой обширной территории, которая отличается низкой средней плотностью населения, решить проблему развития энергетики путем крупного сетевого строительства практически невозможно. В России имеется пятьдесят регионов, где уже существует потребность в атомных станциях малой мощности.

Малая атомная энергетика может и должна стать основой создания децентрализованных систем энергообеспечения. Целесообразность использования атомных станций малой мощности (АСММ) определяется комплексом объективных факторов, включающих экономическую и социальную эффективность, охрану окружающей природной среды, возможности производства оборудования, финансирования. Для массового индустриального строительства миниэнергетических атомных систем, в том числе в малых поселениях, а также микрорайонах и даже отдельных зданиях больших городов, необходимо создание принципиально новой индустрии мирового уровня - модульной ядерной энергетики. Речь идет о строительстве модульных ядерных мини-АЭС из функциональных унифицированных модульных блоков [1].

Самым перспективным в отношении безопасности и экономической эффективности является использование АСММ на базе транспортных установок с наземным базированием.

Этот тип АСММ имеет множество плюсов, но у него есть существенный недостаток: для него необходимо наличие водных ресурсов, так как традиционно сложилось, что отвод тепла от энергетической установки осуществляется в воду. Однако использовать воду не всегда возможно, особенно это касается районов дальнего севера. Чтобы снять ограничения по району базирования и повысить рентабельность АЭС, необходимо адаптировать транспортные установки под использование вне водных ресурсов, т.е. нужны альтернативные способы отвода тепла от ЯЭУ. К ним можно отнести: отвод излучением в окружающую среду, отвод теплопроводностью к земле, отвод с помощью аппарата воздушного охлаждения (АВО) к окружающему воздуху.

Отвод тепла с помощью АВО – наиболее реалистичная альтернатива, т.к. имеются большие наработки в химической и нефтяной промышленности. Аппараты, основанные на излучении, имеют широкое применение в космической отрасли, но у них очень низкий КПД (не превышает 1%). А отвод тепла в землю совершенно непригоден для использования в северных районах (вечная мерзлота).

Применение АВО дает ряд эксплуатационных преимуществ:

- экономия охлаждающей воды и уменьшение количества сточных вод,
- сокращение затрат труда на чистку аппарата ввиду отсутствия накипи и солеотложения,
- уменьшение расходов на организацию оборотного водоснабжения технологических установок,
- возможность эксплуатации АВО с температурой окружающего воздуха от -55 до $+50^{\circ}\text{C}$, т.е. возможно создать мобильную мини АЭС без ограничения районов ее использования.

Чаще в АВО в качестве поверхности теплообмена используют трубки с наружным оребрением, в результате чего существенно повышается отводимая тепловая мощность. Интенсификация теплообмена с помощью оребрения поверхности труб может быть достигнута только при условии хорошего подвода тепла от стенок труб к ребрам, что обеспечивается изготовлением ребристых труб из материалов с высоким коэффициентом теплопроводности или изготовлением ребристых труб из биметалла.

Учитывая большое разнообразие видов оребрения, необходим комплекс исследований, направленных на поиск наиболее эффективной теплопередающей поверхности, что позволит при существующих габаритах АВО увеличить тепловой поток без заметного роста затрат мощности на прокачку воздуха.

Был проведен анализ четырех видов теплопередающих поверхностей:

- 1) гладкая труба,
- 2) труба с дисковыми ребрами,
- 3) труба с трапециевидными ребрами,
- 4) труба со спиральными ребрами.

Расчетный анализ эффективности теплопередачи, аэродинамического сопротивления и металлоемкости шахматных пучков труб при поперечном обтекании воздуха показал следующие результаты:

- Коэффициент теплоотдачи гладкой трубы выше оребренных, однако количество переданного тепла для оребренных трубных систем больше. Это объясняется хорошо развитой поверхностью теплообмена ребристых труб, что определяется большим коэффициентом оребрения труб. Следует отметить, что коэффициенты теплоотдачи и теплопередачи оребренных труб разного вида оребрения схожи, разница не превышает 10%. Таким образом, применение оребренных трубных систем более предпочти-

коэффициента теплопередачи, но отличаются только технологией изготовления, определяемой возможностью производителя или его технической базой. Поэтому за основу целесообразно взять самый простой и хорошо освоенный способ оребрения – накатные ребра.

В качестве примера рассмотрим возможность отвода тепла от АППУ АСММ на базе КЛТ-40С (рис. 1). При этом за основу выбран наиболее распространенный и хорошо отработанный в других отраслях промышленности аппарат воздушного охлаждения горизонтального типа (АВГ) с биметаллическими трубами. Блок-схема программы расчета этого типа АВО изображена на рис. 2. Результаты расчетной оценки количества АВО в зависимости от их геометрических параметров представлены в табл. 1.

Анализ полученных результатов показывает, что для выбранного типа АСММ отвод тепла возможен при использовании 4 АВО типа АВГ-14.6-1-Б3-30/8-1-8 с длиной труб 8 метров или 8 АВО типа АВГ-14.6-1-Б3-30/8-1-4 с длиной труб 4 метра. При этом потребляемая мощность электродвигателей вентиляторов составляет 120-240 кВт соответственно.

Таблица 1

Результаты анализа оценки количества использования АВО, необходимых для отвода тепла от системы 3-го контура АСММ

Температура воздуха на входе в АВГ	⁰ С	20					
Температура воды на входе в АВГ	⁰ С	89					
Общий объемный расход воды	м ³ /с	0.032					
Давление воды	МПа	1					
Мощность тихоходного электродвигателя двигателя	кВт	30					
Длина теплообменных труб	м	4			8		
Диаметр рабочего колеса вентилятора	м	2.8					
Количество колес вентиляторов на одном АВО	шт.	1			2		
Коэффициент оребрения		9	14.6	20	9	14.6	20
Шаг ребра	мм	3.5	3.0	2.5	3.5	3.0	2.5
Число рядов труб в секции		8					
Число ходов по секциям		1					
Температура воды на выходе из АВГ	⁰ С	36.83	36.78	39.39	31.56	35.75	38.64
Температура воздуха на выходе из АВГ	⁰ С	34.71	31.81	27.39	34.14	31.43	27.49
Аэродинамическое сопротивление	Па	269.11	271.35	249.98	269.61	271.82	250.33
Отводимая мощность одним АВГ	кВт	979.92	858.29	543.31	1890.47	1750.8	1103.27
Требуемое количество АВГ	шт.	7	8	12	4	4	6

Таким образом, полученные результаты показывают, что аппараты воздушного охлаждения могут быть использованы в качестве альтернативного способа отвода от АЭС малой мощности.



Рис. 2. Блок-схема расчетной программы для АВГ

Библиографический список

1. Атомная энергия. Т. 111. Вып. 5 (ноябрь 2011 г.)
2. Куртыш, В.Б. Основы расчета и проектирования теплообменников воздушного охлаждения: справочник / В.Б. Куртыш, А.Н. Бессонный. – СПб.: Недра, 1996. – 512 с.

*Дата поступления
в редакцию 03.06.2014*

A.N. Ganichev, J.I. Anoshkin

ANALYSIS OF POSSIBILITY OF USE AIR-COOLED HEAT EXCHANGERS AS AN ALTERNATIVE METHOD OF REMOVING HEAT FROM LOW-POWER NUCLEAR POWER PLANT

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

Purpose: Low-Power Nuclear Plant is the most safety and cost-effective plant on the basis of shipboard installation with ground basing. This type has a lot of pluses, but it has one important defect, water resources are necessary. So, necessary transport installations adapted to outdoor use of water resources. I.e. we need to search for alternative ways of removing heat from nuclear power.

Design/methodology/approach: The possibility of use air-cooled heat exchangers is analyzed in the article as an alternative method of removing heat from low-power nuclear power plants on the basis of a ship facility KLT-40S. The analysis of different types of heat transmitting surfaces is conducted with the purpose – to determine the optimal from the point of view of efficiency heat transfer, aerodynamic resistance sizes, metal consumption and manufacturability.

Findings: The results of estimating the number of air cooling units depending on their geometrical parameters with the use of the software were got.

Research limitations/implications: this study allows us to evaluate the possibility of using air-cooled heat exchangers in nuclear power.

Originality/value: The software is developed, allowing for minimal input to get the value of the coefficient of heat transfer piping system and other basic characteristics of air-cooled heat exchangers.

Key words: air-cooled heat exchangers, low-power nuclear power plant, ribbing, ribbing factor.

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 629.113

У.Ш. Вахидов, А.В. Согин, В.А. Шапкин, Ю.В. Шапкина

ЧИСЛЕННЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ УЗЛОВ АВТОМОБИЛЕЙ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Представлены результаты численных исследований колебаний рулевой колонки *N L42L MG* («Ниссан»). Численное моделирование с помощью метода конечных элементов проводилось с использованием программного комплекса *ANSYS*, подготовка модели осуществлялась в программном пакете *HyperMesh*, для визуализации результатов анализа использован программный пакет *HyperView*. Были проанализированы входящие в программный комплекс «Ансис» методы анализа собственных частот и форм колебаний: *Block Lanczos* метод, *PCG Lanczos* метод, *Supernode (SNODE)* метод, *Reduced (Householder)* метод, *Unsymmetric* метод, *Damped* метод, *QR Damped* метод. На основании сравнения различных способов для проведения модального анализа рулевой колонки был выбран метод *Блок Ланцош*.

Ключевые слова: рулевая колонка, численное моделирование, метод конечных элементов, модальный анализ, анализ собственных частот и форм колебаний.

Основные положения модального анализа

Нормальная мода детали или узла (форма собственных колебаний) – это «шаблон» движения, в котором все части детали или узла перемещаются синусоидально с одной частотой и фазой. Набор частот собственных колебаний составляет колебательный спектр системы. Произвольное колебание физической системы можно представить в виде суперпозиции («сложения») собственных (нормальных) колебаний. Вынужденные колебания физической системы имеют резонанс на частотах, которые совпадают с частотами нормальных (собственных) колебаний. Это определяет важность и необходимость модального анализа системы рулевого управления автомобиля, на которое передаются вибрации от кузова, колес и силовой установки автомобиля.

Для удобства анализа моды колебаний делят на два класса:

1. Нормальные моды - характерны тем, что все части конструкции перемещаются в фазе или в противофазе (сдвиг 180 град) по отношению друг к другу. Нормальные моды можно рассматривать как стоячие волны с неподвижными узловыми линиями.
2. Комплексные моды имеют какое угодно соотношение между фазами в различных частях конструкции. Формы комплексных мод могут рассматриваться как распространяющиеся волны без стационарных узловых линий.

Распределение способности затухания (демпфирования) колебаний по телу конструкции определяет наличие нормальных и комплексных мод. Когда конструкция имеет малое затухание колебаний - моды будут нормальными. Конструкции с локализованными местами затухания колебаний имеют только комплексные моды. Модальная связь указывает на то, насколько сильно на реакцию конструкции при одной модальной частоте оказывает влияние другие моды колебаний. Модальную связь наблюдают на амплитудно-частотной характеристике вблизи модальной частоты.

Моды колебаний конструкций со слабым затуханием четко разделены друг от друга,

т.е. они слабо связаны. Такие конструкции ведут себя как системы с одной степенью свободы вблизи моды (частоты собственных колебаний) и называются «простыми», для них характерны слабо связанные моды. Модальный анализ простых конструкций применяется при поиске неисправностей конструкций, когда на амплитудно-частотных характеристиках появляются мало демпфированные, хорошо выделяющиеся резонансы. Амплитудно-частотные характеристики конструкций с сильным затуханием или высокой модальной плотностью не показывают четко разделенные моды. Реакция таких конструкций при любой частоте представляет собой комбинацию многих мод и используется термин «сильно связанные» моды, а для конструкций - «сложные» конструкции.

Математическая модель модального анализа

Модальный анализ процессов для определения N собственных частот и режимов формы проводился на основе уравнения колебания (рис. 1):

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = 0,$$

где $[M]$, $[C]$ и $[K]$ - масса, демпфирование и жесткость структуры в матричной форме [6].

Если пренебречь эффектом затухания, то уравнение примет вид:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0.$$

Решая дифференциал второго порядка получим:

$$\{x\} = \{\phi\}e^{i\omega t}.$$

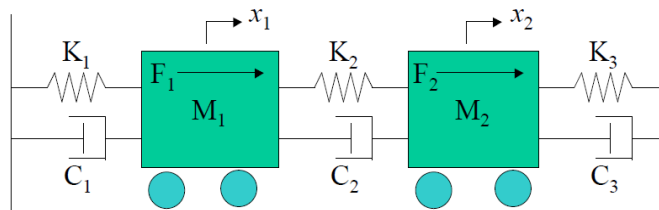


Рис. 1. Колебательная система

Структурные вибрации с одной степенью свободы (термин степень свободы или сокращенно *DOF -degrees of freedom*):

$$u = \phi \cos \omega t,$$

где u - узловые перемещения; ϕ - амплитуда перемещений.

Структурные вибрации для всей структуры:

$$\{u\} = \{\phi\} \cos \omega t,$$

где $\{u\}$ - вектор узловых перемещений; $\{\phi\}$ - вектор амплитуд для каждой степени свободы.

Форма колебаний показана на рис. 2. Вектора амплитуд представляют собой форму колебаний:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t,$$

индекс i используется для различения форм колебаний и частот.

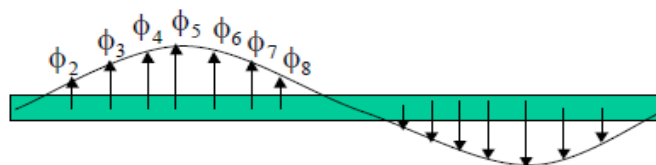


Рис. 2. Форма колебаний

Определение собственных частот

Рассмотрим систему с множеством степеней свободы:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{0\} \quad (1)$$

Система – незатухающая (не имеет коэффициента затухания), не возбуждается внешним силам. Если система вибрирует в соответствии с определённой формой колебаний и частотой:

$$\{u\} = \{\phi\}_i \cos \omega_i t \quad (2)$$

где $\{\phi\}_i$ – собственный вектор представляющий i -ую форму колебаний; ω_i – i -я собственная круговая частота (радиан за единицу времени); t – время.

Первая производная уравнения перемещения – скорость выражается как:

$$\{\dot{u}\} = -\omega_i \{\phi\}_i \sin \omega_i t$$

Вторая производная – ускорение, будет записываться:

$$\{\ddot{u}\} = -\omega_i^2 \{\phi\}_i \cos \omega_i t$$

Подставляем скорость и ускорение в уравнение движения:

$$(-[M]\omega_i^2 + [K])\{\phi\}_i = \{0\} \quad (3)$$

Это уравнение имеет два решения –

- либо $\{\phi\}_i = 0$, либо когда определитель данной системы равен нулю, то есть:

$$\det(-[M]\omega_i^2 + [K]) = 0$$

Проблемы собственных значений

Число λ называется собственным значением матрицы $[A]$, если существует не нулевой вектор $\{x\}$, такой что:

$$[A]\{x\} = \lambda[I]\{x\},$$

где λ – собственная величина (*Eigenvalue*); $\{x\}$ – собственный вектор (*Eigenvector*); $[I]$ – единичная матрица.

Задача о собственных значениях в модальном анализе записывается так.

$$\det(-[M]\omega_i^2 + [K]) = 0 \quad (4)$$

$$(-[M]\omega_i^2 + [K])\{\phi\} = [0]$$

$$[K]\{\phi\} = \omega_i^2 [M]\{\phi\}$$

$$[M]^{-1}[K]\{\phi\} = \omega_i^2 [I]\{\phi\} \quad (5)$$

где ω_i^2 – значение собственной частоты, является собственной величиной; $\{\phi\}$ – форма колебаний, является собственным вектором.

$$[M]^{-1}[K]\{\phi\} = \omega_i^2 [I]\{\phi\}$$

$$[A]\{x\} = \lambda[I]\{x\}$$

Решение проблемы собственных значений:

$$([A] - \lambda[I])\{x\} = 0$$

$$\det([A] - \lambda[I]) = 0$$

Для решения уравнения (5) в пакетах прикладных программ используют различные численные методы. Решением уравнения (5), если n – порядок матрицы, является характери-

стический полином n -го порядка, который имеет n корней: $\omega_1^2, \omega_2^2, \omega_3^2 \dots \omega_n^2$, где n - □ число степеней свободы. Эти корни являются собственными значениями уравнения.

Собственные вектора $\{\phi\}_i$, получают путем подстановки полученных корней, в уравнение (3). Собственное значение ω_i^2 определяет собственную частоту системы $\sqrt{\omega_i^2}$, а собственный вектор $\{\phi\}_i$ □ соответствующую форму колебаний (перемещение системы). Значения собственных круговых частот (ω) и собственных частот (f) связаны следующим соотношением:

$$f_i = \frac{\omega_i}{2\pi},$$

где f_i - i -я собственная частота (циклов в единицу времени).

Основные характеристики и особенности применяемых программных пакетов

В последние два десятилетия численное моделирование с помощью метода конечных элементов было успешно интегрировано в процесс разработки продукта в автомобильной промышленности. Нелинейные (например, стойкость к ударным нагрузкам) и линейные варианты моделирования (например, комплексный виброакустический и прочностной анализ) были успешно реализованы, и поэтому процесс разработки автомобилей в настоящее время осуществляется с помощью численного моделирования [3].

Анализ шума и вибраций в автомобилестроении использует большие и сложные модели, используемые для анализа методом конечных элементов. Модели могут включать миллионы конечных элементов, тысячи компонентов и свойств, а также связи между этими компонентами. Для решения подобных задач необходимо использовать современные программные пакеты для надежного процесс анализа, которые быстро дают результаты, подтвержденные практикой.

Этап численного моделирования и подготовка моделей проводится с использованием программных комплексов *ANSYS*, *HyperMesh*, *HyperView* (рис. 3).

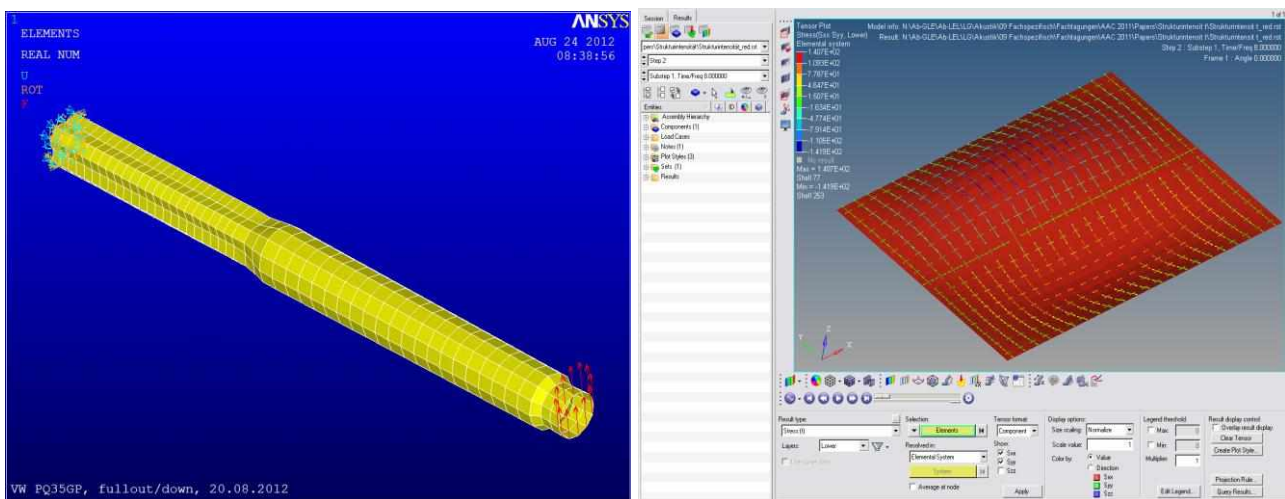


Рис. 3. Пример использования программных пакетов *ANSYS* и *HyperView* для моделирования поведения вала (слева) и визуализации плотности потока энергии волн в прямоугольной пластине (справа)

ANSYS – универсальная программная система конечно-элементного анализа, существующая и развивающаяся на протяжении последних 30 лет, популярная у специалистов в

сфере автоматических инженерных расчётов (*CAE, Computer-Aided Engineering*) и конечно-элементных решений линейных и нелинейных, стационарных и нестационарных пространственных задач механики деформируемого твёрдого тела и механики конструкций (включая нестационарные геометрически и физически нелинейные задачи контактного взаимодействия элементов конструкций), задач механики жидкости и газа, теплопередачи и теплообмена, электродинамики, акустики, а также механики связанных полей. Моделирование и анализ в некоторых областях промышленности позволяет заменять дорогостоящие и длительные циклы разработки типа «проектирование – изготовление – испытания». Система работает на основе геометрического ядра *Parasolid*.

Для решения задач структурной механики (механики сплошных сред) «Ансис» предлагает два специализированных программных обеспечения.

1. *ANSYS Structural* – программное обеспечение реализует чистое структурное моделирование без использования посторонних инструментов. Продукт позволяет реализовывать анализ конструкции в нелинейной постановке, а также предоставляет все возможности линейного анализа, что обеспечивает высококачественные, надежные результаты структурного моделирования.

2. *ANSYS Mechanical* – программное обеспечение для комплексного линейного, нелинейного и динамического анализ конструкций. Программный пакет обеспечивает полный набор поведения элементов, моделей материалов и уравнения решателей для инженерных задач. Кроме того, *ANSYS Mechanical* позволяет реализовывать акустический, пьезоэлектрический, термо-прочностной и термоэлектрический анализы.

Платформа *HyperWorks*, включающая в себя инструменты для моделирования, анализа, визуализации и управления данными для линейных и нелинейных задач, структурной оптимизации, изучения взаимодействия рабочей среды с конструкцией и динамики составных структур, обеспечивает всестороннюю, открытую архитектуру конечно-элементных решений.

HyperMesh – это независимая от *CAE*-решателей (конечно-элементных) среда для быстрой и высокоточной подготовки моделей. Программный пакет *HyperMesh* создан как препроцессор для высокоэффективного конечно-элементного анализа, позволяет работать в интерактивной визуализированной среде для определения характеристик модели при разработке продукта. *HyperMesh* является средой, которую используют для: моделирования твердотельной геометрии, моделирования геометрии поверхности, создания оболочечной сетки, создания твердотельной сетки, визуальной обработки модели, автоматической генерации срединной поверхности, точной настройки модели, создания сетки в пакетном режиме.

HyperView – это программный пакет для пост-процессинга и визуализации результатов конечно-элементного анализа, моделирования многокомпонентных систем, обработки цифрового видео и инженерных данных. *HyperView* позволяет создавать высококачественную анимацию и функции построения графиков. *HyperView* сочетает в себе возможность создавать высококачественную анимацию и функции построения графиков с синхронизацией рабочих окон для улучшения визуализации. *HyperView* также сохраняет 3D-анимацию в компактном формате *AltairH3D*. Таким образом, пользователи могут просматривать результаты *CAE* анализа и делиться ими с другим пользователями при помощи *Altair HyperView Player*.

Выбор метода анализа собственных частот и форм колебаний

Так как для проведения численного эксперимента был выбран программный комплекс «Ансис» [1, 2, 6], были опробованы на практике и проанализированы входящие в него методы анализа собственных частот и форм колебаний: *Block Lanczos* метод, *PCG Lanczos* метод, *Supernode (SNODE)* метод, *Reduced (Householder)* метод, *Unsymmetric* метод, *Damped* метод, *QR Damped* метод.

Block Lanczos метод применяется, чтобы найти много режимов (более 40) больших моделей. Рекомендуется, если модель состоит из сложной формы твердых элементов и элементов оболочки. Этот решатель работает хорошо, когда модель состоит из оболочек или комбинации оболочек и твердых тел. *Block Lanczos* метод использует собственный решатель - алгоритм Ланцоша, где расчет выполняется с блоком векторов. Этот метод особенно эффективен, когда поиск собственных частот проводится в выбранной части спектра собственных значений системы. Скорость сходимости собственных частот будет примерно такая же при извлечении мод в средних и высших концах спектра, как при извлечении низших мод (частот собственных колебаний).

PCG Lanczos метод используется, чтобы найти несколько режимов (до 100) очень больших моделей (500,000 + степеней свободы). Этот решатель выгоден, когда низшие режимы колебаний будут присутствовать в модели, которая в большинстве состоит из хорошо сформированных 3-D твердых элементов (то есть модели, которые, как правило, являются хорошими кандидатами для использования в *PCG*-итерационном методе для аналогичного статического или полного анализа переходных процессов).

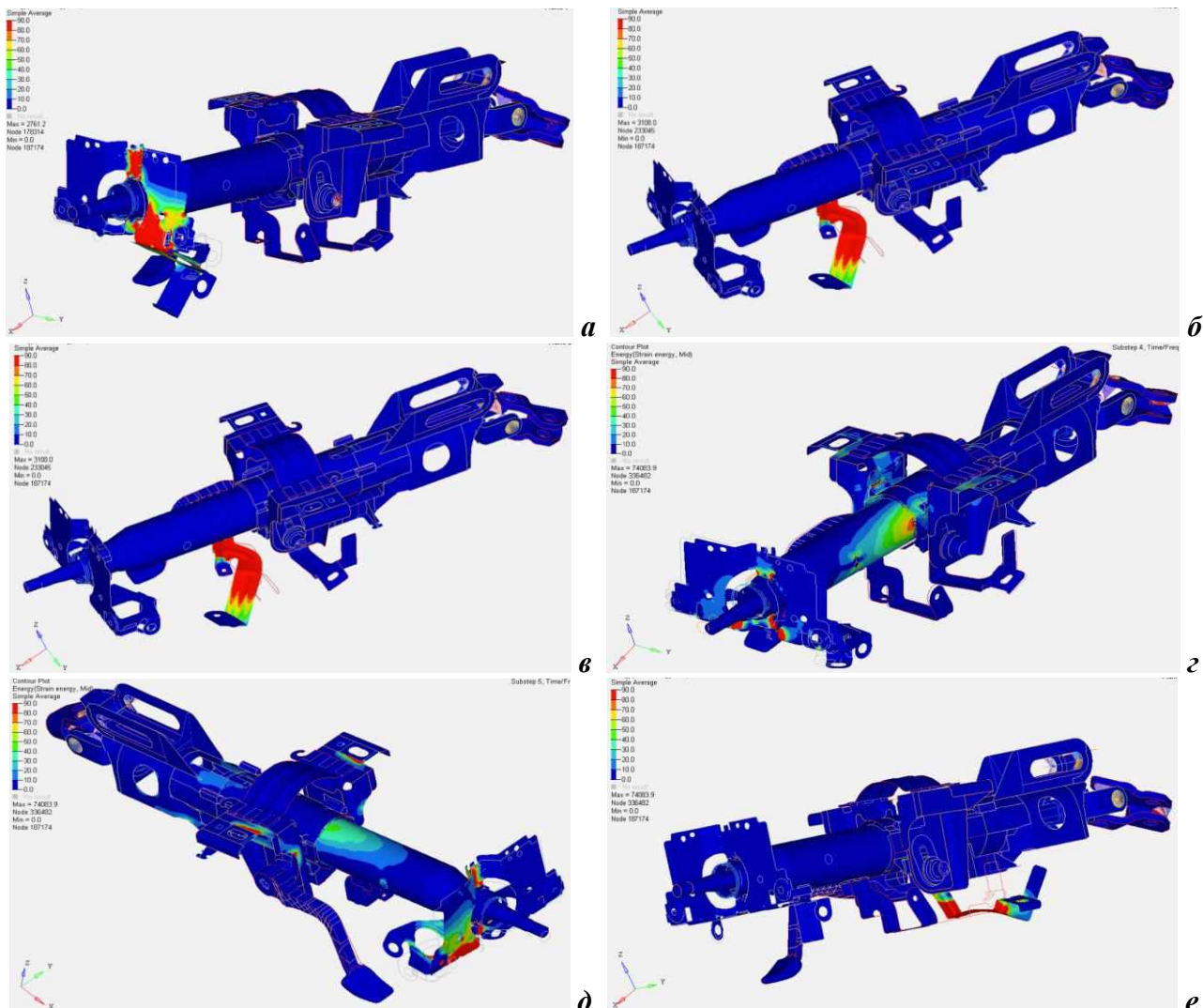


Рис. 4. Величины перемещений (максимум - красный, минимум - синий) рулевой колонки *N L42L MG* («Ниссан») для первых шести частот собственных колебаний (мод): *a, б, ..., e* — соответственно 1...6-я моды

Метод *PCG Lanczos* внутри использует алгоритм Ланцоша, в сочетании с *PCG* итерационным методом. Этот метод будет значительно быстрее, чем *Block Lanczos* метод в следу-

ющих случаях: большие модели, где преобладают 3-D твердые элементы и нет плохо обусловленных матриц из-за, например, плохой формы элементов; когда требуются лишь немногие из самых низких форм колебаний. Плохо обусловленные матрицы или требование множества режимов (например, более 100 режимов) могут привести к неэффективному времени обработки с помощью этого метода. Метод *PCG Lanczos* находит только низкие собственные значения, и не рекомендуется для случаев моделирования, когда нижний диапазон входных значений собственных частот далек от нуля.

Supernode (SNODE) метод используется, чтобы эффективно найти много режимов (до 10 000). Этот метод наиболее оптимален для 2-D плоскостных элементов или оболочно/балочных конструкций (100 режимов и более) и для 3-D твердых структурных элементов (250 режимов и более). *Supernode (SNODE)* решатель используется для решения больших и симметричных задач на собственные значения для многих форм колебаний (до 10 000 и выше) в одном решении. Как правило, причиной поиска многих форм колебаний является выполнение последующего режима-суперпозиции или *PSD* анализа для получения ответа в более высоком частотном диапазоне. Как правило, этот метод предлагает более быстрое решение, чем Блок Ланцош или *PCG* Ланцош, если число запрашиваемых режимов составляет более 200.

Reduced (Householder) метод используется, чтобы найти все режимы малых и средних моделей (менее 10 000 степеней свободы). Может быть использован для поиска нескольких режимов (примерно до 40) крупных моделей с правильным выбором мастер-степеней свободы (*MDOFs*), но точность определяется выбором частотно зависимых *MDOFs*. *Reduced* метод использует алгоритм *HBI (Householder-Bisection-Inverse iteration)* для вычисления собственных значений и собственных векторов. Это сравнительно быстрый алгоритм, потому что он работает с небольшим набором степеней свободы, называемых мастер-степени свободы (*MDOFs*). Использование *MDOFs* приводит к точной [K] матрице, но приближительной [M] матрице (обычно с некоторой потерей массы). Точность результатов, следовательно, зависит от того, как матрица [M] аппроксимируется, которая в свою очередь зависит от количества и расположения мастеров.

Unsymmetric метод использует полные [K] и [M] матрицы и предназначен для задач, в которых матрицы жесткости и массы несимметричны (например, акустические проблемы взаимодействия жидкость-структура). Действительная часть собственной величины представляет собой естественную частоту, а мнимая часть является мерой стабильности системы - отрицательное значение означает, что система стабильна, тогда как положительное значение означает, что система нестабильна. Ускоренная последовательность проверки недоступна для этого метода. Таким образом, есть возможность пропустить формы колебаний на более высоком конце извлеченных частот.

Damped метод – метод затухания – предназначен для задач, где затухание не может быть проигнорировано. Он использует полные матрицы [K], [M], и матрицу демпфирования [C]. Ускоренная последовательность проверки недоступна для этого метода. Таким образом, пропуск режимов возможен на более высоком конце извлеченных частот.

QR Damped Method - QR метод затухания сочетает в себе преимущества метода Блок Ланцош со сложным методом Хессенберга. Ключевой идеей является приближительное представление первые нескольких сложных затухающих собственных значений модальной трансформации с использованием небольшого количества собственных векторов незатухающих системы. После незатухающие формы колебаний оцениваются в применении реального собственного решения (блочный метод Ланцош), уравнения движения преобразуются в этих модальных координатах. При использовании *QR*-алгоритма небольшие проблемы собственных величин затем решаются в модальном подпространстве. Такой подход дает хорошие результаты для слабо затухающих систем, а также может применяться к любому произ-

вольному типу демпфирования (пропорциональное или непропорциональное затухания симметричных или несимметричных гироскопических матриц демпфирования). Этот подход также позволяет рассчитывать несимметричные жесткости, если они присутствуют в модели.

Поля перемещений рулевых колонок «Ниссан» для первых десяти собственных частот (мод), представлены на рис. 4, 5. После сравнения различных способов для проведения модального анализа рулевой колонки был выбран метод *Блок Ланцош*, т.к. объект исследования состоит из «сплошных твердых» элементов и элементов «оболочки». Такая визуализация полученных числовых данных даёт только качественную оценку описываемым явлениям, удобную для оперативного инженерного анализа, но мало пригодную для выявления путей совершенствования конструкции [4, 5].

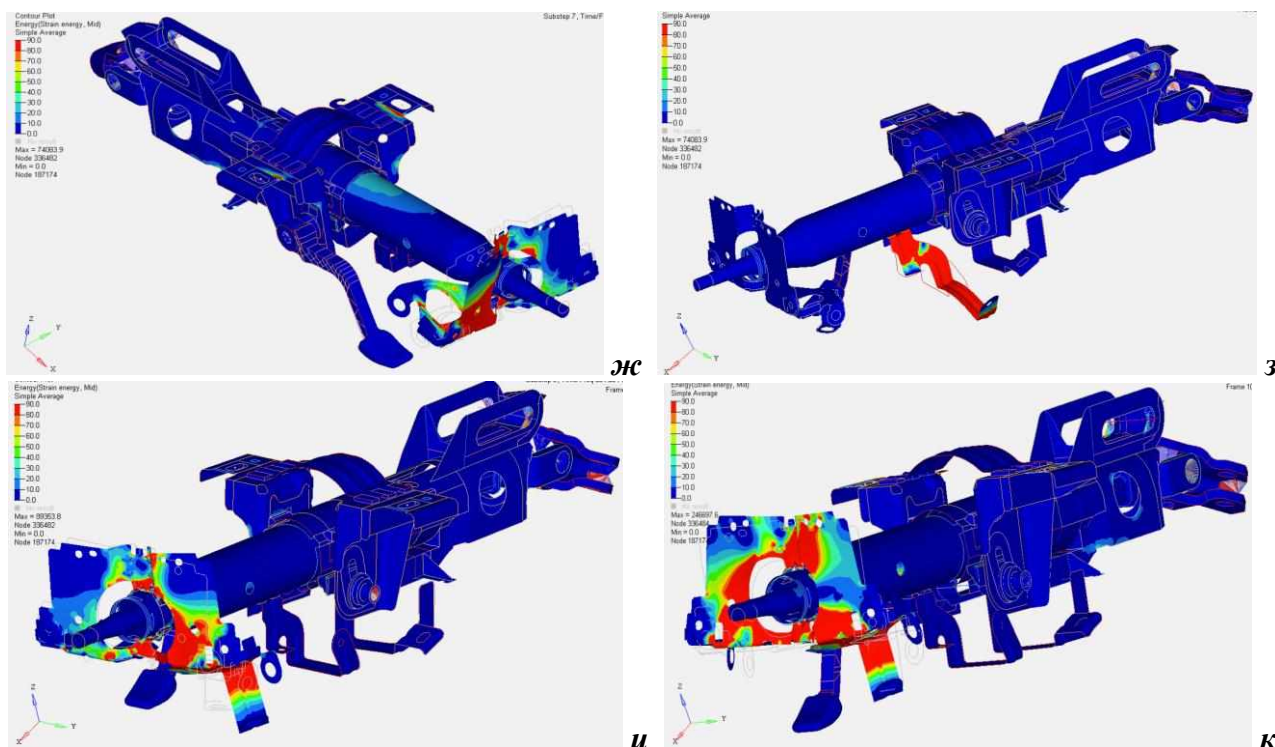


Рис. 5. Величины перемещений (максимум - красный, минимум - синий) рулевой колонки N L42L MG («Ниссан») для 7...10-й частот собственных колебаний (мод): ж, ..., к — соответственно 7...10-я моды

Значения вычисленных при модальном анализе перемещений лишь качественно определяют их величину, но не являются количественно верными, так как модальный анализ — это анализ без внешних нагрузок, и величины перемещений объекта исследования при собственных колебаниях (модальном анализе) никак не соотносятся с таковыми при экспериментальных исследованиях и гармоническом анализе закрепленного объекта исследования.

Библиографический список

1. **Леонтьев, Н.В.** Применение системы ANSYS к решению задач модального и гармонического анализа / Н.В. Леонтьев. – Нижний Новгород: ННГУ им. Н.И. Лобачевского, 2006. – 102 с.
2. Решение задач динамики в ANSYS, геометрия моделей, разбиение моделей на конечные элементы. Краткое руководство пользователя: [пер. с англ.] / под ред. В.Е. Прохоренко, Г.Н. Евсеева. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 379 с.
3. **Шапкина, Ю.В.** The optimization of dynamic stiffness calculation for steering column in ANSYS software // Будущее технической науки: материалы XII международной молодежной научно-технической конференции; НГТУ. – Н. Новгород, 2013. С. 205–206.

4. Шапкина, Ю.В. Анализ виброакустических параметров автомобиля / Ю.В. Шапкина, У.Ш. Вахидов // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 4. С. 104–109.
5. Шапкина, Ю.В. Применение инновационной системы численного моделирования (*FEM*) для исследования виброакустических характеристик (*NVH*) деталей автомобиля / Ю.В. Шапкина, А.Г. Китов, У.Ш. Вахидов, В.А. Шапкин // Сетевое издание «Вестник Мининского университета» НГПУ, Н. Новгород. 2013. № 1 (4). С. 374–385.
6. ANSYS; User's Manual. Swanson Canonsberg, PA: Analysis Systems, Inc. 2011.

*Дата поступления
в редакцию 22.04.2014.*

U. Sh. Vachidov, A.V. Sogin, V.A. Shapkin, J. V. Shapkina

NUMERICAL STUDY VIBRATIONS CAR UNITS

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

Purpose: The article presents the results of numerical studies of the steering column oscillation.

Design/methodology/approach: Numerical simulation using the finite element method was performed using software packages ANSYS, the model was built in HyperMesh, result are visualized by HyperView.

Findings: Based on a comparison of different methods for modal analysis of the steering column has been selected Block Lanczos method.

Research limitations/simplifications: The present study provides the new powerful tool for vibration and noise control.

Originality/value: For the present moment it is quite innovative study.

Key words: steering column, numerical modeling, finite element method, modal analysis, the natural frequencies and mode shapes.

УДК 629.113, УДК 551.578.46

В.С. Макаров, Д.В. Зезюлин, В.В. Беляков

**ОБЗОР ИССЛЕДОВАНИЙ ПО ВЛИЯНИЮ МЕСТНОСТИ
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СНЕЖНОГО ПОКРОВА**

Нижегородский государственный технический университет им Р.Е. Алексеева

В статье проведен обзор и анализ работ, рассматривающих особенности формирования снега, а также районирования различных территорий по характеру снежного покрова. Рассматриваются подходы к моделированию изменения высоты и плотности снежного покрова и других параметров. Приведены результаты исследований влияния характеристик местности на процессы формирования снежного покрова. Представленный в статье анализ и значения позволяют прогнозировать основные характеристики снежного покрова, необходимые для оценки подвижности и проходимости транспортно-технологических средств на местности.

Ключевые слова: снег, статистические характеристики, высота и плотность, подвижность

Решение вопросов подвижности в условиях заснеженной местности с научной и технической точек зрения лежит в области исследования взаимодействия движителя с поверхностью движения. Поэтому важным является знание о распределении снежного покрова. Работы, посвященные исследованию снежного покрова, в том числе как полотна пути для транспортных средств, ведутся с конца XIX века. Одними из первых работ по исследованию свойств снега являются труды А.И. Воейкова [1], П.П. Кузьмина [2] и Г.Д. Рихтера [3]. В них рассмотрены особенности формирования снега, а также районирование территории стран бывшего СССР по характеру снежного покрова. В основу районирования положены два показателя: максимальная высота снежного покрова и продолжительность многоснежного периода. За максимальную высоту принята наибольшая среднедекадная высота снежного покрова, взятая из выборки многолетних средних величин по каждой из метеостанций. Также в этих работах приводятся различные классификации снега, причем превалирует качественное описание видов снега, в основном по внешним признакам (структуре) и плотности.

Исследованием снежного покрова с точки зрения возможности передвижения по нему транспортных средств занимались ученые и исследователи «Нижегородской школы транспортного снеговедения»: Веселовский М.В., Рукавишников С.В., Николаев А.Ф., Куляшов А.П., Барахтанов Л.В., Беляков В.В., Шапкин В.А. и их ученики [4-6].

Необходимо отметить, что во многих литературных источниках имеется некоторая несогласованность в определениях. Так, в одной части работ говорится о «высоте», а в другой о «глубине» снега. Данная неточность имеется и в некоторых иностранных работах. С точки зрения авторов, более уместно говорить о высоте «ненарушенного» снежного покрова, а в случае его деформации – о глубине образуемой колеи.

Так как снежный покров распространен по поверхности неравномерно, рассмотрим, как влияют параметры местности на его высоту и плотность, которые являются основными характеристиками, определяющими проходимость и подвижность транспортных средств. Остальные характеристики, необходимые для оценки движения, могут быть определены из этих двух параметров [7, 8].

Рассмотрим некоторые из работ по исследованию снежного покрова. Исследованию водного эквивалента (SWE), плотности и высоты снега в швейцарских Альпах посвящена одна из многих работ [9] Швейцарского федерального института леса, снега и ландшафтных исследований (WSL). Дана статистика распределения этих параметров по совокупности измеренных точек (в разных областях местности). В работе произведен анализ указанных ранее параметров и их взаимосвязь между собой.

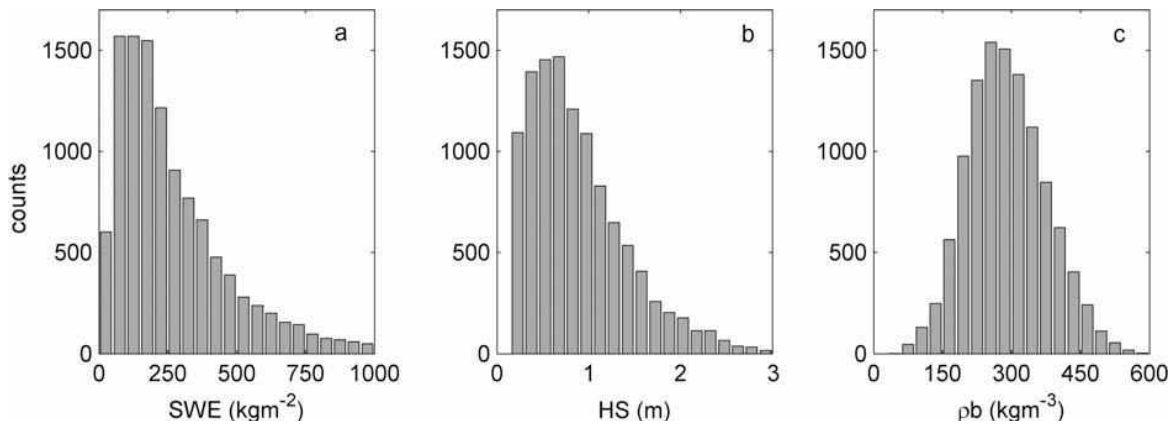


Рис. 1. Распределения водного эквивалента SWE, высоты и плотности снега по территории швейцарских Альп за пять десятилетий [9]

Моделирование параметров снежного покрова в работе [10] основано на анализе микроволнового излучения на частотах 10 ГГц, 18 ГГц и 36 ГГц, в результате чего могут быть получены характеристики снежного покрова на основании микроволнового дистанционного зондирования. Работа проведена на примере характеристик снега в Синьцзяне (Китай).

В статье [11] рассматривается пространственная и временная изменчивость сезонной плотности снега. Исследование опирается на значительный набор данных о плотности снега и климатические наблюдения в США, Австралии и странах бывшего Советского Союза с использованием методов регрессии.

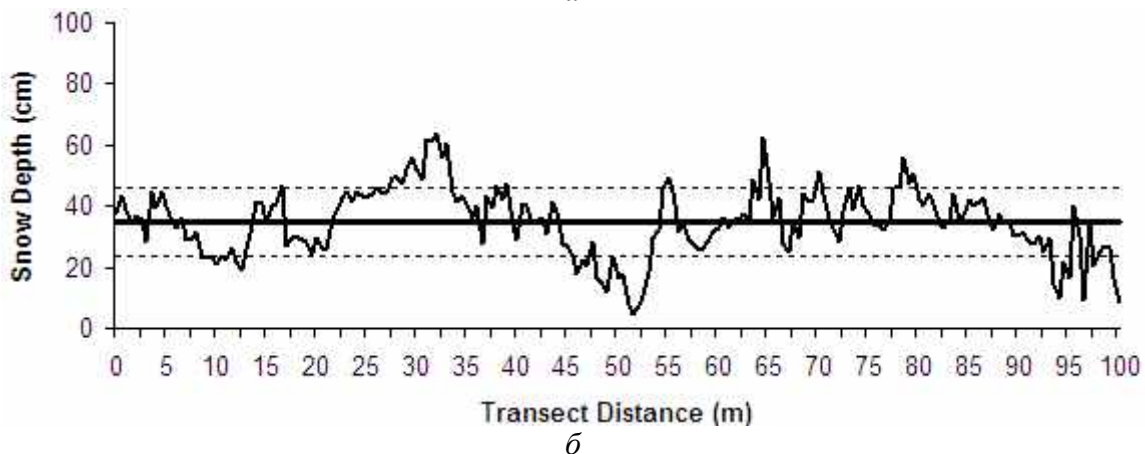
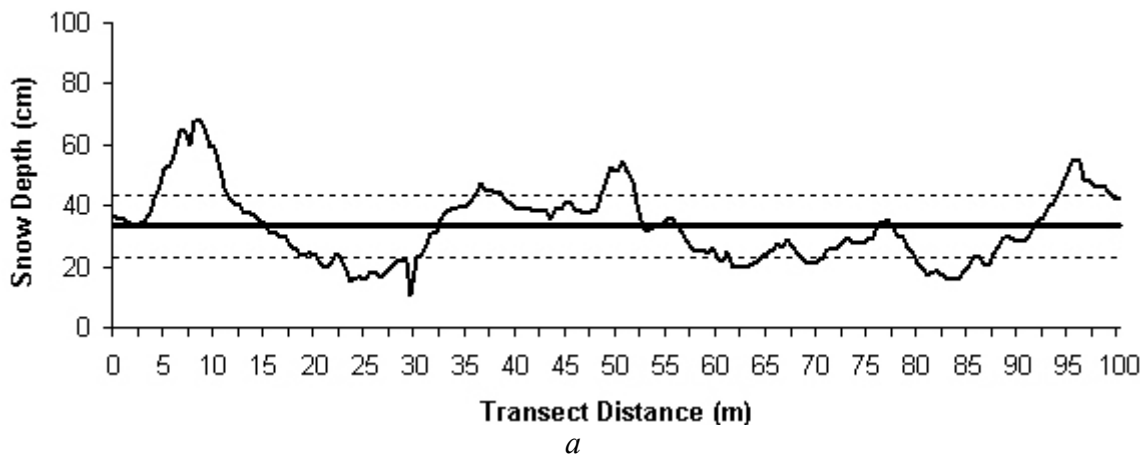


Рис. 2. Типичные профили высоты снега на озере (а) и участках тундры (б). Среднее значение показано жирной черной линией; пунктирные линии указывают ± 1 стандартное отклонение [16]

Многие работы посвящены исследованию снежного покрова, а также изменению его основных характеристик (высоты, плотности и водного эквивалента), например [12-14]. В работах приводятся модели снежного покрова, позволяющие прогнозировать изменение его характеристик по конечному числу известных данных. Приводятся разные математические модели, отличающиеся разной достоверностью. Модели работы [12] основаны на многолетних наблюдениях. Работа [15] посвящена моделированию характеристик снежного покрова по имеющимся дискретным значениям и больше относится к метеорологии и гляциологии. Зная водный эквивалент снега, доступный со спутников дистанционного зондирования, можно получить не только высоту, но и температуру. В работе [16] исследуется распределение высоты, плотности и структуры снега по мерным участкам. Примеры результатов экспериментальных исследований представлены на рис. 2-4.

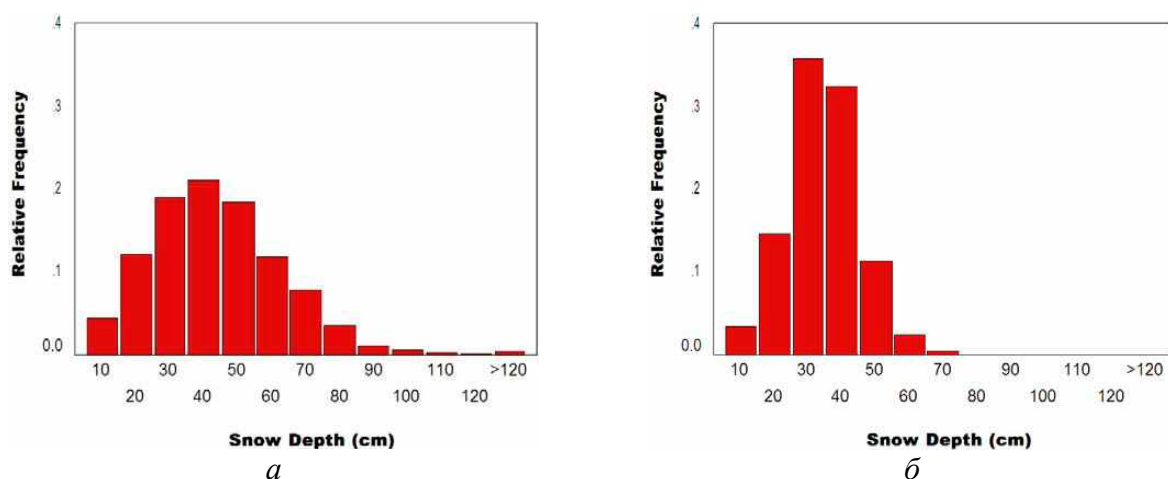


Рис. 3. Изменения высоты снежного покрова:

a - наземные участки; *б* - озеро / река [16]

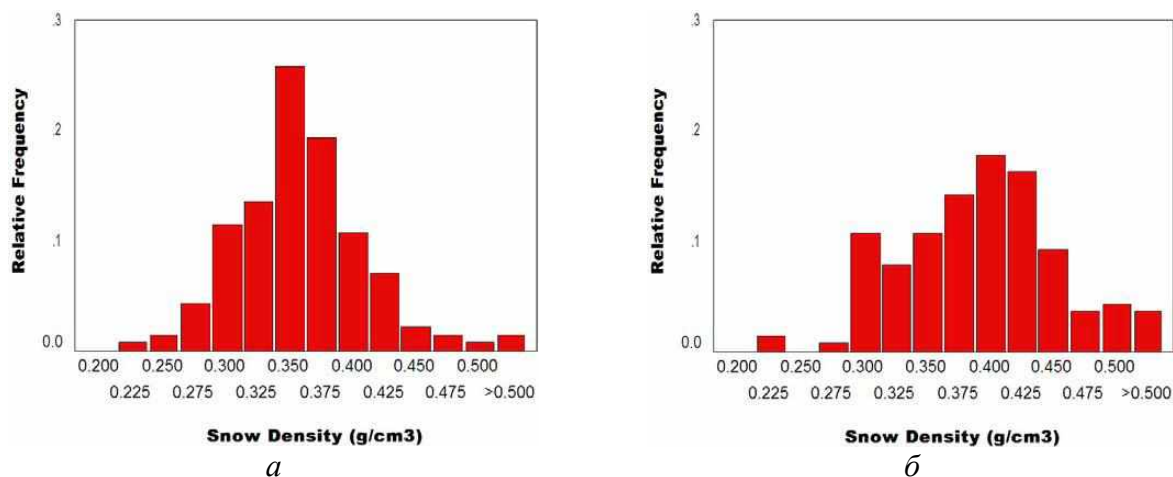


Рис. 4. Изменения плотности:

a - наземные участки; *б* - озеро / река [16]

Также исследованию распределения характеристик снежного покрова посвящена работа [17]. В ней проанализировано местность вокруг озера (Lake Superior) в зимний период с 1979 по 2003 годы. В исследовании [18] разработан метод распределения снега (определяются глубина, плотность и водный эквивалент) в зависимости от ландшафта местности. Учитываются такие параметры как угол наклона направления склона (азимут), тип леса (открытая местность, редкий лес, лиственный, смешанный и хвойный леса). Предложены оригинальные модели типа «сплюснутого конуса» распределения высоты и плотности снега. Отметим, что в работе говорится о влиянии солнечной активности, альbedo поверхности, теп-

лопередачи, испарении и конденсации воды в снеге и прочих факторах. Все это влияет на процессы снегообразования. В результате приводятся уравнения, полученные по результатам снегомерных съемок, которые описываются аналитическими аппроксимационными зависимостями с двумя эмпирическими коэффициентами.

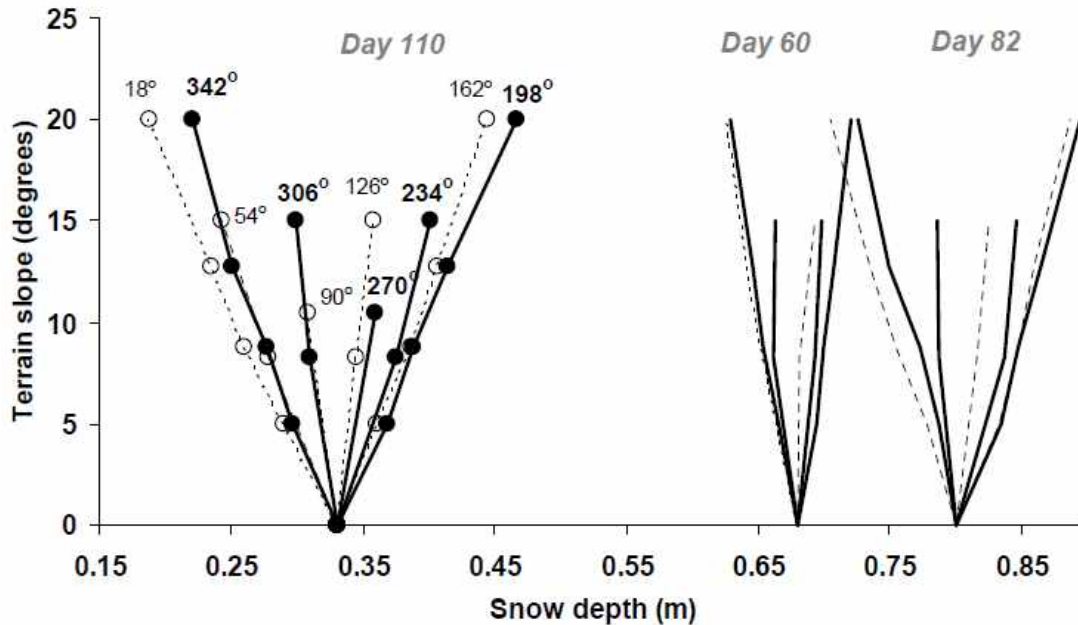


Рис. 5. Экспериментальные данные об изменении высоты снежного покрова (ось абсцисс) в зависимости от угла склона (ось ординат). Кружками показаны замеры. Толстыми линиями описываются восточные склоны по соответствующим азимутам (198°, 234°, 270°, 306°, 342°), пунктирными западные (18°, 54°, 90°, 126°, 162°). Склон по азимуту 18° - является наиболее южным, 198° - наиболее северным. Данные приведены для 60, 82 и 110 дней замеров [18]

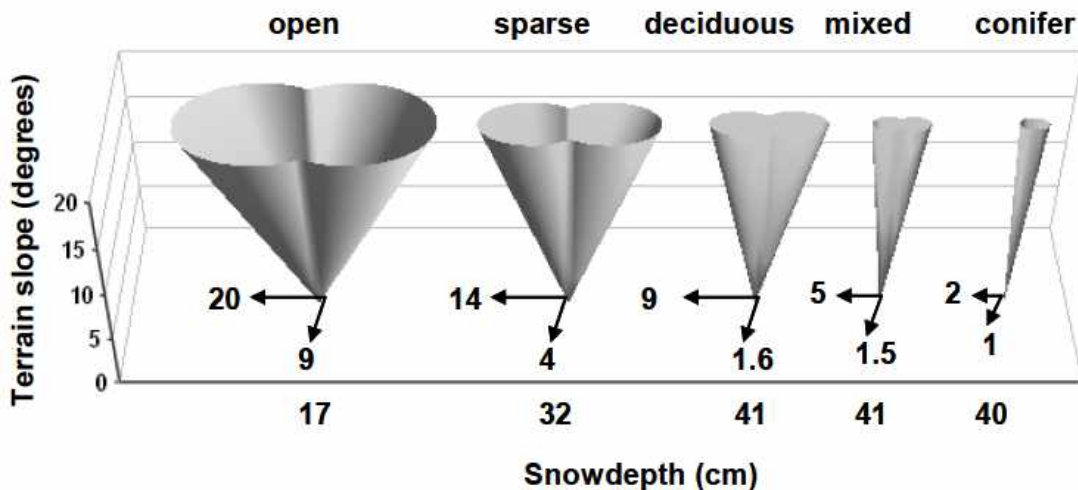


Рис. 6 Глубина снега на 900-метровой высоте над уровнем моря на 110 день измерений. Значения приведены для разных типов лесов: открытая местность, редкий лес, лиственный, смешанный и хвойный леса [18]

Аналогичным исследованиям посвящена работа [19]. Также строятся «плюснутые конуса», учитывающие ландшафт местности. Однако основная направленность на прогнозирование подвижности (определение средней скорости движения по пересеченной местно-

сти). Отметим, что исследование проведено для наземных транспортных средств, которые используются армией США и в перспективе необходимы для поддержки проведения специальных операций на заснеженной местности. Основная идея основана на том, чтобы по имеющимся данным о склонах местности, азимутах, и высотах, а также характеру растительности (открытая местность, редкие деревья, лиственные, смешанные и хвойные леса) представить распределение высоты и плотности снежного покрова.

В продолжение данной тематики рассмотрим работу [20]. С использованием представленных моделей снежного покрова проведена имитация движения с целью обучения вождению персонала армии США и дальнейшей модификации транспортных средств под заданные условия движения. В дополнение к снегу учтены характеристики типов почв и их распределение. Исследование проводилось для трех машин: CIV (CRREL Instrumented Vehicle), HMMWV (High Mobility Multipurpose Wheeled Vehicle) и Stryker. Таким образом, изменение параметров высоты и плотности снега связано с характером ландшафта местности, растительностью, ветром, солнечной активностью и прочими факторами. В работе [21] приводятся следующие данные о влиянии ландшафта на глубину залегания снежного покрова, показанные в табл. 1.

Таблица 1

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину снега [21]

Тип ландшафта	Коэффициент
Целина	1
Открытая ледяная поверхность озер	0,4-0,5
Пашня	0,9
Холмистые районы	1,2
Крупные лесные массивы	1,3-1,4
Речные русла	3
Заросли камыша на озерах	3
Лесные колки шириной 100-200 м и лесные опушки	3,2-3,4

В работе [2] приводятся следующие данные. Плотность сухого снежного покрова под пологом леса, по данным синхронных измерений, как правило, ниже, чем на открытых участках, что объясняется ослаблением в лесу таких факторов уплотнения снега, как зимние оттепели и ветер. Зависимость плотности снега в лесу от плотности на открытых участках выразилась прямой линией, уравнение которой имеет вид: $\rho_{лес} = 0,87\rho_{поле}$ [2].

Влияние характеристик леса может быть разным. Например, в соответствии с данными [22] влияние средняя глубина снега в кедровых и еловых лесах меньше чем пихтовых и на гари порядка 0,76 раз, а плотность в еловых лесах меньше чем во всех остальных в 0,9 раз. Все это связано с многообразием факторов, таких как [22]:

- абсолютная высота местности, удаленность от водоразделов и их ориентация по отношению к господствующим зимним ветрам;
- микро- и мезорельеф горного склона;
- ориентация и угол наклона земной поверхности;
- характер растительного покрова;
- видовой состав, возраст и полнота хвойных лесонасаждений;
- ветровой режим;
- интенсивность прямой и суммарной солнечной радиации;
- сумма и распределение по сезону твердых осадков; преобладание осенней или весенней циклонической деятельности;

- температура и влажность воздуха, суточный и сезонный ход этих показателей;
- температура снежной поверхности и толщи снега, их суточный и сезонный ход.

Взаимодействие и взаимовлияние этих факторов снегонакопления порождает зимние геосистемы со сложной структурой, обладающей пространственно-временной изменчивостью.

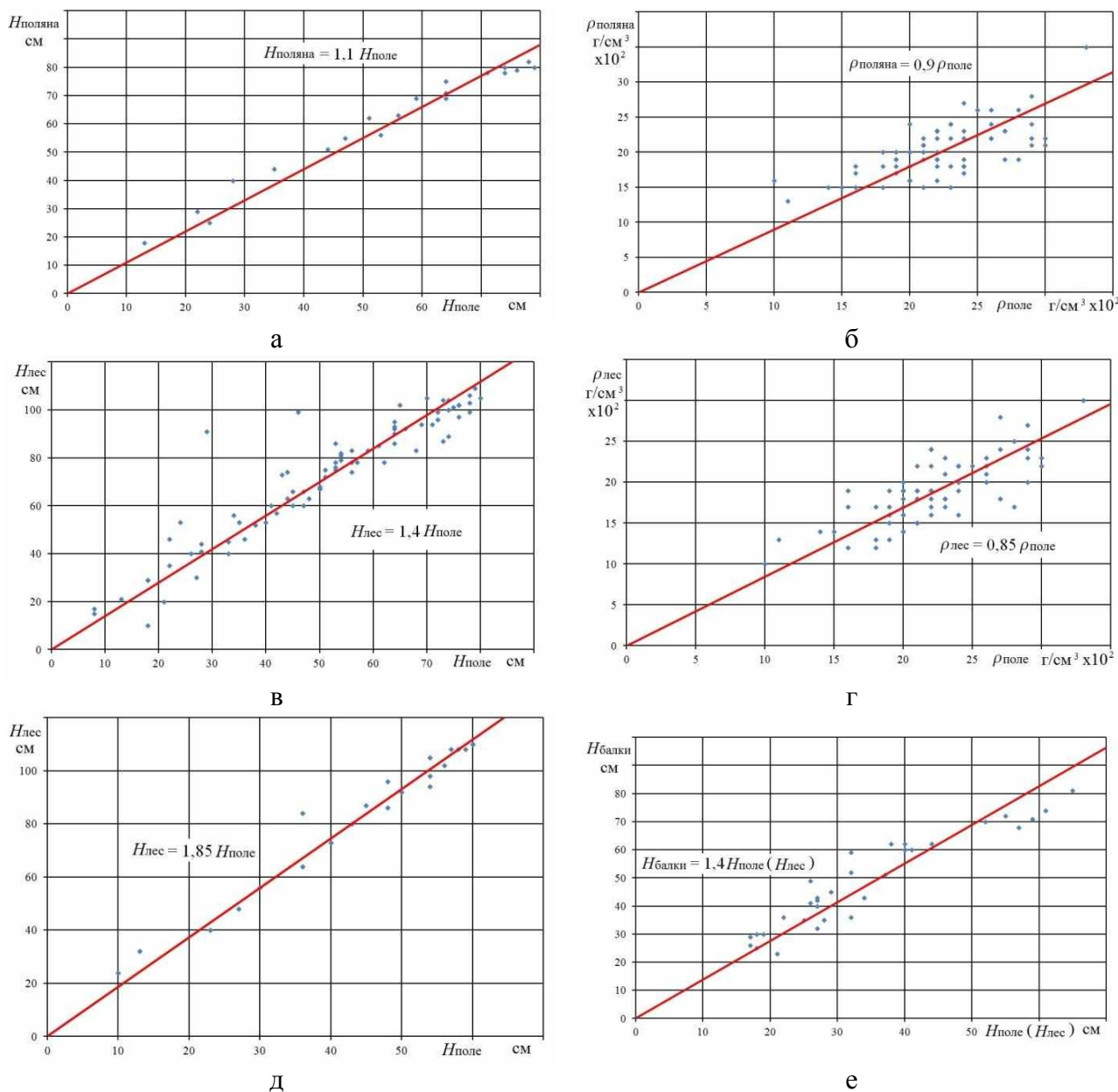


Рис. 7. Соотношение параметров снега:

a - высоты на поляне в лесу и поле; *б* – плотности на поляне в лесу и поле; *в* – высоты под кронами деревьев в лесу и поле; *г* – плотности под кронами деревьев в лесу и поле; *д* - высоты под кронами деревьев в лесу и поле; *е* - высоты в ямах и балках и в поле или лесу.

Точками показаны экспериментальные значения

Наряду с микрорельефом на снегонакопление на склонах оказывают влияние зимние оттепели и направление господствующего ветра. По наблюдениям за ряд лет (1923–1941) в районе центральной лесостепной зоны европейской части страны (Козменко и Ивановский, 1952), коэффициенты снежности склонов при господствующих метелевых ветрах с юго-востока, востока и юга выражаются следующими данными, приведенными в табл. 2.

Таблица 2

Влияние ветра на снежность склонов [2]

Ровный водораздел	1,0
Склон, экспонированный на Юго-Восток, Восток и Юг	0,5
Склон, экспонированный на Северо-Восток	1,0
Склон, экспонированный на Юго-Запад	1,2
Склон, экспонированный на Север и Запад	1,5
Склон, экспонированный на Северо-Запад	2,0

Весьма значительная разница в коэффициентах снежности на юго-восточных (0,5) и северо-западных (2,0) склонах объясняется тем, что при указанном направлении преобладающего ветра юго-восточные склоны оказываются наветренными. Снег на этих склонах сдувается во время метелей и подтаивает во время зимних оттепелей, т.е. количество его в обоих случаях уменьшается, в то время как на подветренных северо-западных склонах происходит увеличение общей массы снегозапасов благодаря отложению переносимого ветром снега во время метелей. В целом для распределения снежного покрова в открытой местности имеет значение не только геометрия различного рода макро- и микронеровностей подстилающей поверхности, но и их взаимное расположение на местности [2].

На основании исследований, проведенных авторами работы, а также [2, 22, 23] можно выделить некоторые характерные участки, на которых формирование снега происходит с учетом предложенных зависимостей и поправочных усредненных коэффициентов. Значения были получены для средней полосы России с ярко выраженными временами года, хотя в каждом конкретном случае может потребоваться уточнение. Данные коэффициенты во многом зависят от ветров, присущих рассматриваемой территории, а также близости к водоемам (например, морям или рекам). Также на различных территориях из-за постоянных ветров разница глубин снега на полях и в лесах может отличаться в два-три раза.

Полученные коэффициенты и их средние квадратичные отклонения сведены в табл. 3.

Таблица 3

Коэффициенты, учитывающие влияние ландшафта на глубину и плотность снега

Сравниваемые участки	$K_H^{\text{местн}}$	СКО*	$K_p^{\text{местн}}$	СКО
поле/ поле	1	-	1	-
поляна в лесу/ поле	1,1	0,125	0,9	0,15
лес/ поле	1,4 (1,85)**	0,3 (0,2)**	0,85	0,13
Ямы (балки)/поле (лес)***	1,4	0,2	-	-

Примечания.

* Среднее квадратичное отклонение.

** Значение в скобках получено также для леса, но очевидно имелись другие весомые факторы (данные о ветрах) повлиявшие на результат.

*** Если ямы и балки в поле, то относительно поля. Если ямы и балки в лесу, то относительно леса. Плотность аналогична полю или лесу.

Приведенный в статье анализ и значения позволяют прогнозировать основные характеристики снежного покрова, необходимые для оценки подвижности [24, 25] и проходимости транспортно-технологических средств на местности.

Исследование проведено при поддержке «Грантов Президента РФ» № 14.124.13.1869-МК.

Библиографический список

1. **Воейков, А. И.** Снежный покров, его влияние на почву, климат и погоду и способы исследования // Записки Русского географич. об-ва, 1889. Т. XVIII.
2. **Кузьмин, П.П.** Формирование снежного покрова и методы определения снегозапасов / П.П. Кузьмин. – Л.: Гидрометеиздат, 1960. – 169 с.
3. **Рихтер, Г.Д.** Снежный покров, его формирование и свойства / Г.Д. Рихтер. – М.: Изд-во АН СССР, 1945. – 120 с.
4. Снегоходные машины / Л.В. Барахтанов [и др.]. – Горький: Волго-Вятское кн. Изд-во, 1986. – 191 с.
5. Отраслевая научно-исследовательская лаборатория вездеходных (снегоходных) машин. К 50-летию со дня основания (1962 -2012 гг.) / А.А. Аникин [и др.]; НГТУ им Р.Е. Алексеева. – Н.Новгород, 2012. – 272 с.
6. Вездеходные транспортно-технологические машины. Основы теории движения: монография / под. общ. ред. В.В. Белякова и А.П. Куляшова. – Н. Новгород: ТАЛИАМ, 2004. – 961 с.
7. **Беляков, В.В.** Взаимодействие со снежным покровом эластичных движителей специальных транспортных средств. дис. ... докт. ех. наук: 05.05.03. Нижний Новгород 1999. – 485 с.
8. **Беляков, В.В.** К вопросу выбора экспериментальных данных для составления статистических моделей снежного покрова как полотна пути для транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.]// Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2014. №1 С. 136-141.
9. Jonas, T., Marty, C., Magnusson, J., 2009. Estimating the snow water equivalent from snow depth measurements in the Swiss Alps. *J. Hydrol.* 378 (1–2), 161–167.
10. Dai, L. Y., Che, T., Wang, J., and Zhang, P.: Snow depth and snow water equivalent estimation from AMSR-E data based on a priori snow characteristics in Xinjiang, China, *Remote. Sens. Environ.*, 127, 14–29, 2012.
11. Bormann, J. Kathryn, Westra, Seth, Evans, P. Jason (2013) Spatial and temporal variability in seasonal snow density, 63-73.
12. Dutra, E., 2011: Global Land-Atmosphere Coupling Associated With Cold Climate Processes. Ph.D. Thesis, University of Lisbon, Portugal, 103 pp.
13. Dutra, Emanuel, Gianpaolo Balsamo, Pedro Viterbo, Pedro M. A. Miranda, Anton Beljaars, Christoph Schär, Kelly Elder, 2010: An Improved Snow Scheme for the ECMWF Land Surface Model: Description and Offline Validation. *J. Hydrometeorol.* 11, 899–916.
14. Niu, G.-Y., and Z.-L. Yang, 2007: An observation-based formulation of snow cover fraction and its evaluation over large North American river basins, *J. Geophys. Res.*, 112, D21101
15. Sun, C., Walker, J. P. and Houser, P. R., 2004. A Methodology for Snow Data Assimilation in a Land Surface Model. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, 109, D08108
16. Sturm, Matthew ; Derksen, Chris ; Liston, Glen ; Silis, Arvids ; Solie, Daniel ; Holmgren, Jon ; Huntington, Henry. A reconnaissance snow survey across Northwest Territories and Nunavut, Canada, April 2007. Hanover, N. H. : [US Army Corps of Engineers, Engineer Research and Development Center], Cold Regions Research and Engineering Laboratory, 2008.
17. Steven F. Daly, Timothy B. Baldwin, and Patricia Weyrick / Analysis of the Lake Superior Watershed Seasonal Snow Cover. Cold Regions Research and Engineering Laboratory U.S. Army Engineer Research and Development Center, Hanover, 2007
18. Melloh, R.A., Shoop, S., Coutermarsh, B., 2007. Shaped solution domains for snow properties. 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Delaware USA 2006, pp. 231–243.
19. Melloh R, Richmond P, Shoop S, Affleck R, Coutermarsh B. Continuous mapping of distributed snow depth for mobility models using shaped solutions. In: Cold Regions Science and Technology, International Polar Year 2007. Special issue; 2007.
20. R.T. Affleck, R.A. Melloh, S.A. Shoop. Cross-country mobility on various snow conditions for validation of a virtual terrain - *Journal of Terramechanics*, 2009, no. 46, pp. 203–210.
21. Снег: справочник: [пер. с англ. под ред. В.М. Котлякова] / под ред. Д. М. Грея, Д. Х. Мэйла. – Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 751 с.
22. **Малюгин, Ю. Ф.** Факторы формирования снежного покрова в районах со сложной орографией (на примере Южного Сихотэ-Алиня): дисс. ... канд. географических наук : 11.00.07. - Москва, 1985. – 168 с.

23. Официальный сайт ФГБУ «Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных» (ВНИИГМИ-МЦД). URL: <http://www.meteo.ru/>
24. **Беляков, В.В.** Концепция подвижности наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №3. С. 145–174.
25. **Беляков, В.В.** Подвижность наземных транспортно-технологических машин / В.В. Беляков [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. №4. С. 72-77.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

V.S. Makarov, D.V. Zezyulin, V.V. Belyakov

REVIEW OF THE RESEARCHES ON TERRAIN INFLUENCE ON SNOW COVER CHARACTERISTICS

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

Subject/topic/purpose: Overview of studies of the influence of terrain parameters on processes of formation of snow cover.

Methodology of work: Statistical treatment of experimental data.

Results/application: The review and analysis of studies considering peculiarities of snow and zoning of different areas by the nature of snow cover has been conducted. Approaches to modeling of the change of height and density of the snow cover and other parameters have been considered. The results of studies of the influence of terrain characteristics on processes of snow cover formation have been shown.

Findings: Analysis and the values given in the article allow to predict the main characteristics of snow cover needed to assess the mobility and trafficability of the transport and technological vehicles .

Key words: snow, statistical characteristics, heig.

УДК 629.113

Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, С.А. Багичев

ПОВЫШЕНИЕ ПАССИВНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ АВТОТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В работе отмечается актуальность повышения пассивной безопасности кузовных конструкций, рассмотрены требования пассивной безопасности, предъявляемые к кузовам легковых автомобилей и автобусов, к кабинам грузовых автомобилей. Предложены критерии оценки безопасности конструкций при их проектировании. Рассмотрена новая методика оценки пассивной безопасности конструкций на всех этапах проектирования. Указаны методы расчёта и необходимость проведения отдельных экспериментов для уточнения расчётных моделей и результатов, а также характеристик материалов. Приведены примеры практической реализации методики. Рассмотрены результаты расчётов и испытаний. Даны выводы и рекомендации по повышению пассивной безопасности кузовов и кабин. Представленные материалы могут быть полезны для специалистов, занимающихся расчётной оценкой пассивной безопасности автотранспортных средств.

Ключевые слова: кузова, кабины, требования, пассивная безопасность, методика, расчёт, эксперимент, результаты, рекомендации.

Проблема повышения безопасности автотранспортных средств всегда будет актуальной, несмотря на то, что работы в этом направлении постоянно ведутся. В настоящее время все выпускающиеся автомобили отвечают существующим требованиям пассивной безопасности. Однако эти требования постоянно совершенствуются и ужесточаются. Известно, что пассивная безопасность автомобилей и автобусов в большой мере обеспечивается конструкцией их кузовов и кабин. Именно они способствуют поглощению основной части энергии удара, возникающей при дорожно-транспортном происшествии и обеспечивают сохранение внутри салона остаточного жизненного пространства для водителя, пассажиров и уменьшение действующих на них аварийных нагрузок. Поэтому при проектировании продукции автопроизводитель должен предусматривать определённый запас (до 30%) по их несущей способности и безопасности кузовной конструкции. Этот запас должен компенсировать возможное снижение её прочностных и жесткостных характеристик, вызванное возникающими при эксплуатации дефектами, повреждениями и износом.

При проектировании кузовных конструкций важно, с учётом перспективы развития, рассматривать возможность их нагружения в различных аварийных ситуациях, некоторые из которых пока даже не предусмотрены существующими стандартами, но имеют важное значение для снижения травмирования и сохранения жизни человека. Статистика показывает, что дорожно-транспортные происшествия (ДТП) с легковыми автомобилями происходят при столкновениях (фронтальные – 59%, кососимметричные – 35%, боковые – 16%, наезд на автомобиль сзади другого транспортного средства – 10%) и опрокидывании (23%). Грузовые автомобили принимают участие в ДТП [1], [2] при столкновениях (фронтальном с препятствиями – 35%–42%, боковом – 10%) и опрокидывании – 5%–15%. Наибольшая тяжесть последствий ДТП с автобусами наблюдается в случае их опрокидывания, которое составляет около 20% от всех происшествий. На основе материалов статистики разработаны действующие правила и стандарты. Применительно к легковым автомобилям схемы действия на кузов аварийных нагрузок по Правилам ЕЭК ООН приведены на рис. 1.

Кабины грузовых автомобилей должны отвечать требованиям Правил ЕЭК ООН №29. Соответствующие условия их нагружения показаны на рис. 2. На рисунке также рассмотрены критерии и условия оценки пассивной безопасности кабины. Приведён обобщённый график изменения аварийной нагрузки, формулы определения энергоёмкости и разрушающей нагрузки, применяемые в инженерном методе расчёта.

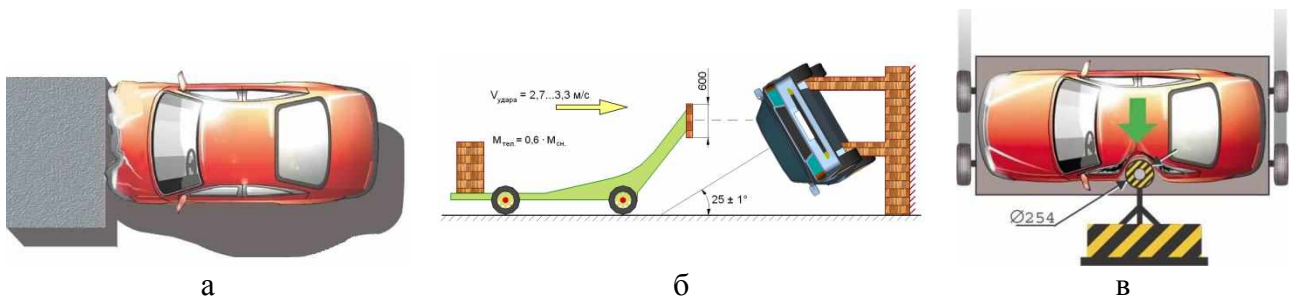


Рис. 1. Схемы нагружения легкового автомобиля при испытаниях с имитацией: а, в – фронтального и бокового столкновений; б – опрокидывания

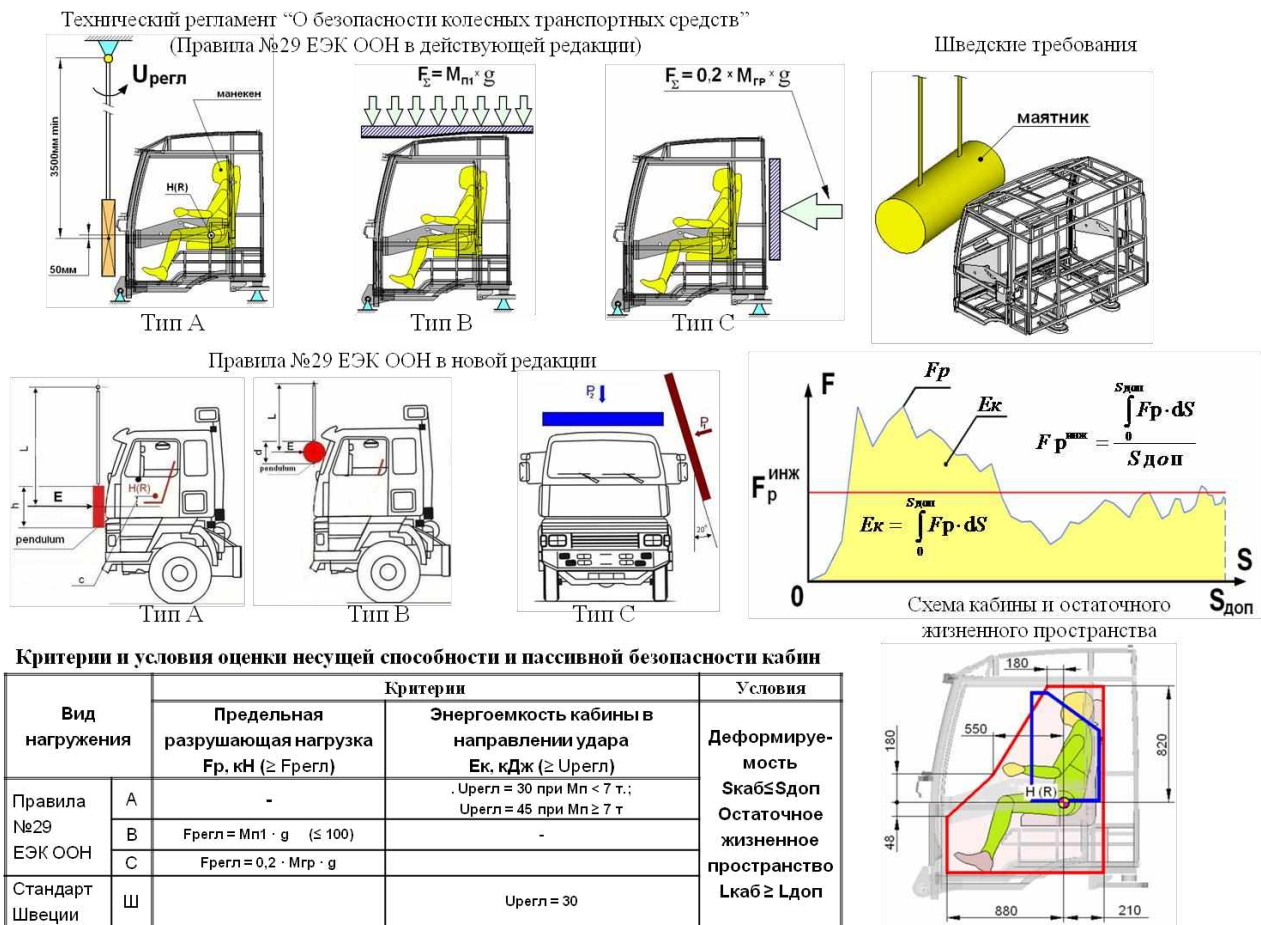


Рис. 2. Схемы нагружения кабины, критерии и условия оценки пассивной безопасности

Для автобусов Правилами ЕЭК ООН №66 оговариваются условия их испытания и расчётов на опрокидывание с уступа высотой 0,8 м (рис. 3).

В соответствии с существующими требованиями и для удобства их применения в процессе проектирования кузовных конструкций на кафедре «Автомобили и тракторы» НГТУ им. Р.Е. Алексеева разработаны критерии оценки пассивной безопасности кузовных конструкций:

1. Энергоемкость конструкции в направлении действия аварийной нагрузки E_k .
2. Сопrotивляемость конструкции разрушениям, которую характеризуют разрушающая нагрузка F_p , предельная по текучести нагрузка F_T .
3. Деформируемость конструкции S в направлении действия аварийной нагрузки, по допускаемой деформации $S_{доп}$, по сохранению остаточного пространства $L_{ост}$.

4. Перегрузка конструкции по уровню замедления j_{\max} и скорости нарастания замедления V_j .

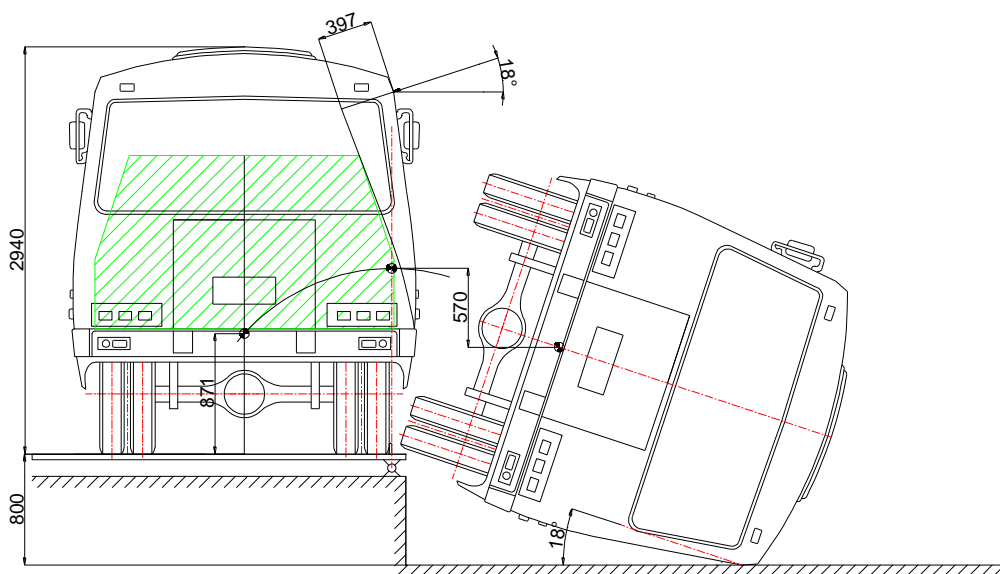


Рис. 3. Схема испытания автобуса на опрокидывание

Предлагаемые критерии согласуются с условиями существующих требований и могут использоваться при проектировании, доводке и сертификации конструкций для проведения расчетно-экспериментальных оценок их безопасности.

Энергоемкость конструкции E_k (рис. 2) определяется работой, совершаемой разрушающей нагрузкой F_p на пути деформации конструкции в допустимых пределах $S_{\text{доп}}$,

$$E_k = \int_0^{S_{\text{доп}}} F_p dS. \quad (1)$$

Допускаемая деформация $S_{\text{доп}}$ определяется как разность между геометрическими размерами салона кузова или кабины и размерами внутреннего остаточного пространства, которое должно сохраняться в салоне при аварии. Фактически $S_{\text{доп}}$ – это траектория перемещения вектора нагрузки от исходного первоначального контура салона до границы остаточного пространства.

Разрушающая нагрузка F_p (рис. 2) характеризует стойкость конструкции к разрушению. Этой нагрузке соответствует превращение модели в кинематический пластический механизм.

Предельная по текучести нагрузка F_T – нагрузка, при которой появляется текучесть в крайних волокнах сечения наиболее слабого силового элемента.

Разработанные критерии позволяют оценивать свойства конструкции, определяющие ее безопасность. Оценка безопасности конструкции ведется по рассмотрению, как правило, двух или трех критериев. Один из них взаимосвязан с режимом нагружения, а другие – с измеряемыми параметрами. Конструкция считается безопасной в том случае, если выполняются условия пассивной безопасности

$$\begin{aligned} E_k \geq E_{\text{регл}} = U_{\text{регл}}; \quad F_p \geq F_{\text{регл}}; \quad F_T \geq F_{\text{регл}}; \quad S \leq S_{\text{доп}} = \Delta_{\text{регл}}; \\ L_{\text{ост}} \geq L_{\text{регл}}; \quad j_{\max} \leq j_{\text{доп}}; \quad V_j \leq V_{j\text{доп}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Для безопасной конструкции должны выполняться как минимум два условия при рассмотрении статического режима нагружения и три – при ударном воздействии нагрузки. Они позволяют оценивать работоспособность кузовов и кабин на протяжении всего процесса

проектирования – от выбора безопасных силовых схем до завершающих этапов. При этом должны применяться как расчётные, так и экспериментальные (выборочно) методы оценки. Структурная схема разработанной на кафедре методики расчётно-экспериментальной оценки несущей способности по разрушающим нагрузкам и пассивной безопасности приведена на рис. 4.

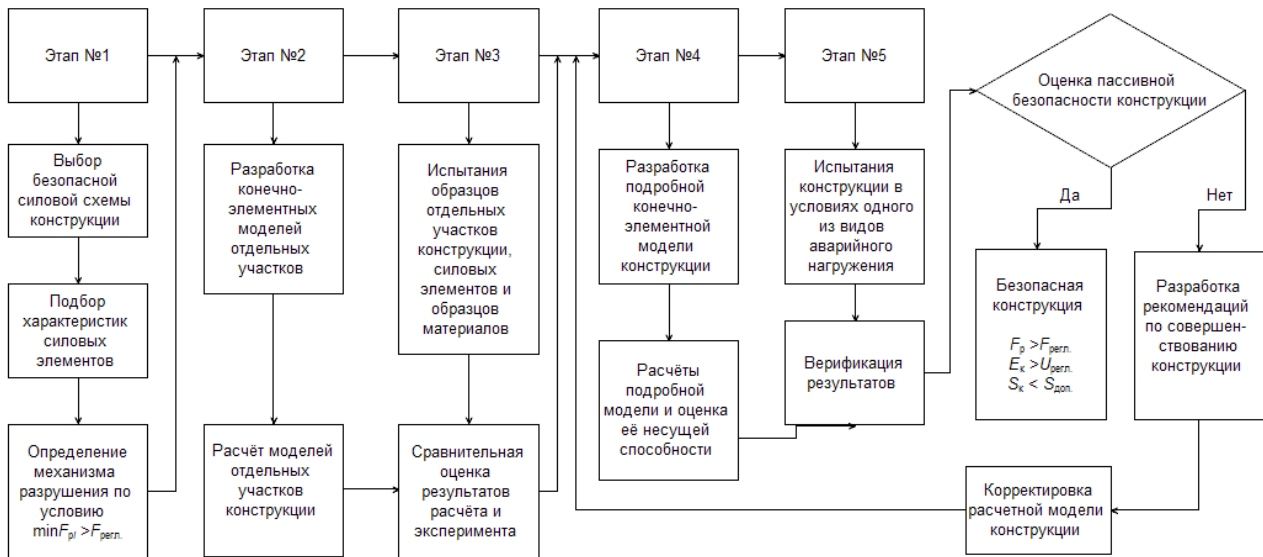


Рис. 4. Структурная схема методики расчётно-экспериментальной оценки пассивной безопасности кузовных конструкций при проектировании

В соответствии с методикой, на начальном этапе проектирования, когда ещё отсутствуют чертежи поверхностей и геометрия кузовной конструкции, должна предварительно выбираться её рациональная силовая схема с учётом требований пассивной безопасности и прочности. При этом должны определяться необходимые размеры конструктивных сечений, их соотношения между силовыми элементами. В этом случае следует применять инженерный метод расчёта конструкций по предельному состоянию, основанный на кинематической теореме [3]. Он позволяет достаточно эффективно рассматривать все возможные механизмы разрушения силовой схемы и её вариантов изменения при разном воздействии квазистатических аварийных нагрузок и выбирать из них наиболее безопасный. Автоматизация этих процедур осуществляется с помощью разработанных на кафедре программ. Например, на рис. 5 приведена блок-схема алгоритма программы [4] выбора безопасных силовых схем кабин грузовых автомобилей.

После предварительного выбора силовой схемы конструкции, разработки поверхностей, панелей и каркаса (если он должен быть) расчётчик может получить необходимую информацию для формирования конечно-элементных моделей (КЭМ) отдельных узлов и участков, силовых сечений и секций. Разработка таких моделей, их расчёт, изготовление опытных образцов и их испытания, сравнительная оценка результатов расчётов и эксперимента, являются неотъемлемой частью процесса формирования подробной КЭМ всей кузовной конструкции. Такие исследования полезны для проведения верификации результатов; обоснования правомерности используемых принципов, подходов выбора КЭМ и выполнения компьютерного моделирования; уточнения характеристик материалов, коэффициентов трения и других параметров. Это подтверждают проведённые расчётно-экспериментальные исследования узла связи стойки лобового окна кабины с петельной стойкой, результаты которых показаны на рис. 6, а также ранее проведённые расчёты и испытания секций кузова автобуса [5], [6].

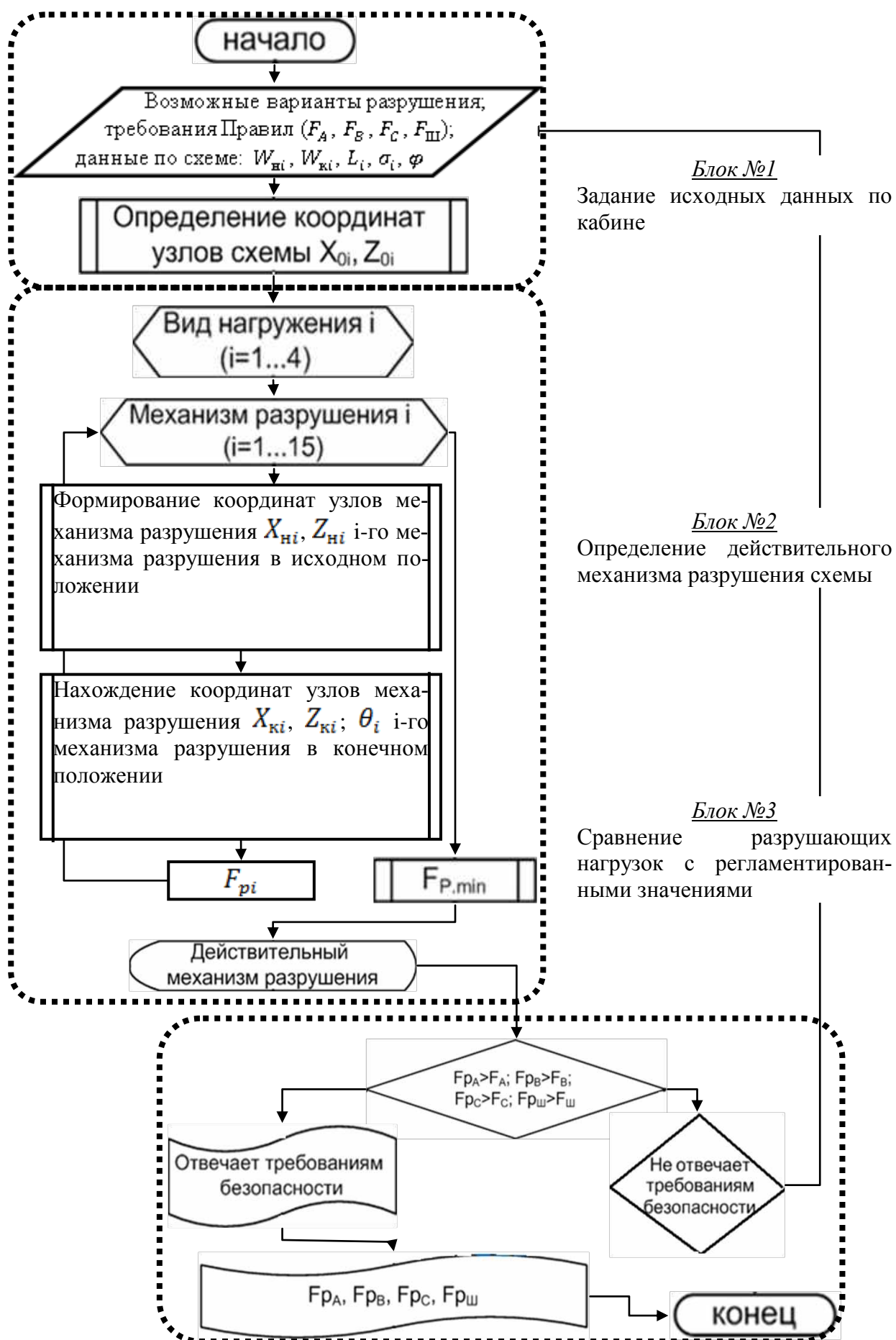


Рис. 5. Блок-схема алгоритма программы

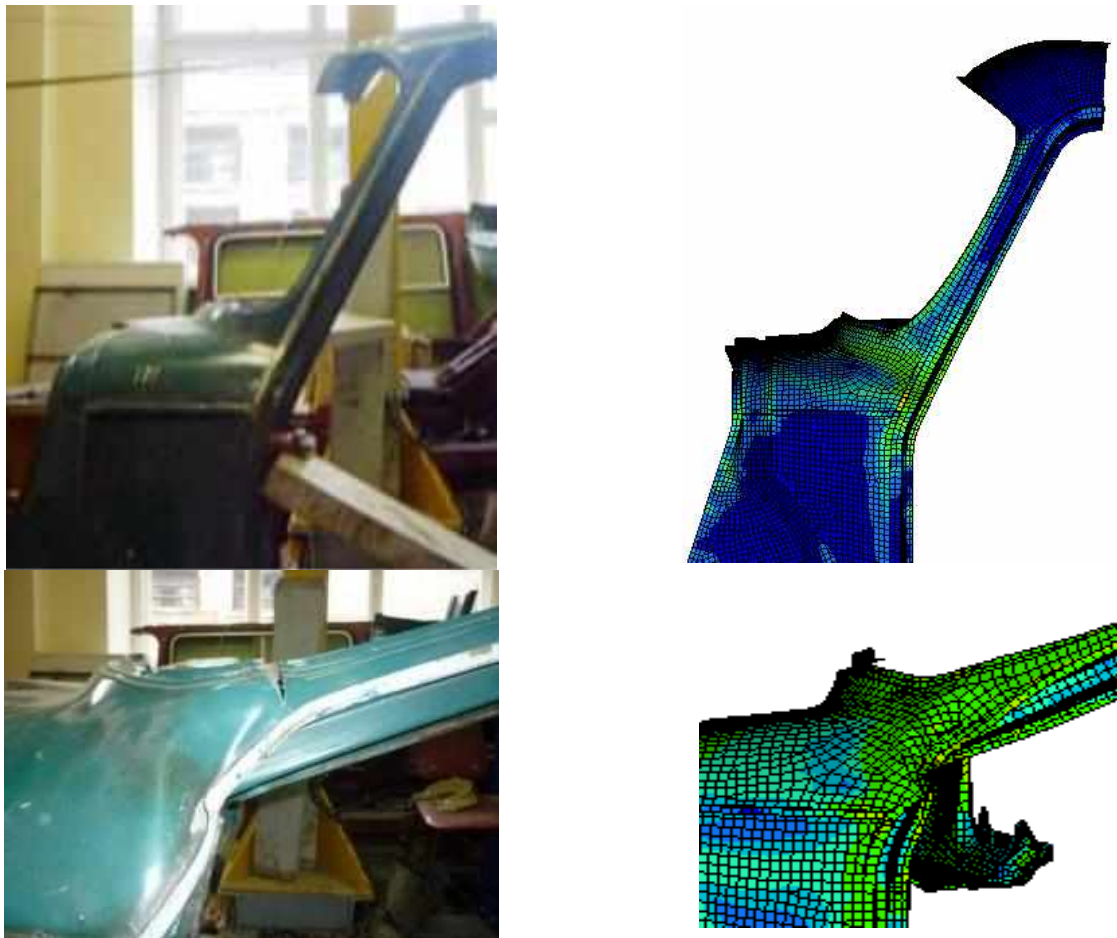


Рис. 6. Результаты расчётно-экспериментальных исследований

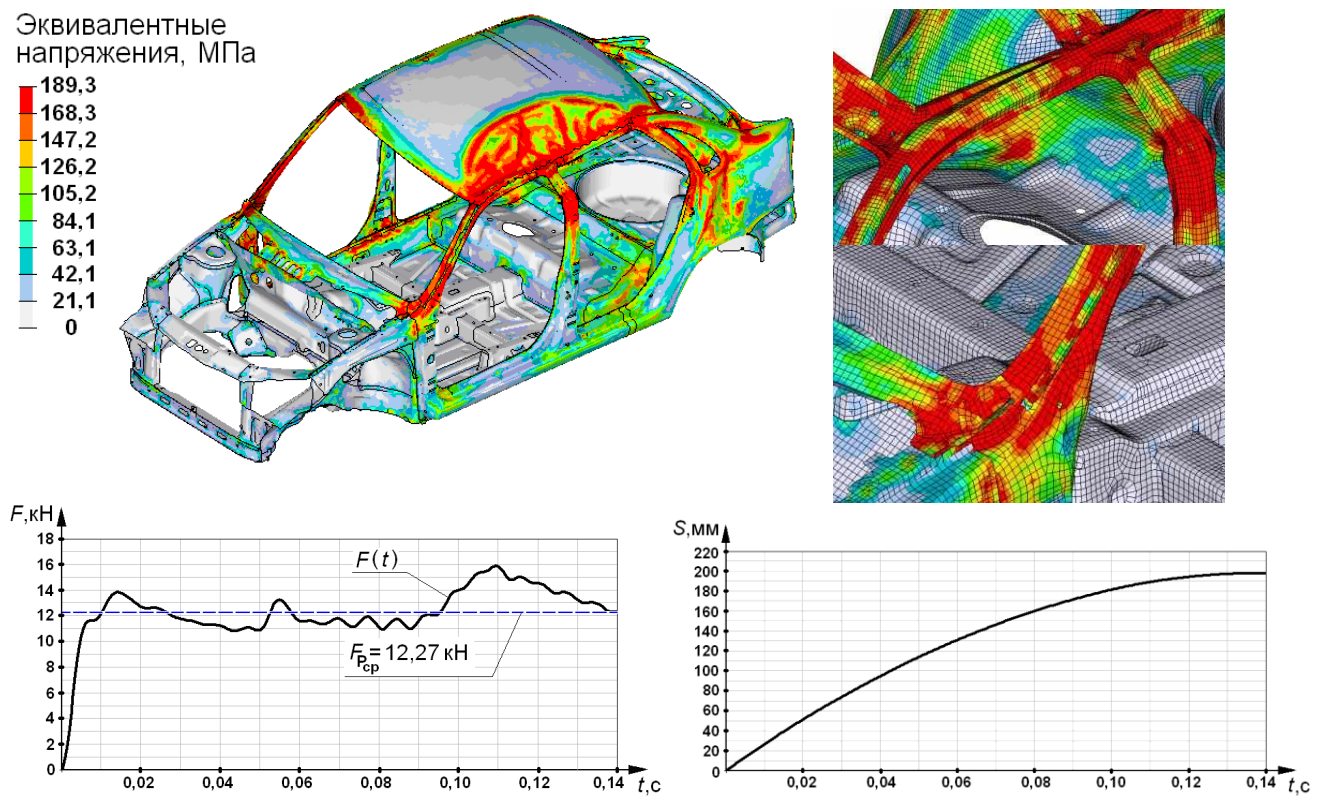


Рис. 7. Деформированный вид модели кузова и графики изменения нагрузки и перемещения

При достижении хорошего совпадения результатов по отдельным узлам можно продолжать разработку КЭМ [7] всей конструкции [8], [9]. Параллельно следует вести подготовку к испытаниям (желательно, динамическим – ударным) хотя бы одного образца конструкции для проведения окончательной верификации результатов. При их хорошей сходимости полученную КЭМ можно использовать для оценки пассивной безопасности конструкции в условиях действия всех регламентированных стандартами видов аварийного нагружения. В этом случае оценку пассивной безопасности изменённых вариантов конструкции (модификаций базовой модели) можно уже осуществлять без проведения экспериментов. Существующие современные пакеты программ, например, LS-Dyna, Abaqus, позволяют это делать на достаточно хорошем уровне.

На рис. 7 показаны результаты расчёта кузова при действии аварийной нагрузки, имитирующей условия, возникающие при опрокидывании легкового автомобиля.

Установлено, что для повышения пассивной безопасности легковых автомобилей необходимо проектировать их энергоёмкие передние и задние части с целью обеспечения поглощения энергии удара. Средняя часть (салон) должна быть относительно прочной, жёсткой и обеспечивать сохранение внутри остаточного жизненного пространства для водителя и пассажиров при всех возможных аварийных ситуациях. Это можно осуществить при наличии прочных порогов, передней, задней и центральной стоек, силовых элементов крыши, расположенных по периметру, надоконных поясов, пояса между центральными стойками и их жёстких связей между собой. Любые конструктивные изменения и мероприятия должны быть направлены на снижение тяжести последствий ДТП и сохранение жизни человека.

На рис. 8 показано испытание бескаркасной кабины грузового автомобиля при вертикальном нагружении, её напряжённо-деформированное состояние, полученное при компьютерном моделировании и пример сравнительной оценки результатов расчёта и эксперимента.

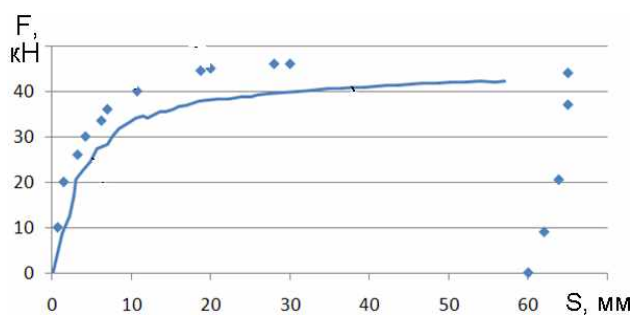
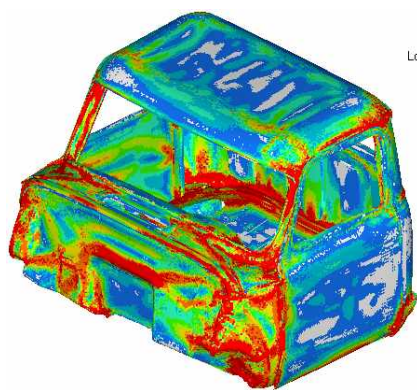
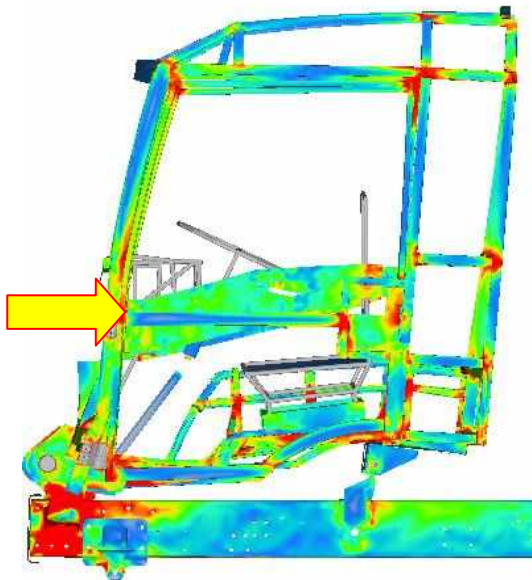


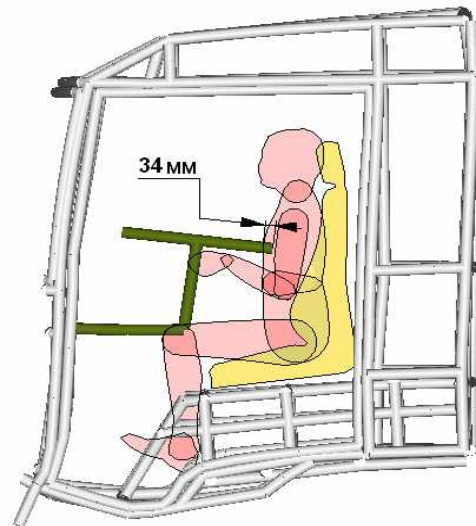
График изменения нагрузки F в зависимости от деформации S
Точки – эксперимент
Линия – расчёт

Рис. 8. Испытание кабины и результаты компьютерного моделирования при вертикальном ее нагружении

Результаты компьютерного моделирования каркасной кабины показаны на рис. 9. При этом проведены исследования влияния вида модели на результат расчёта – сравнение результатов стержневой модели с подробной. Видно, что при больших пластических деформациях стержневая модель даёт завышенные значения разрушающей нагрузки, поэтому её можно использовать при проведении многовариантных исследований и сравнительных оценок.



Напряженно-деформированное состояние модели кабины при ударном нагружении маятником спереди



Оценка остаточного жизненного пространства в кабине по размещению манекена

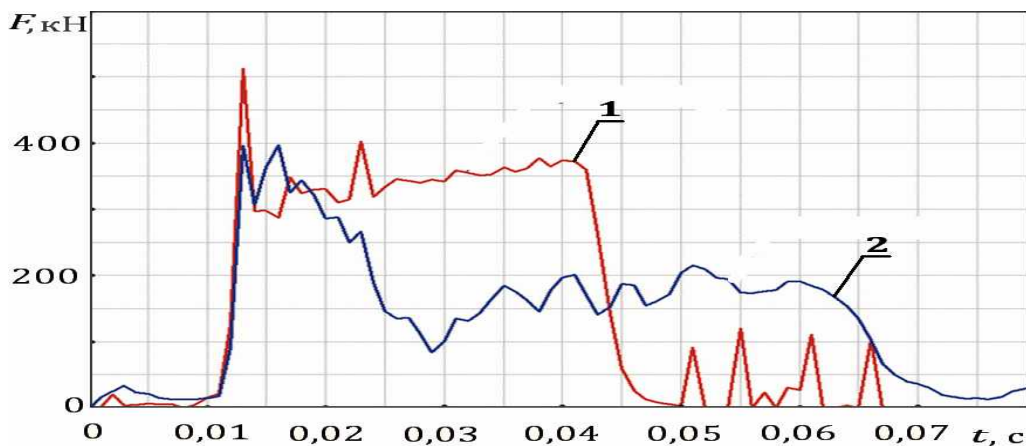


График изменения ударной нагрузки
1 – стержневая модель; 2 – подробная модель

Рис. 9. Результаты компьютерного моделирования ударного нагружения каркасной кабины

Установлено, что повышению безопасности кабин способствуют (рис. 10): усиление нижнего переднего бруса основания (поз. 1); увеличение сечений (не менее 60x40x3) порогов, подоконного пояса и вертикальных стоек передней части (поз. 2 и 3); введение усиливающих раскосов в задних и передних углах основания кабины (поз. 4 и 5) и раскосов в задней стенке кабины (поз. 6); усиление продольных лонжеронов основания (поз. 7); введение брусьев безопасности в дверях (поз. 8).

Деформированные виды кузова автобуса и его задней секции с зонами остаточного жизненного пространства показаны на рис. 11. На основании проведённых исследований подтверждено известное положение о том, что безопасность кузовов автобусов можно оце-

нивать по результатам расчётов и испытаний его отдельных секций, применяя для этого расчётно-экспериментальный метод [3], [5].

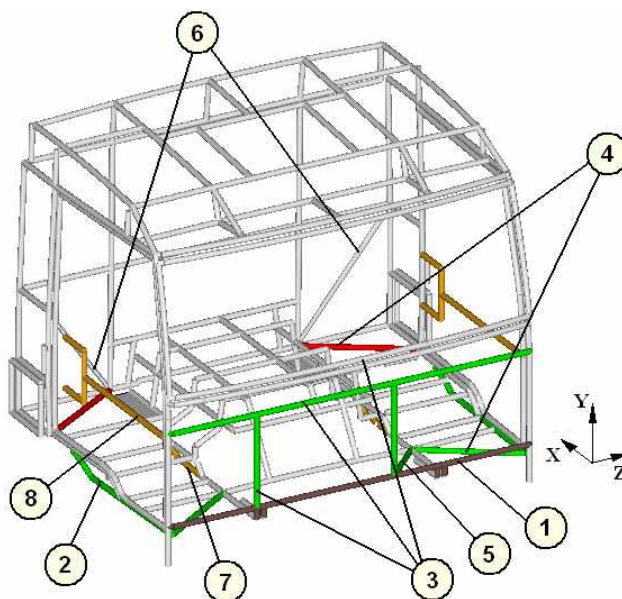


Рис. 10. Элементы, повышающие безопасность кабины

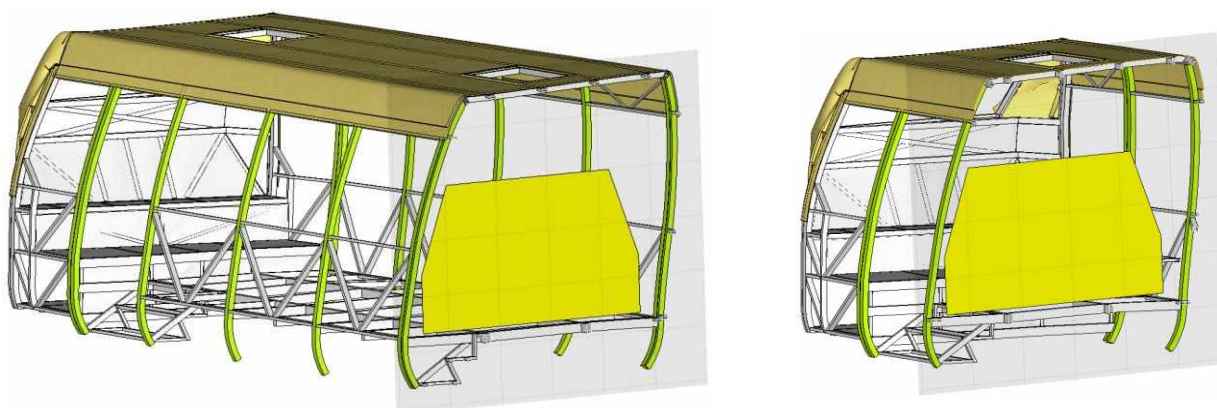


Рис. 11. Деформированные виды моделей каркаса кузова и задней секции автобуса

Установлено, что безопасность кузовов автобусов повышается при наличии внутри салона перегородок и стоек поручней, при жёстком соединении каркасов сидений с боковинами. Повышению безопасности способствует наличие такого каркаса кузова, у которого в случае опрокидывания автобуса зоны пластических деформаций сечений (пластические шарниры) вертикальных силовых элементов боковин возникают как можно выше от основания кузова.

Компьютерное моделирование на основе МКЭ с использованием подробных КЭМ даёт возможность получать уточнённые результаты, необходимые для оценки пассивной безопасности кузовных конструкций на завершающем этапе проектирования.

Рассмотренная последовательность выполнения расчётно-экспериментальных работ позволяет сначала обоснованно прогнозировать безопасность конструкции на основе выбора её силовой схемы, затем проектировать в соответствии с требованиями безопасности и окончательно проверять её на завершающем этапе. Получаемые результаты этой работы должны использоваться соответствующими органами при сертификации автотранспортных средств.

Рассмотренные материалы работы могут быть полезны для специалистов, занимающихся проектированием кузовных конструкций автотранспортных средств и оценкой их пассивной безопасности.

Библиографический список

1. **Рябчинский, А.И.** Пассивная безопасность автомобиля / А.И. Рябчинский. – М.: Машиностроение, 1983. – 145 с.
2. European accident research and safety report 2013. Volvo Trucks (http://www.fahrschule-online.de/fm/3576/European_Accident_Research_and_safety_report_2013.pdf)
3. **Орлов, Л.Н.** Пассивная безопасность и прочность кузовов, кабин автотранспортных средств. Методы расчёта и оценки / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 130 с.
4. **Багичев, С.А.** Разработка методики расчётно-экспериментальной оценки пассивной безопасности кабин грузовых автомобилей при проектировании. Автореферат дис...к.т.н. / С.А. Багичев; НГТУ. – Н. Новгород, 2013. – 18 с.
5. **Орлов, Л.Н.** Оценка пассивной безопасности, прочности кузовных конструкций автомобилей и автобусов: монография / Л.Н. Орлов; НГТУ. – Н. Новгород, 2005. – 230 с.
6. **Орлов, Л.Н.** Прогнозирование и оценка пассивной безопасности автобусов по результатам расчетов, испытаний кузовов и их отдельных секций / Л.Н. Орлов, Е.В. Кочанов. – Вестник КГТУ. Вып. 39 «Транспорт». – Красноярск, 2005.
7. **Орлов, Л.Н.** Основы разработки конечно-элементных моделей кузовных конструкций автотранспортных средств. Расчеты на безопасность и прочность: учеб. пособие / Л.Н. Орлов, А.В. Тумасов, Е.В. Кочанов [и др.] / под ред. Л.Н. Орлова; Нижегород. гос. техн. ун-т. им. Р.Е. Алексева. Нижний Новгород, 2009. – 153 с.
8. **Годжаев, З.А.** Перспективные методы проектирования несущих систем автотранспортных средств, в том числе по критериям безопасности / З.А. Годжаев, Ф.А. Фараджев, Е.А. Матвеев [и др.] // Журнал ААИ. 2012. №4. С. 34–38.
9. **Зузов, В.Н.** Анализ влияния конструкции автобуса на пассивную безопасность при опрокидывании на основе метода конечных элементов / В.Н. Зузов, Ю.Ю. Карамышев, И.В. Ким // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2008. С. 145–149.

*Дата поступления
в редакцию 27.05.2014*

L.N. Orlov, A.V. Tumasov, S.A. Bagichev

IMPROVING OF PASSIVE SAFETY OF MOTOR VEHICLES

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

Purpose: The paper notes the topicality of improving of passive safety of body structures. The passive safety requirements applicable to the bodies of cars and buses, truck cabs were considered. The criterias for safety estimation of constructions during their designing was also suggested.

Design/methodology/approach: A new method of passive safety estimation of construction at all stages of designing was examined. The calculative methods and the need for a separate experiments to refine calculative models and results, as well as the materials characteristics were indicated.

Findings: The examples of practical implementation techniques were given. The calculations and tests results were shown.

Research limitations/implications: The submitted materials could be useful for the specialists engaged in the calculative estimation of passive safety of vehicles.

Originality/value: The conclusions and recommendations for improving of passive safety of the bodies and track cabs were given.

Key words: bodies, cabs, requirements, passive safety, method, calculation, experiment, results, recommendations.

УДК 629.113

А. А. Долгополов, Ю. Ю. Мерзликин, В. Н. Наумов, Д. А. Чижов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ И СОГЛАСОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕМЕНТОВ ПОДЪЕМНОГО И ДВИЖИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСОВ АМФИБИЙНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ И ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ С ШАССИ НА ВОЗДУШНОЙ ПОДУШКЕ

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Предложена методология определения параметров и согласование режимов работы элементов подъемного и движительного комплексов амфибийных транспортных средств и летательных аппаратов с шасси на воздушной подушке. Представлены результаты определения диапазонов регулирования потребных мощностей и частот вращения вентиляторов воздушной подушки, аэродинамических и контактных движителей в процессе движения, разгона и торможения для выбора силовой установки и трансмиссии.

Ключевые слова: шасси на воздушной подушке, амфибийные транспортные средства, летательные аппараты, вентиляторы, движители, режимы работы

Определение параметров и согласование режимов работы элементов подъемного и движительного комплексов амфибийных транспортных средств (ТС) и летательных аппаратов (ЛА) с шасси на воздушной подушке (ШВП) выполняются поэтапно с использованием соответствующих расчетных и экспериментальных методик под конкретное техническое задание (ТЗ) на разработку объекта с ШВП.

В ТЗ указываются условия эксплуатации объекта, основные требования к его функциональным характеристикам, а также показатели допустимого неблагоприятного воздействия объекта на внешнюю среду:

- назначение объекта;
- характер и массогабаритные параметры перевозимого груза;
- максимальные скорости движения объекта по грунтовой и водной поверхностям;
- механические и профильные показатели грунта [1]: несущая способность q , Н/см², внутреннее сцепление C_0 , Н/см², модуль деформации грунта E , Н/см², статистические характеристики профиля грунтовой поверхности;
- максимальные преодолеваемые подъемы и косогоры поверхности α , град;
- уровень развитого волнения водной поверхности;
- требования к курсовой управляемости объекта на грунтовой и водной поверхностях и управлению тягой аэродинамических и контактных движителей ТС и ЛА;
- показатели, диктуемые экологической безопасностью внешней среды: допустимая глубина колеи δ контактного движителя, предельно допустимая скорость истечения воздуха из воздушной подушки (ВП) $V_{в.п}$ по условию разрушения поверхностного слоя грунта и эрозии почвы ($V_{в.п} = \sqrt{\frac{2P_{в.п}}{\rho}}$, м/с, где $P_{в.п}$ – избыточное давление в ВП);
- допустимый уровень шума на местности и внутри объекта.

На первом этапе разработки объекта формируется его предварительный конструктивно-компоновочный облик.

Здесь выполняется исследование по выбору аэродинамической компоновки объекта как единого комплекса: для ЛА — планера, ШВП, аэродинамических движителей и контактных опор, а для ТС – корпуса, ШВП, аэродинамических и контактных движителей и опорных элементов.

Поисковые расчетные и экспериментальные исследования по определению аэродинамической схемы и параметров ШВП (схемы и параметров гибкого ограждения, нагнетателей ВП и воздухопроводов) направлены на обеспечение основных требований, предъявляемых к шасси по статической и динамической устойчивости, амортизационным свойствам, амфибийности, а для ШВП ЛА — дополнительно по поглощению энергии посадочного удара и формированию взлетно-посадочной конфигурации.

При выборе схемы и конструктивных параметров гибкого ограждения (ГО) ВП особое внимание уделяется эластичности, износостойкости, ремонтпригодности и способности элементов ГО «проходить» неровности пути с быстрым восстановлением первоначальной формы без повреждения и опасности «затягивания» (подлома) элементов ГО, а также вопросам выпуска и уборки ГО в полете ЛА.

Результаты некоторых расчетных исследований ШВП на этом этапе уточняются экспериментальными исследованиями масштабных моделей. Например, аэродинамическая схема и конструкция элементов ГО отрабатываются путем испытаний отдельных секций ГО на установках типа «плоский отсек»: на установке с подвижным экраном испытания проводятся с имитацией типовых неровностей; на установке с имитацией набегающего потока воздуха (например, в аэродинамической трубе) проводятся испытания по отработке параметров и процедур выпуска и уборки гибкого ограждения ШВП ЛА в полете. Эти испытания проводятся с соблюдением соответствующих критериев подобия.

Для исследований статической устойчивости и демпфирующих свойств ШВП по крену, тангажу и высоте применяются экспериментальные установки для испытаний действующих масштабных моделей ШВП. Испытания проводятся при колебаниях моделей над твердым экраном динамометрическим и кинематическим методами. Испытания проводятся с соблюдением подобия по коэффициенту импульса и расхода, чисел Рейнольдса Re и Струхала Sh [2].

При испытании масштабных моделей ШВП в гидроканале должно выполняться подобие по числу Фруда Fr . При испытаниях при определении гидродинамического сопротивления ШВП, выполняемых при установившихся скоростях модели достаточно выполнить подобие в соответствии с числом Фруда по расходу воздуха и давлению в ВП. При испытаниях по исследованию динамических процессов движения объектов по взволнованной водной поверхности (или при движении неровной твердой поверхности, например, при буксировке модели по борту канала) необходимо выполнять дополнительно подобие в соответствии с числом Фруда по массово-инерционным характеристикам модели.

В состав работ первого этапа входят также исследования тягового и мощностного балансов ТС и ЛА с ШВП.

По результатам тягового баланса осуществляется выбор потребной тяги, типов, конструкции и параметров аэродинамических и контактных движителей для обеспечения движения ТС и ЛА с ШВП по водной и грунтовой поверхностям с задаваемыми максимальными значениями скоростей и углов подъема. При движении по водной поверхности используются расчетные оценки и экспериментальные материалы определения гидродинамического, аэродинамического и импульсного сопротивлений объектов на скорости «горба сопротивления» и крейсерской скорости. Для случаев движения по грунтовым поверхностям учитывается контактное сопротивление ГО, характеристики грунта по сопротивлению и несущей способности, характеристика контактного движителя по сцеплению с грунтовой поверхностью при соответствующем перераспределении веса между ВП и контактными движителями или опорами.

При расчете тяги контактного движителя учитывается его совместная работа с аэродинамическим движителем, сила тяги по сцеплению $P_{\phi} = Y_{\text{движ}} \phi$, сила сопротивления в результате контакта ГО с поверхностью $P_{\text{г.о}} = f_{\text{г.о}} Y_{\text{п}}$ и сила сопротивления движению $P_{\text{движ}} = Y_{\text{движ}} f$, где $Y_{\text{движ}} = G \cos \alpha - Y_{\text{п}}$ — нормальная реакция грунта на контактный движитель, а $Y_{\text{п}}$ — подъемная сила ВП, G — вес ТС, α — угол подъема поверхности.

Условием возможности движения ТС на подъем является неравенство

$$P_{\phi} + P_{\text{винт}} > P_{\text{движ}} + P_{\text{г.о.}}$$

Расчетные оценки для случая совместной работы контактного и аэродинамического движителей показали, что при одном и том же отношении веса, приходящегося на ВП, к весу, воспринимаемому контактным движителем, угол преодолеваемого косогора по условию бокового несползания меньше, чем угол подъема по условию тяги.

В результате исследования мощностного баланса определяются диапазоны регулирования потребных мощностей и частот вращения вентиляторов ВП, аэродинамических и контактных движителей в процессе движения, разгона и торможения для выбора силовой установки (установок) и трансмиссии.

Возможны три варианта осуществления работы потребителей мощности:

1) все потребители приводятся во вращение от одного двигателя (в этом случае необходима сложная трансмиссия с регулированием потоков мощности на каждый из потребителей);

2) каждый из потребителей имеет автономный двигатель (в этом случае регулирование упрощается, оно может осуществляться изменением режима работы двигателя);

3) смешанный вариант: на каждую группу потребителей имеется своя силовая установка.

Каждая из схем подачи мощности потребителям имеет свои преимущества и недостатки. Во всех типах трансмиссий необходимо предусмотреть возможность запуска двигателя без нагрузки потребителей.

На втором этапе отработка ТС и ЛА с ШВП выполняется с использованием динамически подобных моделей. При этом аэрогидродинамические и амплитудно-частотные характеристики исследуются при буксировочных испытаниях моделей над ровной и взволнованной водной поверхностью с варьированием расхода воздуха ВП, центровки и угла дрейфа. Динамическая устойчивость и демпфирование посадочного удара ЛА определяются на копровых стендах.

В качестве примера приведены графики согласования работы двух вентиляторов ВП и аэродинамического движителя аппарата с ШВП ЗАО «Комвен», разработанного с участием специалистов Московского комплекса ЦАГИ. Рассматриваемый аппарат обладает единой силовой установкой. Цель согласования указанных характеристик заключается в определении передаточных отношений между валом двигателя и потребителями для обеспечения наивысшей скорости движения при заданном запасе мощности двигателя. На рис. 1, 2 представлены номограммы, связывающие характеристики сопротивления движению натурного АВП (X_{Σ}), мощности ($2N_{\text{вент}}^*/\eta_{\text{вент}}$) и расхода ($2Q$) двух вентиляторов, работающих на создание ВП, тяги двух вентиляторных движителей ($2T_{\text{движ}}$) и мощности на их привод ($2N_{\text{вент}}^*/\eta_{\text{вент}}$) в зависимости от оборотов вентиляторов $n_{\text{вент}}$ и движителей $n_{\text{движ}}$.

Исходными при построении графиков на номограммах приняты результаты буксировочных испытаний модели [3] и характеристики вентиляторов ВП и аэродинамических движителей, предусмотренных для установки на АВП. С помощью этих графиков представляется возможным согласовать режимы работы вентиляторов ВП и движителей (т. е. определить рациональное соотношение частот вращения вентиляторов и движителей $n_{\text{вент}0}^*/n_{\text{движ}0}^*$) по заданной максимальной скорости движения АВП V с определением потребной мощности $N_{\text{вент}}^*$ двигателя либо по располагаемой мощности двигателя путем нахождения максимальной скорости движения (см. рис. 1).

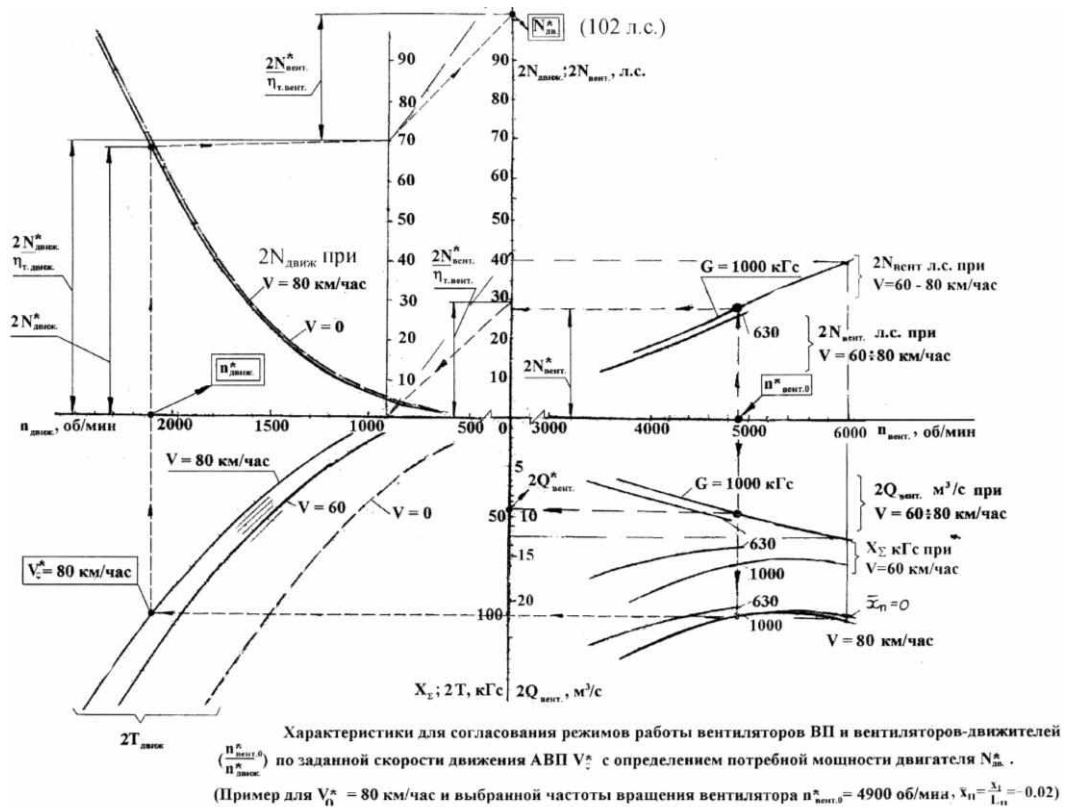


Рис. 1. Номограммы согласования работы вентиляторов ВП и аэродинамических движителей по заданной максимальной скорости АВП с определением потребной мощности двигателя

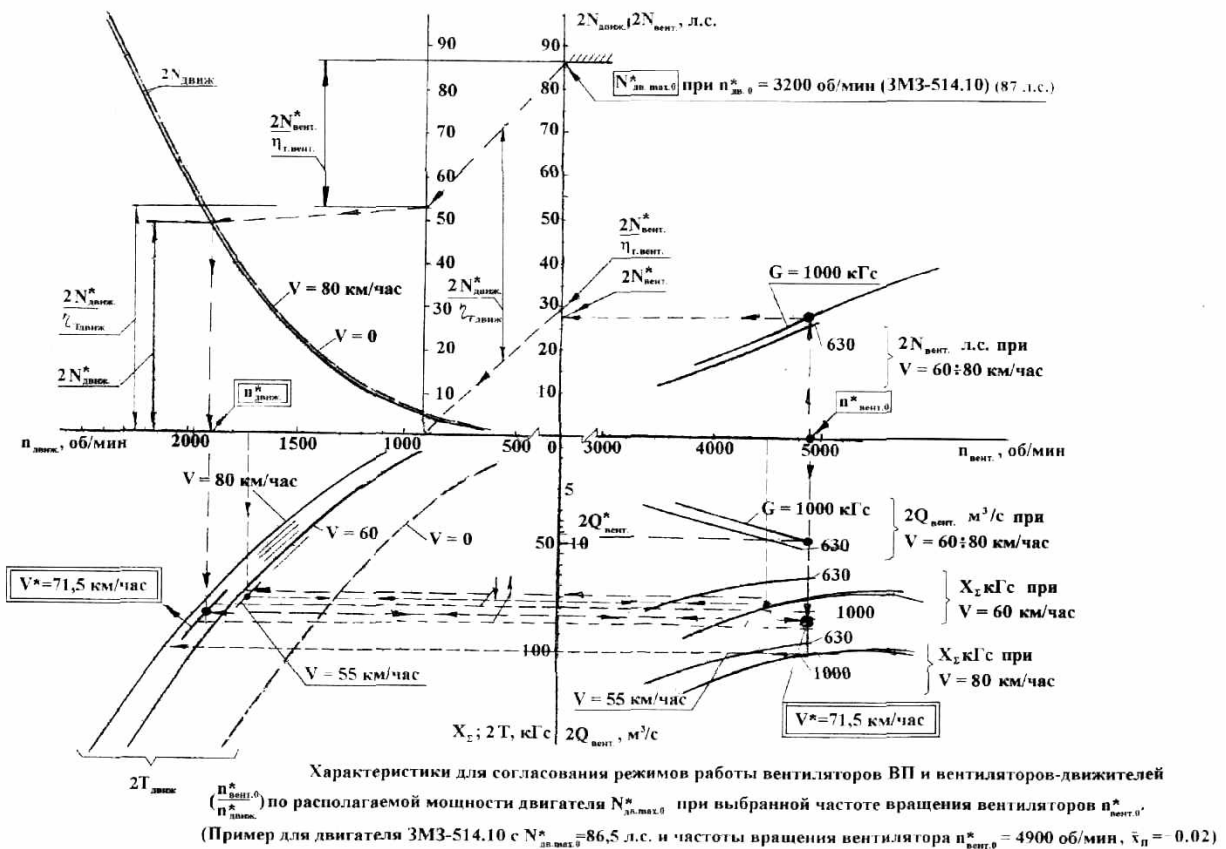


Рис. 2. Номограммы согласования работы вентиляторов ВП и аэродинамических движителей по заданной мощности двигателя с определением достижимой максимальной скорости АВП

При движении АВП по гладкой воде на крейсерской скорости можно рекомендовать поддерживать один расход вентиляторов ВП, в случае же движения по взволнованной поверхности воды для обеспечения большей скорости в этих условиях и большего уровня безопасности движения по «затягиванию» ограждения целесообразно увеличить расход воздуха вентиляторов примерно на 15%. Осуществить такое изменение режимов работы вентиляторов (в данном случае изменение частоты их вращения) можно перераспределением мощности между движителями и вентиляторами ВП, если возможно увеличение частоты вращения двигателя.

С этой целью расчетный режим работы двигателя и, соответственно, режимы работы движителей и вентиляторов должны выбираться при частоте вращения двигателя, меньшей номинальной частоты $n_{\text{дв.ном}}$.

Библиографический список

1. **Агейкин, Я. С.** Вездеходные колесные комбинированные движители Я. С. Агейкин. – М.: Машиностроение, 1972.
2. **Долгополов, А. А.** Особенности методики технических средств для экспериментального определения стационарных и нестационарных аэродинамических характеристик летательного аппарата с взлетно-посадочными устройствами на воздушной подушке / А. А. Долгополов, Г. А. Вишневецкий, Ю. Ю. Мерзликкин // Сб. докладов III научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2000». – М.: Изд. ЦАГИ, 2000.
3. **Долгополов, А. А.** Аэродинамические и амортизационные характеристики нового шасси на воздушной подушке с многосекционным формированием ВП / А. А. Долгополов [и др.] / Сб. докладов IV научной конференции по гидроавиации «Гидроавиасалон-2002». – М.: Изд. ЦАГИ, 2002.

*Дата поступления
в редакцию 27.05.2014*

A.A. Dolgoplov, Y.Y. Merzlikin, V.N. Naumov, D.A. Chizhov

PARAMETER DETERMINATION AND COORDINATION OF OPERATING MODES OF LIFTING EQUIPMENT AND PROPULSION ELEMENTS OF AMPHIBIOUS VEHICLES AND AIRCRAFTS WITH HOVERCRAFT

The methodology of the determination of the parameters and the coordination operating modes of lifting equipment and propulsion elements of amphibious vehicles and aircrafts with hovercraft has been proposed. The results of the regulatory ranges of the required power and rotation frequency of the fans of the hovercraft, aerodynamic and contact propulsions during the motion, acceleration and deceleration to select the engine and transmission have been presented.

Key words: hovercraft, amphibious vehicles, aircraft, fan, propulsors, operating modes.

УДК 621.436.658.589

Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров, В.Н. Наумов, Д.А. Чижов, К.Ю. Машков

**НОВАЯ СИСТЕМА ТОПЛИВОПОДАЧИ ДЛЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ,
ПОЗВОЛЯЮЩАЯ УПРАВЛЯТЬ ДАВЛЕНИЯМИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ ВПРЫСКОВ
И ВПРЫСКОВ ПОСЛЕ ОСНОВНОГО**

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана

Предложена новая система топливоподачи для дизельного двигателя, позволяющая управлять давлениями предварительных впрысков и впрысков после основного, а также изменять кривую давления основного впрыска.

Данная система представляет из себя насос-форсунку с независимым управлением давлением и иглой. Кулачок привода насоса-форсунки выполнен так, чтобы скорость опускания плунжера была постоянной. Благодаря этому давление в камере высокого давления насоса-форсунки может быть постоянным. Величина этого давления устанавливается с помощью пьезоэлектрического клапана регулирования давления (КРД). КРД соединяет камеру высокого давления насоса-форсунки с магистралью подвода топлива. Проходное сечение клапана регулирования давления зависит от величины напряжения, подаваемого на пьезоэлектрический актюатор. Таким образом, при изменении напряжения на пьезоэлементе изменяется давление в камере высокого давления. Игла насоса-форсунки управляется гидравлически с помощью двухпозиционного клапана. Привод клапана может быть соленоидным, пьезоэлектрическим или механическим.

Разработана математическая модель впрыска топлива этим насосом -форсункой. На основе этой математической модели рассчитаны характеристики топливоподачи для многофазного впрыска, состоящего из одного предварительного, основного и одного впрыска после основного. Расчет проводился для режимов, отличающихся формой основного впрыска: ступенчатый, трапецевидный, треугольный и прямоугольный. Показано, что предложенная система топливоподачи позволяет реализовать все четыре формы основного впрыска, а также устанавливать давление для предварительного впрыска и впрыска после основного. Рассматриваемая ТПС является перспективной, однако нуждается в дальнейшем изучении.

Ключевые слова: дизельный двигатель, система впрыска, насос-форсунка, форма основного впрыска, пьезоэлектрический клапан управления давлением.

В настоящее время ведущие производители дизельных двигателей внутреннего сгорания вынуждены решать сложные и зачастую противоречивые задачи.

Одной из таких задач является необходимость осуществления мультивпрыска для улучшения экологических и технических характеристик двигателя [1, 2].

Самые совершенные на данный момент системы топливоподачи (ТПС) - аккумуляторные системы непосредственного впрыска типа COMMON RAIL с электрогидравлическими или пьезоэлектрическими форсунками могут впрыскивать до 9 порций топлива за один цикл [3]. При этом объемы этих порций могут различаться на два порядка. Так, объем пилотного впрыска может быть 1 мм^3 и менее, а объем основной порции 100 и более мм^3 [4].

Объем впрыскиваемого топлива регулируется длительностью или давлением впрыска, поскольку впрыскивание всех порций топлива осуществляется через один уровень отверстий. Выбор диаметров отверстий при этом затруднителен.

При относительно большом диаметре отверстий очень сложно дозировать малые объемы. Электрогидравлическое управление клапанами форсунок не справляется с этой операцией, так как не открывшийся до конца вследствие электромагнитных переходных процессов клапан необходимо закрывать для точного дозирования порции топлива. В этот период времени клапан управлению не поддается.

При относительно малом диаметре отверстий гораздо сложнее реализовать основной впрыск по объему подаваемого топлива. Для этого нужно затягивать основной впрыск и выходить за границы оптимального впрыска по условиям экологии или повышать давление

впрыска. Повышение давления впрыска также ограничено утечками и технологическими возможностями при изготовлении форсунок [5].

Таким образом, имеется ряд технических противоречий, неразрешимых при использовании форсунок с одним уровнем отверстий. В частности, в форсунках с одним уровнем отверстий сложно осуществить точное дозирование каждой порции топлива при большой разнице их объемов. Применение форсунки с двумя и более уровнями отверстий [5–9] позволяет разрешить основные противоречия. При этом нужно отметить, что форсунки с двумя уровнями отверстий до сих пор не выпускаются из-за проблем с приводом клапанов и ряда технологических проблем. Реализация соленоидного привода или пьезопривода для двухуровневых форсунок весьма проблематична, поэтому предлагаются новые технические решения по двухуровневым форсункам с механическим приводом управляющих клапанов.

В данной статье рассматривается форсунка с двумя уровнями отверстий для ТПС типа COMMON RAIL. Она может быть реализована без особых технических сложностей и способна разрешить противоречия, упомянутые ранее.

Чтобы показать это был проведен гидродинамический расчет впрыска топлива рассматриваемой форсункой согласно методике, изложенной в [11, 12], при этом принято допущение: первый и второй уровни отверстий гидравлически изолированы друг от друга. Расчетная схема форсунки представлена на рис. 1.

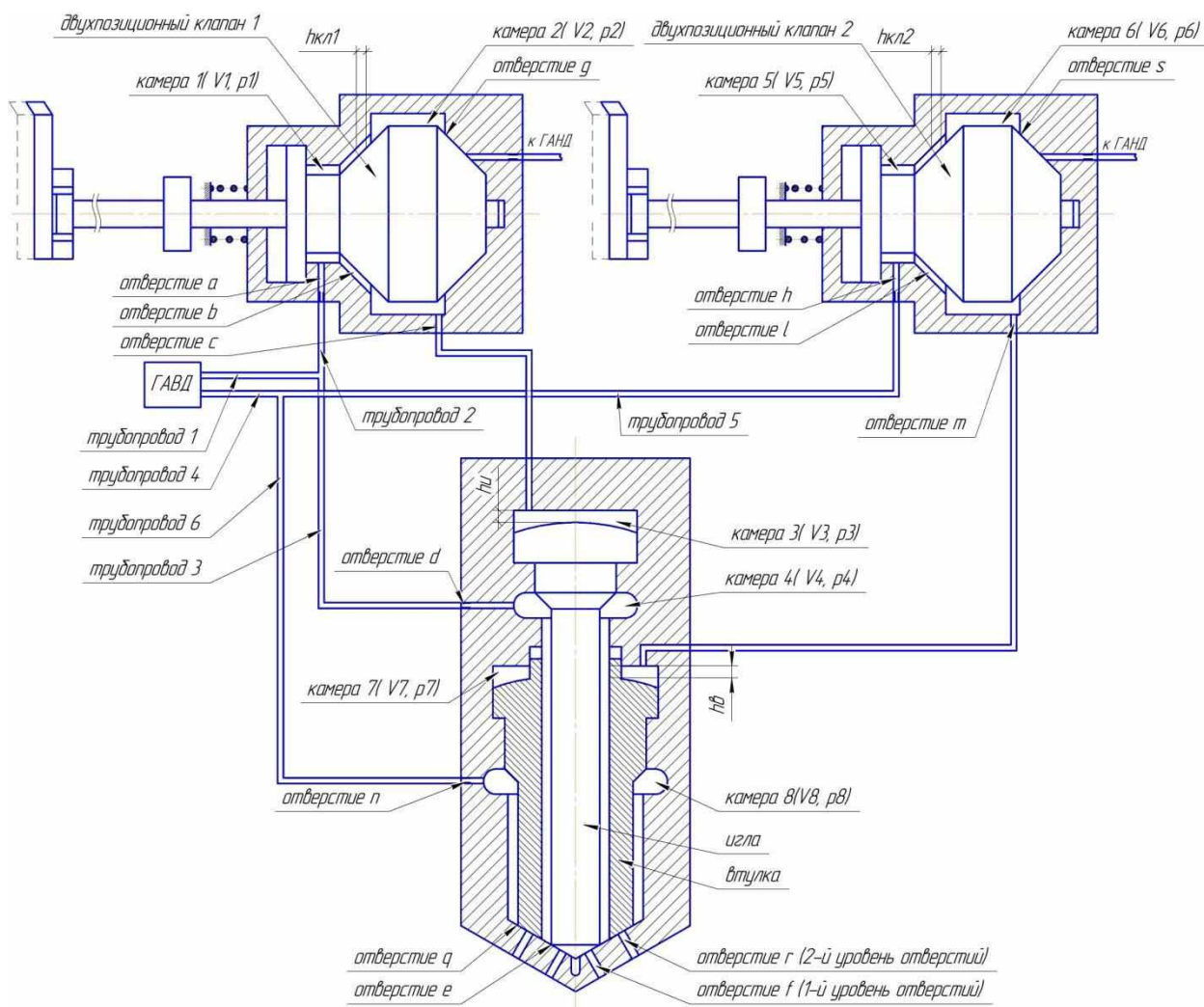


Рис. 1. Расчетная схема форсунки (ГАВД - гидроаккумулятор высокого давления; V_i, p_i - соответственно объем и давление в i -й камере; $h_e, h_a, h_{e21}, h_{e22}$ - максимальные ходы соответственно иглы, втулки, двухпозиционного клапана 1,2 (ДПК1, ДПК2))

Впрыск разбит на три порции: пилотный впрыск, реализуемый до основного, основной впрыск и дожигающий впрыск, реализуемый после основного.

Пилотный и дожигающий впрыски реализуются через первый уровень отверстий с малым эффективным проходным сечением, малой длительностью впрыска и служат для подачи малого объема топлива.

Основной впрыск реализуется между пилотным и дожигающими впрысками через отверстия второго уровня с гораздо большим эффективным сечением и со значительно большей длительностью впрыска. Таковы требования, предъявляемые к оптимальному впрыску.

В качестве привода ДПК1 и ДПК2 применяются быстродействующие реверсивные механические привода. Длительность управляющего воздействия для коротких впрысков выбрана как минимально возможная для такого привода при частоте вращения вала управляющего кулачка 1500 оборотов в минуту – 0,1 мс [12].

Длительность управляющего воздействия для основного впрыска выбрана на порядок больше и равна 1 мс.

Эффективное проходное сечение для отверстий первого уровня - $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$.

Эффективное проходное сечение для отверстий второго уровня более чем в пять раз больше - $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$.

Для сравнения также были рассчитаны ТПС с форсункой с одним уровнем отверстий в двух вариантах: с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$ и $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$.

На рис. 2 представлены дифференциальные характеристики расхода топлива через распыливающие отверстия и на управление для всех трех форсунок.

Получены следующие результаты. Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для двухуровневой форсунки $k=49,4$, и это есть прямое следствие новой конструкции.

Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для одноуровневой форсунки с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$ равно $k=12,8$.

Отношение объема основного впрыска к пилотному впрыску для одноуровневой форсунки с $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$ равно $k=12$.

На рис. 2, а видно, что расход топлива на управление для пилотного впрыска составляет 5 мм^3 , что в два раза меньше расхода топлива на управление для основного впрыска. В то же самое время расход топлива на управление для пилотного впрыска в случае одноуровневых форсунок (рис. 2, б и 2, в) сопоставим с расходом топлива на управление для основного впрыска.

Это объясняется особенностью работы двухпозиционного клапана: расход топлива через двухпозиционный клапан (на управление) будет только при нахождении клапана в промежуточных положениях (если не учитывать утечки через уплотнения), то есть только во время переключения из одного крайнего положения в другое [13]. Поскольку в случае одноуровневой форсунки управление всеми впрысками осуществляется только с помощью одного ДПК, расходы топлива на управление для всех впрысков по объему сопоставимы.

В случае же двухуровневой форсунки мы имеем два ДПК. ДПК для первого уровня отверстий можно сделать меньше без существенного снижения динамики иглы, поскольку очевидно, что игла легче, чем втулка.

Таким образом можно оптимизировать расход топлива на управление для каждого уровня отверстий. Согласно характеристикам на рис. 2, двухуровневая форсунка обладает очевидными и неоспоримыми преимуществами над одноуровневыми при осуществлении мультивпрыска.

При этом большим недостатком двухуровневой форсунки является значительное ее усложнение по сравнению с одноуровневыми. Становится больше трубопроводов, деталей, форсунка более габаритная и требует двух приводов, по одному на каждый уровень отверстий.

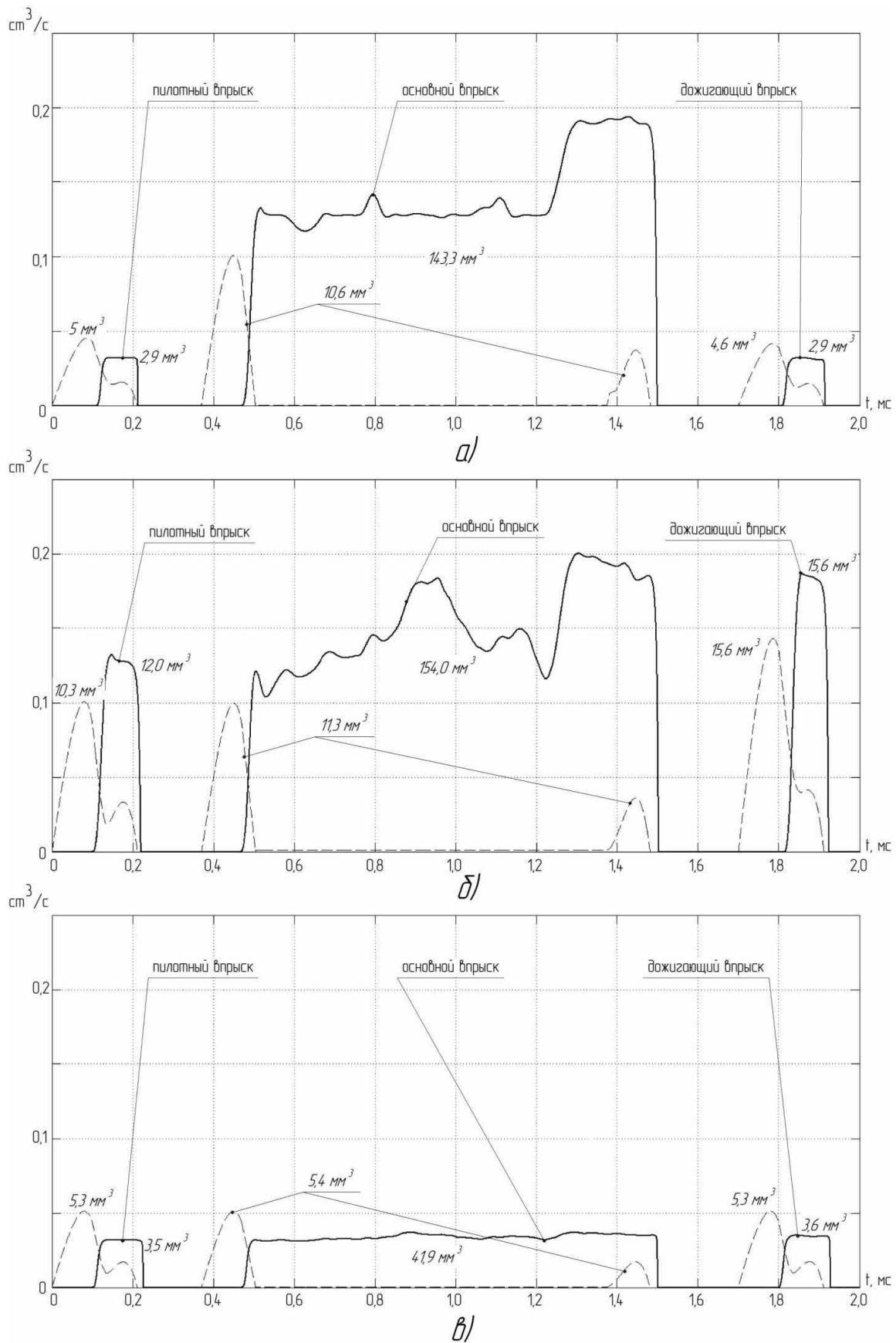


Рис. 2. Расчетная дифференциальная характеристика впрыскивания (—) и расхода топлива на управление (- - -):
 а – двухуровневая; б – одноуровневая с $\mu f = 0,38 \text{ мм}^2$; в) одноуровневая с $\mu f = 0,07 \text{ мм}^2$

Однако это же самое обстоятельство значительно расширяет возможности такой ТПС. Так, поскольку уровней отверстий - два и они гидравлически изолированы друг от друга, впрыски через них происходят при разных давлениях.

Величины давлений под конусом иглы и втулки можно приблизительно вычислить из условия равенства расходов через распылители и сопловые отверстия [14]:

$$p_u = \frac{(\mu f)_{p1}^2}{(\mu f)_{омс1}^2} (p_4 - P_u) + P_u; \quad p_в = \frac{(\mu f)_{p2}^2}{(\mu f)_{омс2}^2} (p_8 - P_u) + P_u;$$

Здесь $p_u, p_в$ - давление под конусом соответственно иглы и втулки; $(\mu f)_{p1}, (\mu f)_{p2}$ - эффективные проходные сечения распылителей соответственно 1-го и 2-го уровней отверстий; $(\mu f)_{омс1}, (\mu f)_{омс2}$ - эффективные проходные сечения распыливающих отверстий соответственно 1-го и 2-го уровней; p_4, p_8 - давления в 4-й и 8-й камерах (рис. 1); P_u - давление газа в цилиндре двигателя.

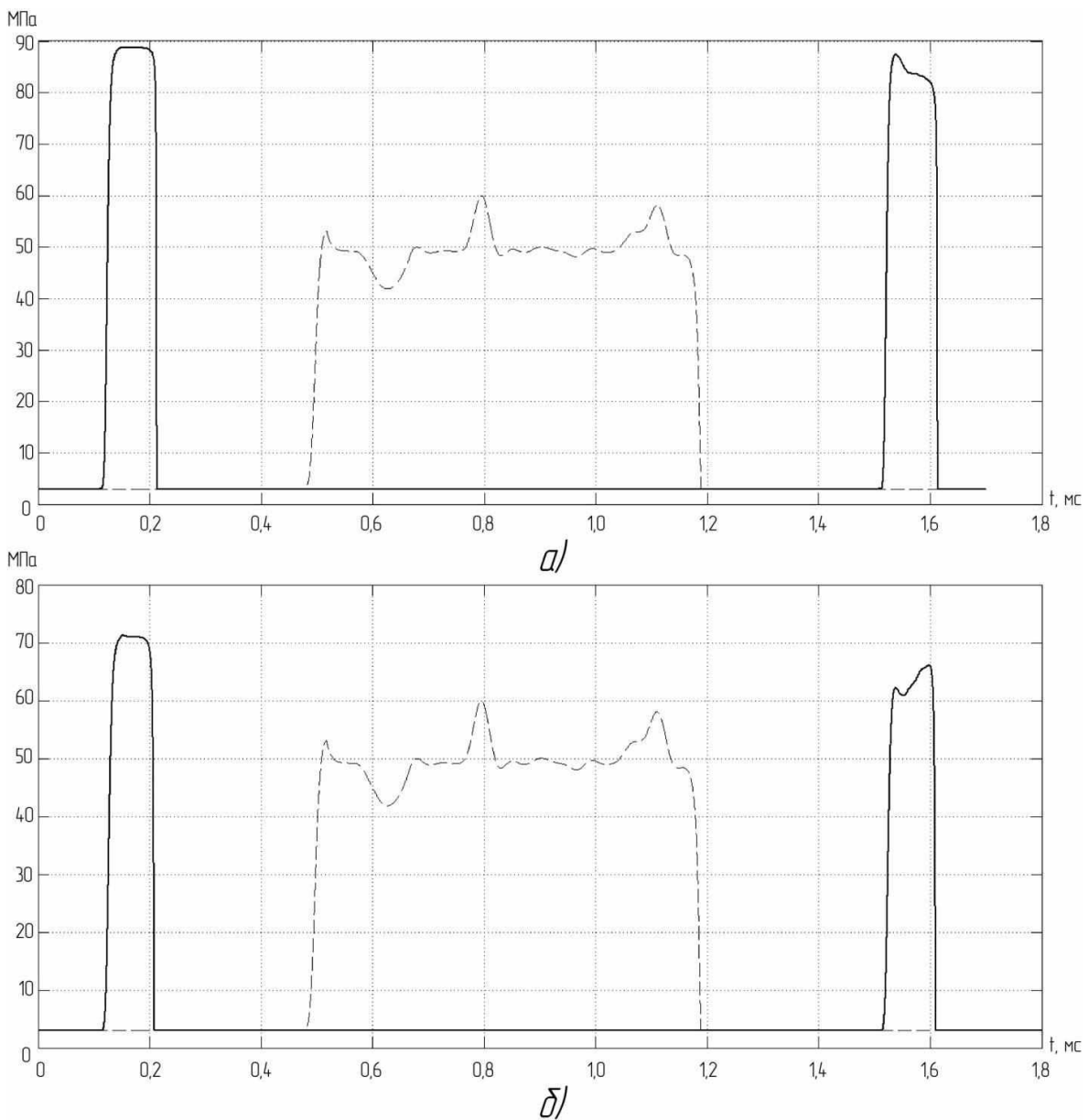


Рис. 3. Диаграммы давлений впрыска для двухуровневой форсунки, первый уровень отверстий (—), второй уровень отверстий (- - -):

$a - (\mu f)_{омс1} = 0,07 \text{ мм}^2, (\mu f)_{омс2} = 0,38 \text{ мм}^2; \quad б - (\mu f)_{омс1} = 0,2 \text{ мм}^2, (\mu f)_{омс2} = 0,38 \text{ мм}^2$

Задача любой ТПС является реализация оптимально цикла топливоподачи. Нужно подобрать такое давления, при котором дробление топлива будет оптимальным и даст нужную скорость горения. Дробление топлива до чрезмерно малых капель может увеличить скорость сгорания топлива, повысить температуру сгорания и, следовательно, увеличить концентрацию окислов азота в составе отработавших газов.

То есть можно подобрать такие сечения отверстий, диаметры иглы и втулки, ходы иглы и втулки, чтобы давления впрыска для каждого уровня были оптимальными.

На рис. 3 представлены расчетные диаграммы давлений впрыска топлива через первый и второй уровень отверстий двухуровневой форсунки с разными эффективными проходными сечениями отверстий первого уровня.

Как видно из рис. 3, при $(\mu f)_{\text{отв}1} = 0,07 \text{ мм}^2$ среднее давление впрыск через первый уровень отверстий около 90 МПа, а при $(\mu f)_{\text{отв}1} = 0,2 \text{ мм}^2$ уже около 70 МПа. Расчет проводился при давлении в аккумуляторе высокого давления 100 МПа.

Таким образом, форсунка с двумя уровнями отверстий является более технологичной, экономичной и экологичной по сравнению с форсунками с одним уровнем отверстий, поскольку упрощает организацию мультивпрыска.

Выводы

1. Разработана математическая модель впрыска топлива гидравлической форсункой с механическим управлением и двумя уровнями отверстий. Проведен расчет мультивпрыска состоящего из пилотного, основного и дожигающего впрыска. Определены основные параметры форсунки, обеспечивающие высокие технические показатели.

2. Показано, что двухуровневая форсунка значительно расширяет возможности топливоподающих систем, в частности:

- имеет место более точное дозирование пилотных и дожигающих впрысков при неизменных объемах основного впрыска;
- появляется возможность, за счет подбора соотношения сечений отверстий первого уровня, диаметра и хода иглы, осуществлять пилотный впрыск при оптимальном давлении, отличном от давления основного впрыска;
- появляется возможность снижения расхода топлива на управление при уменьшении проходных сечений ДПК1.

Библиографический список

1. Mahr. B. Future and Potential of Diesel Injection Systems // THIESEL 2002 Conference on Thermo- and Fluid-Dynamic Processes in Diesel Engines. 2002. №4 С. 5–17.
2. **Врахма, А.** Metodologies for Modeling and Feedback Control of the NOX-BSFC Trade-Off in High-Speed, Common-Rail, Direct-Injection Diesel. Doctor Dissertation. – The Ohio State University. – 2005. – 236 p.
3. Delphi Multec[®] Light Duty Diesel Common Rail System // Официальный сайт компании Delphi Corporation. URL: <http://www.delphi.com/shared/pdf/ppd/dwtrn/multec-light-duty-diesel-common-rail-system.pdf> (дата обращения: 5.01.2013).
4. **Богачев, С.А.** Разработка топливоподающих систем дизеля нового поколения с целью выполнения перспективных нормативов, ограничивающих токсичность отработавших газов: дисс. ... канд. техни. наук / Богачев С.А. – Ярославль. 2002. – 173 с.
5. **Сергеев, В.М.** Новый способ впрыскивания топлива в форсированных дизелях // Автомобильная промышленность. 1998. №1. С. 33–37.
6. Патент 7404526 США F 02M 61/10. Injection nozzle / Michael P. Cooke; Delphi Technologies, Inc., Troy, MI.
7. Патент 2494294 Канада F 02M 63/04. Fuel injection nozzle / Stephan Haas; MAN B&W Diesel.
8. **Марченко, А.П.** Тенденции развития форсунок аккумуляторных топливных систем типа COMMON RAIL / А.П. Марченко, Д.В. Мешков, И.В. Рыкова // Двигатели внутреннего сгорания. 2005. №1. С. 68–74.

9. Патент 100038054 Германия F 02M 47/06. Cam-controlled injection unit for internal combustion engine/ Ludwig Burger; AVL List GmbH, Graz, AT.
10. Патент 2383772 Россия F 02M 61/18, F 02M 51/06, F 02M 47/02. Способ управления подачей топлива и устройство для его осуществления / Погуляев Ю.Д., Наумов В.Н.; ГОУ ВПО "Южно-Уральский государственный университет".
11. **Погуляев, Ю.Д.** Математическая модель процесса впрыска топлива форсункой с двухпозиционным клапаном / Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров // Строительные и дорожные машины. 2012. №9. С. 33–38.
12. **Погуляев, Ю.Д.** Топливная система типа Common Rail с гидравлической форсункой и механическим управлением двухпозиционным клапаном / Ю.Д. Погуляев, Р.М. Байтимеров // Строительные и дорожные машины. 2012. №12. С. 16–19.
13. **Богачев, С.А.** Электрогидравлическая форсунка с двухпозиционным клапаном / С.А. Богачев, Ю.Е. Хрящев // Известия вузов. Машиностроение. 2002. №2-3. С. 61–75.
14. **Астахов, И.В.** Подача и распыливание топлива в дизелях / И.В. Астахов, В.И. Трусков, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков. – М.: Машиностроение. 1972. – 260 с.

*Дата поступления
в редакцию 27.05.2014*

Y.D. Pogulyaev, R.M. Baytimerov, V.N. Naumov, D.A. Chizhov, K.Y. Mashkov

NEW FUEL DELIVERY SYSTEM FOR DIESEL ENGINE ALLOWING TO CONTROL THE PRE-INJECTION PRESSURES AND INJECTION PRESSURES AFTER THE MAIN

The new fuel delivery system for diesel engine allowing to control the pre-injection pressures and injection pressures after the main has been proposed. This system also allows to modify the main injection pressure curve. The mathematical model of the fuel injection by the unit injector has been developed. The characteristics of fuel supply for multiphase injection have been calculated based on the mathematical model.

Key words: diesel engine, fuel delivery system, unit injector, main injection form, piezoelectric pressure control valve.

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

УДК 629.12:532

А. Б. Ваганов¹, Нгуен Нгок Тан²

ДИНАМИКА НЕРАВНООБЪЕМНЫХ НАКЛОНЕНИЙ СУДНА ПРИ ВНЕЗАПНОМ ИЗМЕНЕНИИ НАГРУЗКИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева¹,
Социалистическая Республика Вьетнам²

Цель: Исследование движения судна при внезапном изменении нагрузки.

Метод: При внезапном изменении нагрузки судна, его движение описывается системой уравнений по методу «ДИНАМИКА». При этом движение судна представляется собой как совокупность вращений вокруг осей, проходящих через центра тяжести судна и перемещение центра тяжести судна. Расчет выполнен по численному методу Рунге-Кутты 4-го порядка с помощью ПЭВМ.

Результаты: Для расчета было выбрано два варианта корпуса судна: низкобортный и высокобортный. Полученные результаты: при внезапном изменении нагрузки вертикальное перемещение у высокобортного корпуса судна – положительное а у низкобортного корпуса – отрицательное.

Выводы: При внезапном изменении нагрузки возникают побочные вида движения. Побочное вертикальное перемещение корпуса представляет опасность затопления для низкобортных судов.

Ключевые слова: динамика, статика, крен, дифферент, динамическая нагрузка, наклонение, вертикальное перемещение.

Динамика корабля – раздел, который изучает движение корпуса судна под действием внешних, изменяющихся во времени сил от ветра и волнения моря, от принимаемых на корабль грузов, работы различных механизмов.

Изменение параметров посадки судна могут быть большими, а наклонения, особенно по крену, неравнообъемными. Применение методик статики корабля, метацентрических формул остойчивости, допущения о прямолинейности обводов корпуса, диаграмм остойчивости будет неправомерным. Нужны другие теоретические и вычислительные средства, способные дать исчерпывающее и точное решение задач плавучести и остойчивости корабля в сложных эксплуатационных ситуациях.

Методически решение задач динамики корабля основывается на классификации этих задач, составлении уравнений движения, определении сил, действующих на корпус, интегрировании уравнений движения и анализе полученных результатов.

Для определения посадки корабля и в дальнейшем движения корабля применимы такие системы координат [1]; [2]; [3]:

1) O, ξ, η, ζ – неподвижная система координат, предназначенная для отсчета линейных перемещений корпуса. Ось $O\zeta$ вертикальна, а оси $O\xi$ и $O\eta$ горизонтальны, и координатная плоскость $\xi O\eta$ параллельна плоскости спокойной воды;

2) $O_2, \xi_2, \eta_2, \zeta_2$ – неподвижная гидромеханическая система координат. Начало этой системы координат располагается на поверхности спокойной воды и, чаще всего, на одной вертикали с началом неподвижной системы координат, а оси $O_2\xi_2 \parallel O_2\xi_2$, $O_2\eta_2 \parallel O_2\eta_2$, $O_2\zeta_2 \parallel O_2\zeta_2$.

3) G, x, y, z – связанная с корпусом система координат, предназначенная для составления уравнений движения корпуса и определения внешних сил;

4) $G, \xi_1, \eta_1, \zeta_1$ – первая полусвязанная система координат, начало которой совпадает с началом связанной системы координат, а оси $G\xi_1 \parallel O\xi, G\eta_1 \parallel O\eta, G\zeta_1 \parallel O\zeta$. Эта система координат предназначена для отсчета угловых перемещений корпуса;

5) O_3, x_3, y_3, z_3 – связанная с корпусом геометрическая система координат, предназначенная для описания геометрии поверхности корпуса, при этом оси $Gx \parallel O_3x_3, Gy \parallel O_3y_3, Gz \parallel O_3z_3$;

б) $O_3, x_3, y_\Theta, z_\Theta$ – вторая полусвязанная с корпусом геометрическая система координат, которая получается путем поворота осей связанной геометрической системы координат вокруг оси O_3, x_3 на угол крена и предназначена для вычисления геометрических характеристик погруженного объема корпуса при произвольной посадке;

7) $O_3, \xi_3, \eta_3, \zeta_3$ – вспомогательная вторая полусвязанная система координат предназначена для вычисления плеч остойчивости и плеч сил тяжести привязанных на судно грузов.

Положение корпуса судна в неподвижной системе координат может быть определено тремя линейными координатами ξ_0, η_0, ζ_0 , центра G связанной системы координат и тремя угловыми координатами Θ, Ψ, χ , которые характеризуют взаимное расположение осей полусвязанной и связанной систем координат. Переход от связанной системы координат к неподвижной системе осуществляется по известным в аналитической геометрии формулам.

В различных разделах теории корабля применяются частные комбинации перечисленных систем координат, которые приспособлены к особенностям решаемых задач, обеспечивают компактность расчетных уравнений, отвечают естественным представлениям наблюдателя (капитана) на судне и сложившимся традициям в кораблестроении и в судовождении. Нет единообразия и в принятии угловых параметров. Статика корабля использует угловые параметры, предложенные В.Г. Власовым. В качке и управляемости судов используются угловые параметры Эйлера. Кроме того, применяются и различные правила знаков при отсчете углов поворота Θ, Ψ, χ .

Из большого многообразия систем Эйлеровых углов в кораблестроении применяется система, образуемая тремя последовательными поворотами вокруг осей трех разных номеров: χ – курс; ψ – дифферент; Θ – крен. В качестве положительного направления поворотов примем направление поворота корпуса по часовой стрелке (рис. 1).

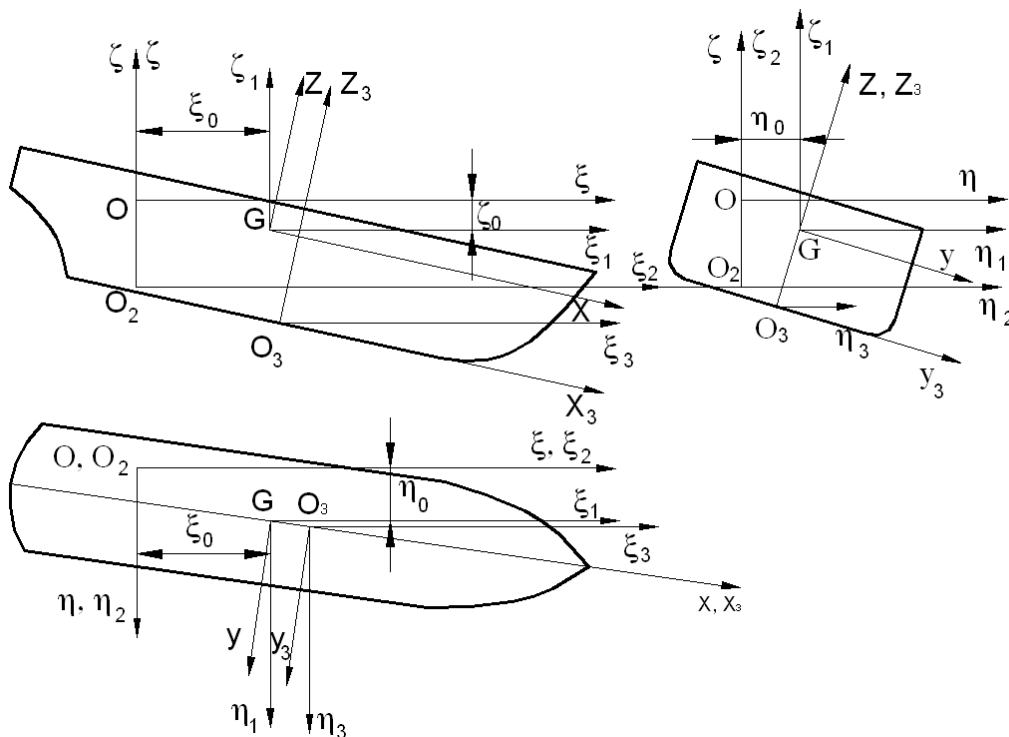


Рис. 1. Системы координат

При пространственных неограниченных углах χ , ψ , Θ система дифференциальных уравнений движения не разделяется на нормальные дифференциальные уравнения. Поэтому введение частных видов движения корпуса корабля или введение ограничений на углы наклона с последующими упрощениями задачи является необходимым шагом для получения инженерного решения.

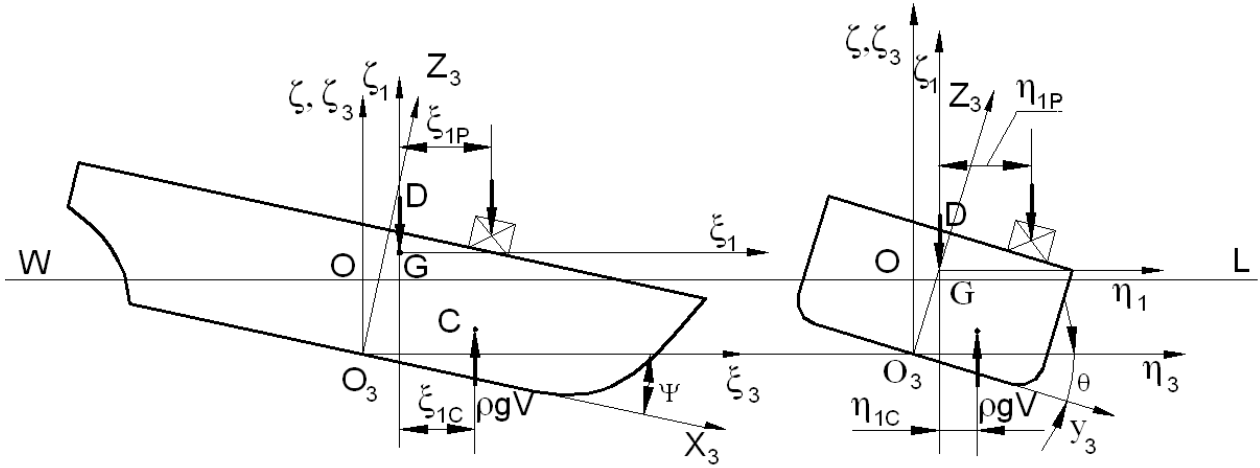


Рис. 2. Схема внешних сил

Особенностью рассматриваемых движений корпуса судна является то, что силы тяжести корпуса и грузов вертикальны и при изменении нагрузки движение корпуса будет иметь место в вертикальном направлении, по крену и по дифференту. Движение корпуса в горизонтальной плоскости не приведет к изменению величины и формулы погруженного объекта. Поэтому эти движения корпуса не будем учитывать. Также положим $\xi_0 = \eta_0 = 0$, т.е. начало O неподвижной системы координат и начало O_3 всегда лежит на одной вертикали.

Определим расчетные уравнения движения корпуса при изменении нагрузки. Схема внешних сил, действующих на корпус, показана на рис. 2.

Тогда уравнения движения корпуса примут такой вид:

$$\begin{aligned}
 (m + \lambda_{33}) \frac{dv_\zeta}{dt} &= \rho g V - D - \sum_{i=1}^{N_p} P_i - b_{\zeta\zeta} v_\zeta; \\
 (I_{yy} + \lambda_{55}) \frac{d\omega_\eta}{dt} &= M_{\text{Диф}} + D \xi_g - \rho g V \xi_c + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \xi_{p_i} - b_{55} \omega_\eta; \\
 (I_{xx} + \lambda_{44}) \frac{d\omega_\xi}{dt} &= M_{\text{КР}} + D \eta_q - \rho g V \eta_c + \sum_{i=1}^{N_p} P_i \eta_{p_i} - b_{44} \omega_\xi; \\
 \xi_c &= \xi_{3c} - \xi_{3g} \\
 \eta_c &= \eta_{3c} - \eta_{3g} \\
 \frac{d\zeta}{dt} &= v_\zeta; \\
 \frac{d\psi}{dt} &= \omega_\eta; \\
 \frac{d\theta}{dt} &= \omega_\xi;
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

В уравнениях движения (1) обозначено:

D – сила тяжести корпуса;

ξ_g, η_g – абсцисса и ордината центра тяжести судна;

$\rho g V$ – сила плавучести, вычисляемая по ординатам теоретического корпуса при мгновенной посадке;

ξ_{1c}, η_{1c} – абсцисса и ордината центра величины;

ΣP_i – суммарный вес принятых на судно грузов в данный момент времени;

ξ_{pi}, η_{pi} – абсцисса и ордината центра тяжести принятого груза;

$M_{кр}$ – кренящий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;

$M_{диф}$ – дифферентующий момент внешних сил, действующих в данный момент времени;

$b_{\zeta\zeta}, b_{44}, b_{55}$ – коэффициенты сопротивления воды перемещениям корпуса.

После приведения системы уравнений к нормальному виду осуществим интегрирование численным методом.

Блок-схема алгоритма ПОСАДКА, ориентированного на применение достаточно мощных ПЭВМ приведена на рис. 3. При выборе численного метода интегрирования остановимся на методах Рунге-Кутты четвертого порядка.

В блок-схеме (рис. 3) алгоритм ТКOST составлен по рекомендациям [1], [2], использующим метод поперечных сечений корпуса и правило трапеций с неравноотстоящими ординатами при вычислении определенных интегралов.

Данный алгоритм является универсальным для расчетов по статике корабля. Исходной информацией являются массивы координат продольно-горизонтальных сечений корпуса (ватерлиний) и поперечно-вертикальных сечений (шпангоутов) теоретического корпуса.

В методе СТАТИКА наклонение корпуса судна кинематически рассматривается как качение по горизонтальной плоскости «катящейся кривой» F_0, F_1, F_2, \dots . Горизонтальная составляющая этого движения не учитывается. Это равнообъемное наклонение. Вращение осуществляется вокруг осей F_{0x}, F_{1x} .

В методе ДИНАМИКА движение корпуса судна, описываемой системой дифференциальных уравнений (1), представляется как совокупность вращений вокруг осей $G\xi, G\eta$ (крен и дифферент) и перемещение во вертикальном на правлении (на рис. 4).

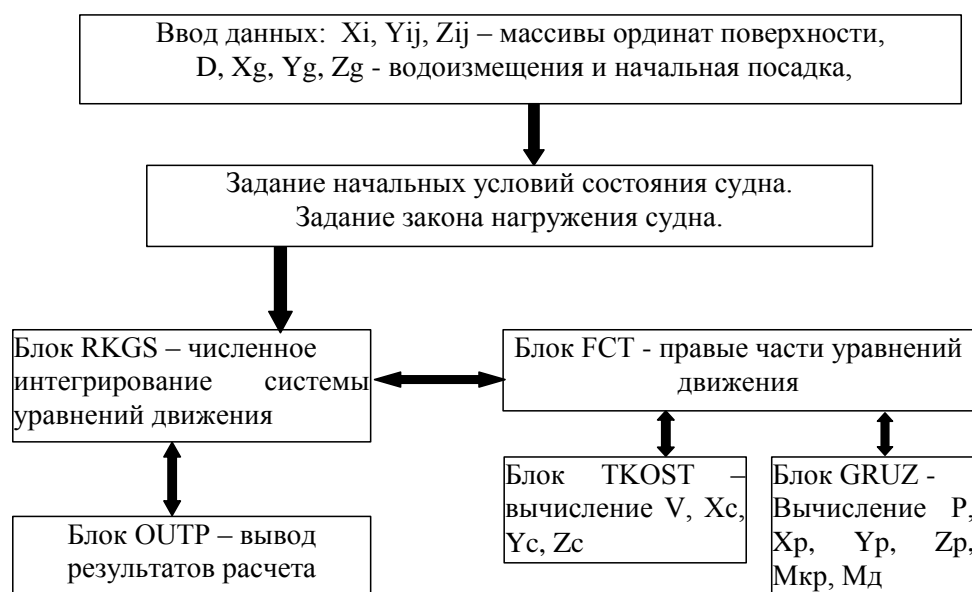


Рис. 3. Блок схема программы ПОСАДКА корабля

Выполним такой анализ. Возможно наклонение корабля по крену (дифференту) с бесконечно малой угловой скоростью. В этом случае наклонение будет являться равнообъемным, поскольку в вертикальном направлении корабль будет успевать всплывать или погружаться. Положение равнообъемной ватерлинии определится как касательная к «катящейся кривой» F_0, F_1, \dots, F_n . Другим предельным случаем наклонения будет мгновенное наклонение (поворот вокруг оси Gx) на угол θ . Наклонная ватерлиния будет касательной к окружности радиусом $r = (Z_G - T)$. Эти наклонения покажем на рис. 4, а, б.

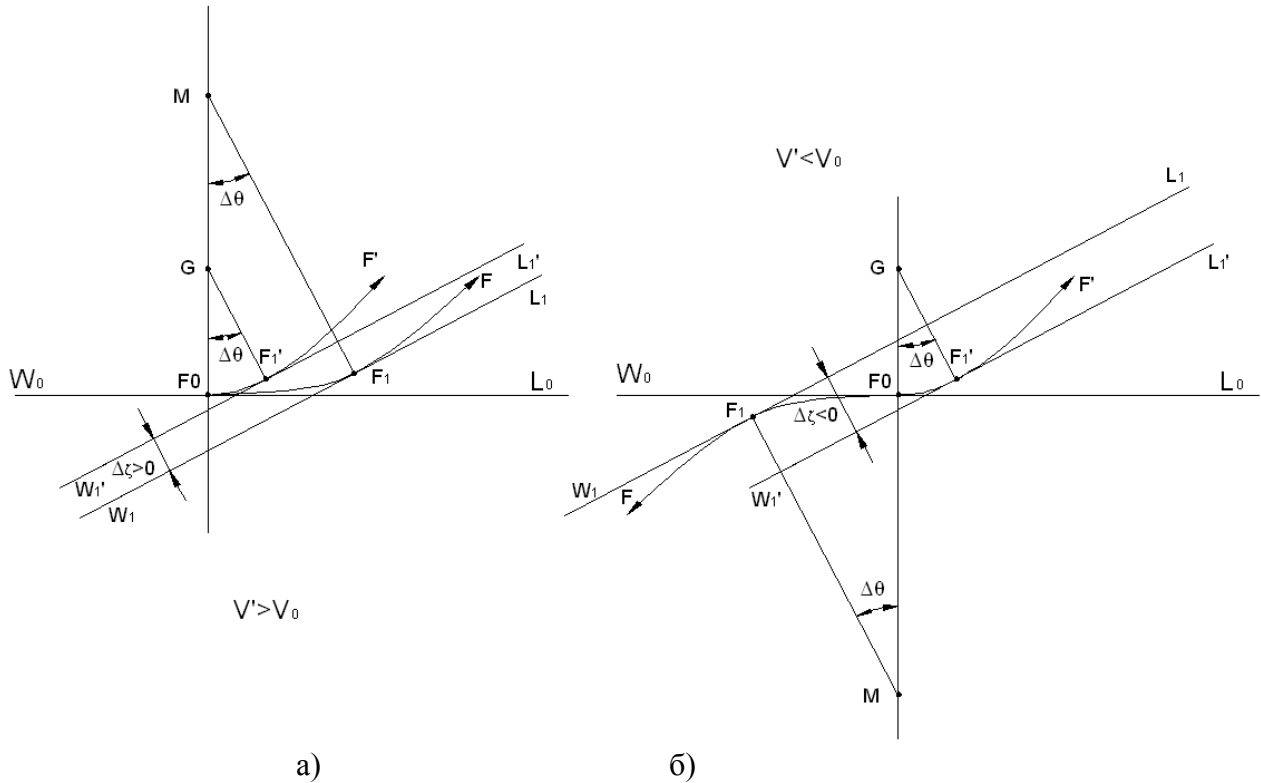


Рис. 4. Кинематическая схема наклонений корпуса:
 а – судно высокобортное; б – судно низкобортное

Обозначим $\Delta\zeta$ – возвышение мгновений ватерлинии над равнообъемной ватерлинии. Если $\Delta\zeta > 0$ – судно всплывает, а если $\Delta\zeta < 0$, то погружается.

Окружность, разность $r = (Z_G - T)$ – это линия центра тяжести F_0 при мгновенном повороте вокруг G на угол θ . Касательно к этой окружности под углом θ будет проходить мгновенная ватерлиния $W'L'$. Это не равнообъемная ватерлиния и судно будет совершать вертикальное движение, чтобы выполнилось уравнение плавучести:

$$D = \rho g V_0; \tag{2}$$

Как следствие, образуется избыточная вертикальная сила, равная

$$\Delta R_\zeta = (\rho g V - D). \tag{3}$$

Можно выделить два типа корпусов: высокобортное и низкобортное (по параметру $(H - T)/H$). Два этих типа имеют различающиеся значительно формулу «катящейся кривой». Поэтому «побочное» вертикальное перемещение у таких типов корпусов будут также существенно различными:

В качестве примеров для расчетов принято два корпуса пассажирского судна, которые имеют одну и ту же погруженную часть и разные надводные части.

Вариант корпуса 1: $L = 47,77$ м; $B = 7,33$ м; $T = 1,2$ м; $H = 2,6$ м; $z_G = 3,1$ м.

Вариант корпуса 2: $L = 47,77$ м; $B = 7,33$ м; $T = 1,2$ м; $H = 1,51$ м; $z_G = 1,62$ м.

Для каждого варианта корпуса выполнен расчет гидродинамических характеристик и координаты катящейся кривой F_0, F_1, \dots, F_n .

Определенно, что после мгновенного наклонения $\theta = 25^\circ$ величина $\Delta\zeta$ (рис. 5) составляют:

- $\Delta\zeta = 0,32$ м для высокобортного варианта корпуса;
- $\Delta\zeta = 0,538$ м для низкобортного варианта корпуса;

Их будем рассматривать как потенциальную склонность к вертикальным перемещения судна при динамическом приложении кренящего момента. У реального судна угловая скорость будет принимать конечные значения и величина вертикального перемещения очевидно будет другой.

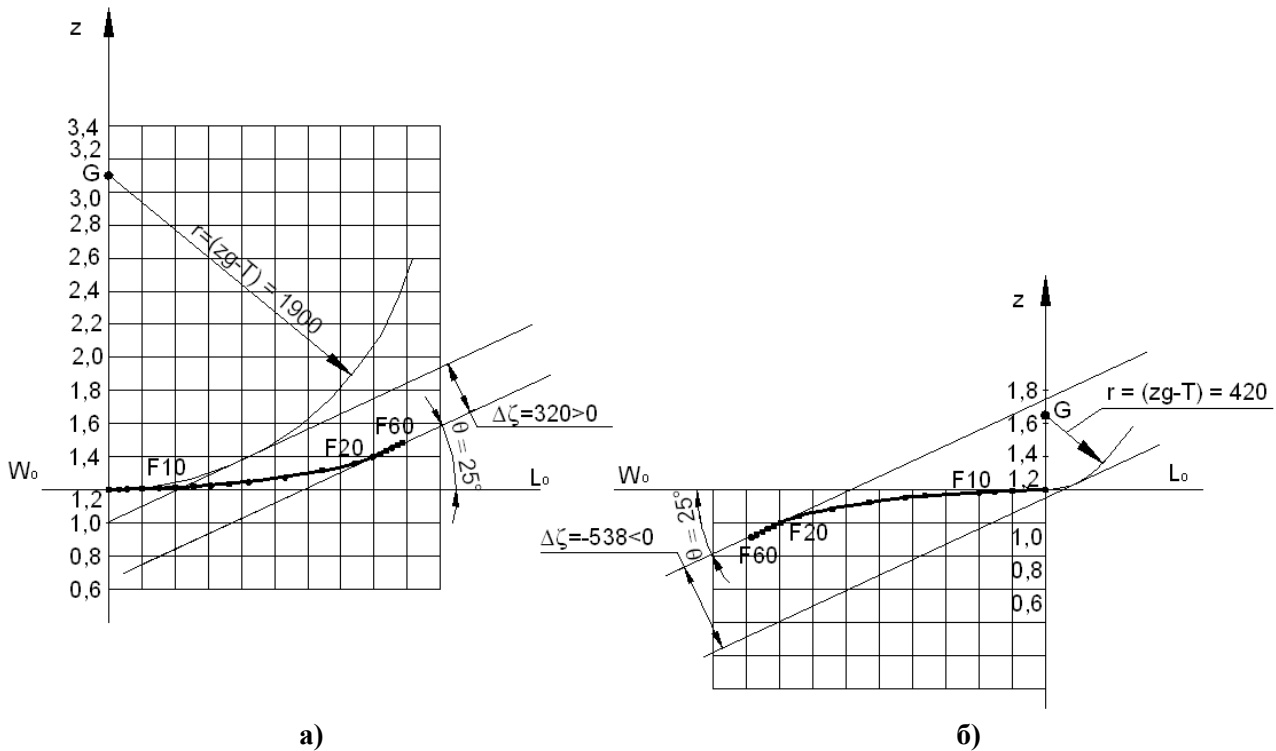


Рис. 5. Предельные способы наклонения:
а – высокобортное судно; *б* – низкобортное судно

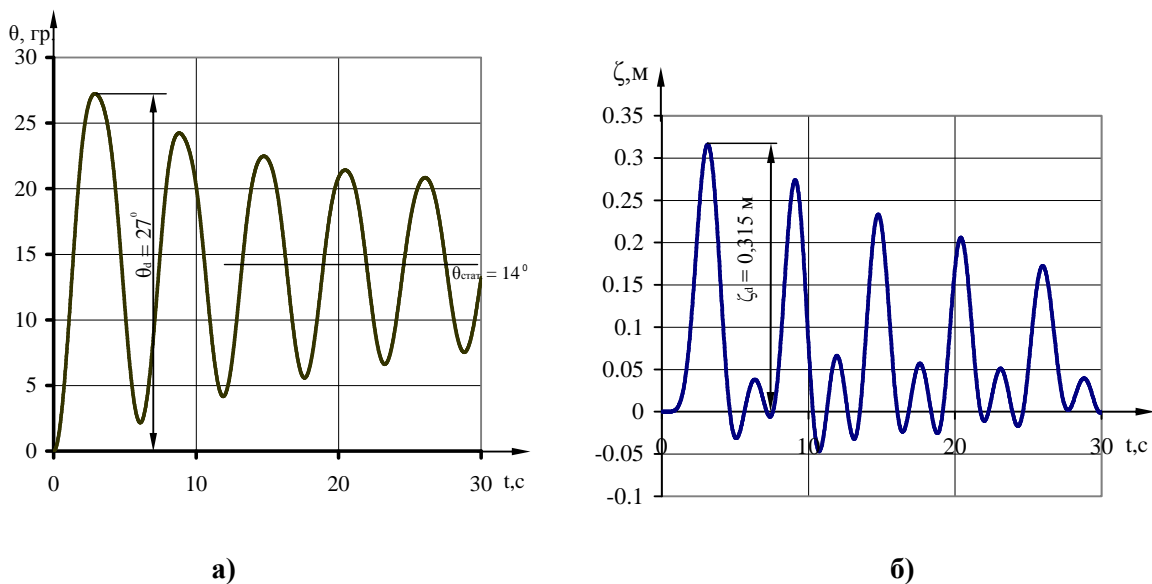


Рис. 6. Динамические характеристики движения судна (вариант корпуса 1):
а – угол крена; *б* – вертикальное перемещение

По разработанному алгоритму и программе ПОСАДКА СУДНА выполнены расчеты динамики судов при внезапном приложении кренящего момента. На рис. 7, а показана зависимость угла крена и на рис. 7, б показана зависимость вертикального перемещения для низкобротного варианта корпуса.

Результаты расчета подтверждают выше приведенные рассуждения о сложном характере движения корпуса судна при динамическом изменении нагрузки.

Динамический угол крена θ_d при этом оказывается менее аналогичной величины, определенной по диаграмме статической и динамической остойчивости из-за наличия момента демпфирования воды $b_{44} \omega_x$, побочного влияния вертикальных помещений.

Более опасным от затопления для низкобротного варианта корпуса является значительное динамическое перемещение $\Delta \zeta_d = -0,25$ м.

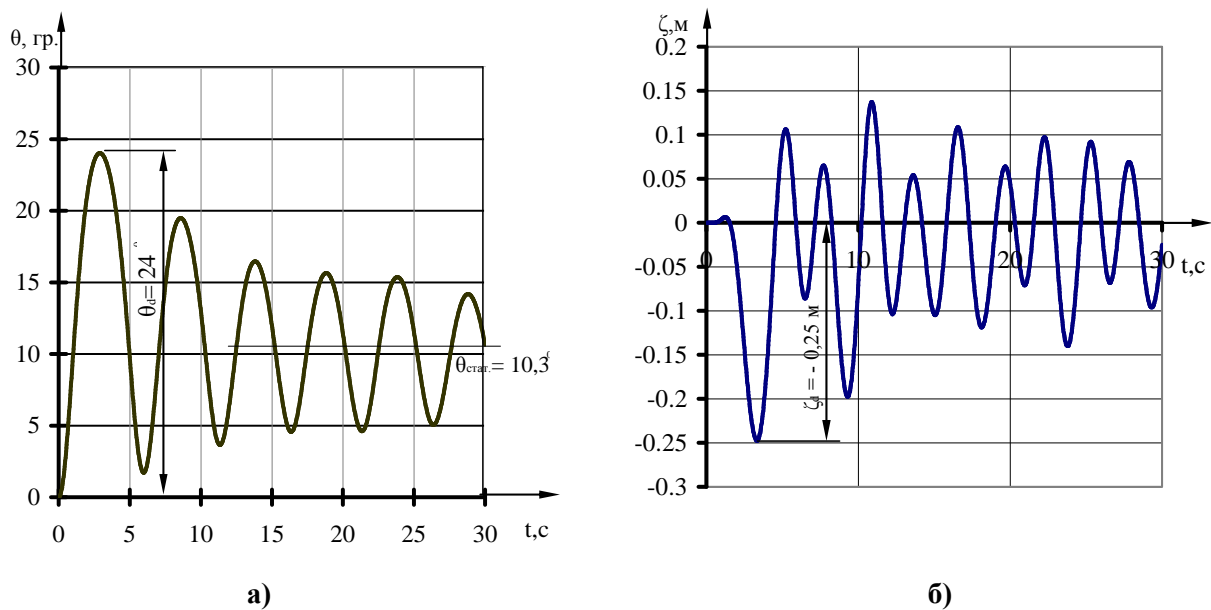


Рис. 7. Динамические характеристики движения судна (вариант корпуса 2):
а – угол крена; б – вертикальное перемещение

Результаты исследования позволяют сделать следующие выводы:

1. При динамическом изменении нагрузки судна движение корпуса судна имеет сложный характер, так как возникают побочные виды движения (при действии только кренящего момента появляется кроме крена дополнительное вертикальное перемещение).
2. Побочное вертикальное перемещение корпуса составляет опасность затопление для низкобротных судов.

Библиографический список

1. Ваганов, А.Б. Расчет плавучести и остойчивости корабля на ЭЦВМ / А.Б. Ваганов. – Горький, 1981.
2. Ваганов, А.Б. Краснокутский И.Д. Свидетельство о государственной Регистрации программы для ЭВМ, №2014612390 «Расчет гидростатических характеристик и диаграмм остойчивости судовых корпусов сложной геометрической формы при произвольной посадке».
3. Ваганов, А.Б. Конструирование теоретического корпуса судна аналитическим методом и расчет мореходных качеств на ЭВМ: учеб. пособие / А.Б. Ваганов, А.В. Васильев, В.А. Ковалев. – Горький, 1989.

4. Справочник по статике и динамике корабля. В 2 т. Т. 1. Статика корабля. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л.: Судостроение, 1976.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2014*

A. B. Vaganov¹, Nguyen Ngoc Than²

**THE DYNAMICS OF A VESSEL'S MOVEMENT AT A SUDDEN CHANGE
OF THE LOAD ON IT**

Nizhny Novgorod state technical university n. a. R. E. Alexeev¹,
Socialist Republic of Vietnam²

Purpose: Research of a vessel's movement at a sudden change of the load on it.

Method: At a sudden change of the load on a vessel, its movement is described by a system of equations by the method of "dynamics". The movement of the vessel is represented as a set of rotations around the axes through the ship's center of gravity and the displacement of the ship's center of gravity. The calculation is made by the Runge–Kutta method on IBM PC.

Results: To calculate two variations of the hull are chosen. They are low-sided and high-sided. The derived results are that at a sudden change of the load the vertical displacement of a high-sided hull is positive and a low-sided hull's is negative.

Conclusion: At a sudden change of the load on a vessel, side types of movement arise. Side vertical displacement of the hull is the risk of flooding of a low-sided vessel.

Key words: dynamics, statics, careen, difference, dynamic load, the inclination, the vertical movement.

УДК 629.01:629.561.1

В. Д. Вешуткин, А. Е. Жуков

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИИ КОРПУСА СУДНА
НА ТЕНЗОМЕТРИЧЕСКИХ МОДЕЛЯХ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведены описание и результаты экспериментального исследования характеристик вибрации корпуса буксира, находящегося на стапельных опорах, в потоконаправляющей камере, при работе двигателя и винтов с использованием тензометрических моделей.

Ключевые слова: вибрация, колебания, корпус судна, буксир, тензометрическая модель, теория размерностей, теория подобия.

При производстве буксиров крупными сериями возникает необходимость сдачи силовой установки и систем в ходовых режимах. Для организации такой работы в зимний период спроектирована потоконаправляющая камера (ПНК), позволяющая в цеховых условиях имитировать ходовые режимы судна, имеющего винты регулируемого шага (ВРШ).

В цеховых условиях судно находится на стапельных опорах, а кормовая оконечность находится в воде, залитой в ПНК. Вибрационные характеристики судна, в связи с этим, существенно отличаются от вибрационных характеристик в условиях свободного плавания судна на воде.

Данная задача является нестандартной, так как отработанной и утвержденной методики расчета характеристик вибрации для данных условий не существует. Было выполнено исследование частот колебаний судна в целом и отдельных его частей. В рамках реализации задачи для подтверждения расчетов производились, в частности, экспериментальные исследования характеристик вибрации на тензометрических моделях, описанию чего и посвящена данная работа.

Критерии подобия

Согласно теории размерностей и подобия в механике [10], для моделирования явлений вибрации корпуса судна необходимо выбрать определяющие параметры. Для рассматриваемого случая в качестве определяющих параметров выбраны:

- главные размерения судна L, B, H ;
- ускорение свободного падения g ;
- интенсивность масс m ;
- жесткость корпуса EI ;
- упор винта P ;
- диаметр винта D ;
- шаг винта H_B ;
- число лопастей винта z ;
- линейные размеры винта l_1, l_2, \dots, l_n ;
- дисковое отношение θ ;
- число оборотов винта n ;
- плотность воды ρ .

Число размерных величин из данного набора параметров равно двенадцати. Согласно π -теореме, безразмерные комбинации из этих параметров будут следующими:

$$\pi_1 = \frac{L}{B}; \quad \pi_2 = \frac{L}{H}; \quad \pi_3 = \frac{D}{H_B}; \quad \pi_4 = \frac{EI}{PL^2}; \quad \pi_5 = \frac{n^2 D}{g};$$

$$\pi_6 = \frac{P}{\rho n^2 D^4}; \quad \pi_7 = \frac{D}{L}; \quad \pi_8 = \frac{l_1}{L}; \quad \pi_9 = \frac{m}{\rho L^2}.$$

По теории подобия безразмерные комбинации природы и модели одинаковы: $\pi_{1H} = \pi_{1M}$, откуда следует $\frac{L_H}{B_H} = \frac{L_M}{B_M}$ или $\frac{L_H}{L_M} = \frac{B_H}{B_M} = \lambda$, где λ — геометрический масштаб; $\pi_{2H} = \pi_{2M}$, откуда

следует $\frac{L_H}{L_M} = \frac{H_H}{H_M} = \lambda$; $\pi_{3H} = \pi_{3M}$, откуда следует $\frac{D_H}{D_M} = \frac{H_{BH}}{H_{BM}} = \lambda$; $\pi_{4H} = \pi_{4M}$, откуда следует

$$\frac{(EI)_H}{P_H L_H^2} = \frac{(EI)_M}{P_M L_M^2} \text{ или } \frac{(EI)_H}{(EI)_M} = \frac{P_H}{P_M} \cdot \frac{L_H^2}{L_M^2}; \quad \pi_{5H} = \pi_{5M}, \text{ откуда следует } \frac{n_H^2 D_H}{g_H} = \frac{n_M^2 D_M}{g_M}, \text{ а учитывая, что}$$

$g_H = g_M$, получим $\frac{n_H^2}{n_M^2} = \frac{D_H}{D_M} \cdot \frac{g_H}{g_M} = \frac{1}{\lambda}$, значит, $\frac{n_H}{n_M} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}}$; $\pi_{6H} = \pi_{6M}$, откуда следует

$$\frac{P_H}{\rho_H n_H^2 D_H^2} = \frac{P_M}{\rho_M n_M^2 D_M^2} \text{ или } \frac{P_H}{P_M} = \frac{\rho_H}{\rho_M} \cdot \frac{n_H^2}{n_M^2} \cdot \frac{D_H^2}{D_M^2}.$$

Учитывая, что жидкостью является вода, то есть $\rho_H = \rho_M$, $\frac{P_H}{P_M} = 1 \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \lambda^4 = \lambda^3$. Тогда от-

ношение жесткостей корпуса будут равно $\frac{(EI)_H}{(EI)_M} = \lambda^3 \lambda^2 = \lambda^5$. $\pi_{7H} = \pi_{7M}$, откуда $\frac{D_H}{D_M} = \frac{L_H}{L_M} = \lambda$;

$\pi_{8H} = \pi_{8M}$, откуда $\frac{l_{1H}}{l_{1M}} = \frac{L_H}{L_M} = \lambda$; $\pi_{9H} = \pi_{9M}$, откуда $\frac{m_H}{m_M} = \frac{\rho_H}{\rho_M} \cdot \frac{L_H^2}{L_M^2} = 1 \cdot \lambda^2 = \lambda^2$;

Поскольку $\nu_H = \nu_M$ (кинематическая вязкость жидкости) одновременно удовлетворить критерию подобия по Фруду и Рейнольдсу не удастся. Однако при определенных масштабах попадаем в автомодельную область по числу Рейнольдса, то есть масштабный эффект отсутствует при $Re > Re^{kp}$, где $Re^{kp} = 3 \dots 5 \cdot 10^5$.

Правильность выбранных масштабов проверяем на удовлетворение условий кинематического и динамического подобия, которые соблюдаются при выполнении следующих безразмерных критериев [10, 12]:

- числа Струхала

$$Sh = T v / L; \tag{1}$$

- числа Фруда

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gL}}; \tag{2}$$

- критерий Коши

$$Co = \frac{EI \tau^2}{\rho_k L^6}, \tag{3}$$

где T – характерное время; v – скорость в сходственных точках.

Очевидно, что масштаб времени равен $\frac{T_H}{T_M} = \frac{n_H}{n_M} = \sqrt{\lambda}$, а масштаб скорости

$$\frac{v_H}{v_M} = \frac{L_H n_H}{L_M n_M} = \lambda \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = \sqrt{\lambda}.$$

Тогда $\frac{Sh_H}{Sh_M} = \frac{T_H \cdot v_H \cdot L_M}{T_M \cdot v_M \cdot L_H} = \sqrt{\lambda} \sqrt{\lambda} \frac{1}{\lambda} = 1$, т. е. критерий Струхала выполнен, и

$$\frac{Fr_H}{Fr_M} = \frac{v_H \sqrt{g_M} \sqrt{L_M}}{v_M \sqrt{g_H} \sqrt{L_H}} = \sqrt{\lambda} \cdot 1 \cdot \frac{1}{\sqrt{\lambda}} = 1 \text{ — критерий Фруда выполнен.}$$

Критерии Коши будет выполнен при условии $\rho_{KM} = \rho_{KH}$.

Плотность материала корпуса вместе с массами, связанными с корпусом, будет равна

$$\rho_K = k \frac{mL}{LBH\delta}, \text{ тогда}$$

$$\frac{\rho_{KH}}{\rho_{KM}} = \frac{k_H}{k_M} \frac{m_H}{m_M} \frac{B_M}{B_H} \frac{H_M}{H_H} \frac{\delta_M}{\delta_H}. \tag{4}$$

В последнем выражении $k_H = k_M$ — коэффициент распределения погонной массы; $\delta_H = \delta_M$ — коэффициент общей полноты.

Тогда $\frac{\rho_{KH}}{\rho_{KM}} = 1 \cdot \lambda^2 \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot \frac{1}{\lambda} \cdot 1 = 1$, то есть критерий Коши также выполняется.

На основе полученных зависимостей можно записать масштабы основных моделируемых величин, которые приведены в табл. 1.

Таблица 1

Масштабы основных моделируемых величин

Наименование величины	Обозначение	Масштаб
Главные размерения	L, B, H	λ
Ускорение	a, g	1
Интенсивность массы	m	λ^2
Масса	$M = m L$	λ^3
Жесткость корпуса	EI	λ^5
Усилия, упор винтов	P	λ^3
Плотность воды	ρ	1
Диаметр винта	D	λ
Шаг винта	H_B	λ
Число лопастей	z	1
Линейные размеры, определяющие геометрию винта	l_1, l_2, \dots, l_n	λ
Дисковое отношение	θ	1
Число оборотов	n	$1/\lambda^{1/2}$
Время	T	$\lambda^{1/2}$
Скорость	v	$\lambda^{1/2}$
Период колебаний	τ_K	$\lambda^{1/2}$
Частота колебаний	ω_K	$1/\lambda^{1/2}$

Выбор материала и масштаба модели

На выбор материала модели оказывают влияние многие факторы. Одним из наиболее важных является возможность проведения на модели инструментальных измерений. В качестве материала моделей сложных конструкций наибольшее распространение получили жель и органическое стекло [1, 7]. Поскольку в данной работе необходимо определить вибрационные характеристики конструкций буксира и дополнительные усилия на ступельные опоры, то наиболее удобным материалом для моделей при деформациях в упругой зоне является органическое стекло.

На выбор масштаба модели влияют масштабные эффекты и условие автомодельности по числу Рейнольдса. Для гидромеханических процессов, согласно работам [11, 12], должны соблюдаться условия:

$$\text{Re} \gg \text{Sh}; \text{Re} \gg \text{Fr}; \text{We} \gg 1/\text{Sh}; \text{We} \ll 1/\text{Fr}^2, \quad (5)$$

где We – число Вебера.

Эти неравенства теряют силу при масштабе модели 1/100 и менее, поэтому

$$\lambda = \frac{L_{\text{н}}}{L_{\text{м}}} = \frac{B_{\text{н}}}{B_{\text{м}}} = \frac{H_{\text{н}}}{H_{\text{м}}} \ll 100. \quad (6)$$

Учитывая изложенное, выбираем геометрический масштаб модели $\lambda = 16$.

Для исследования прочности конструкций успешно применяются условно конструктивно подобные модели [7]. В этом случае вводится еще масштаб толщин листовых конструкций $\tau = t_{\text{н}}/t_{\text{м}}$. При выбранном материале модели масштаб модулей нормальной упругости величина определенная:

$$\varepsilon = E_{\text{н}}/E_{\text{м}}. \quad (7)$$

Тогда можно записать

$$\frac{(EI)_{\text{н}}}{(EI)_{\text{м}}} = \lambda^5 = \varepsilon \frac{I_{\text{н}}}{I_{\text{м}}}. \quad (8)$$

Как известно из [7], масштаб моментов инерции поперечного сечения равен (для условно конструктивно подобной модели): $I_{\text{н}}/I_{\text{м}} = \lambda^3 \tau$, тогда $\varepsilon \lambda^3 \tau = \lambda^5$ и

$$\tau = \lambda^2/\varepsilon. \quad (9)$$

Подставляя числовые значения для $\lambda = 16$ и, $\varepsilon = \frac{2 \cdot 10^5 \text{ МПа}}{3,1 \cdot 10^3 \text{ МПа}} = 65$, получим значение

$\tau = 4$.

Основные размеры и характеристики модели буксира и ПНК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные размеры и характеристики модели буксира и ПНК

Наименование величин	Обозначение	Единица измерения	Значение	
			Натура	Модель
Длина судна	L	м	28,2	1,76
Ширина судна (по КВЛ)	B	м	8,2	0,512
Высота борта	H	м	4,3	0,27
Масса	M	кг	364000	89
Упор винта	P	кгс	6120	1,49
Диаметр винта	D	мм	1800	112
Мощность	N	вт	2×588000	2×36
Шпация	a	мм	600	37,5
Частота вращения винта	$n_{\text{в}}$	об/мин	300	1200
Частота вращения коленвала двигателя	$n_{\text{дв}}$	об/мин	500	2000
Толщина палубного настила	$t_{\text{п}}$	мм	6,0	1,5
Толщина обшивки борта	$t_{\text{б}}$	мм	12,0	3,0
Толщина обшивки днища	$t_{\text{дн}}$	мм	9,0	2,0
Длина ПНК	$L_{\text{ПНК}}$	м	9,4	0,588
Ширина ПНК	$B_{\text{ПНК}}$	м	9,45	0,590
Высота борта ПНК	$H_{\text{ПНК}}$	м	4,00	0,250
Шпация ПНК	$a_{\text{ПНК}}$	м	400	25
Толщина днища ПНК	$t_{\text{д}}$	мм	8,0	2,0
Толщина борта ПНК	$t_{\text{бор.}}$	мм	10,0	2,5
Толщина палубы ПНК	$t_{\text{пал.}}$	мм	8,0	2,0

Конструкция модели буксира и ПНК

Конструкция модели буксира

Форма корпуса модели несколько упрощена по сравнению с моторным судном. Форма поверхности днища кормовой оконечности сохранена подобной натурному корпусу, так как в этом районе моделируется движение жидкости в ПНК. Форма корпуса модели буксира показана на рис. 1. Сохранение распределения моментов инерции поперечных сечений по длине корпуса являлась основным при упрощении формы корпуса модели.

В корпусе модели воспроизведены практически все связи судового корпуса, то есть флоры, днищевые стрингеры, платформы с набором, продольные переборки с набором, шпангоуты холостые и рамные, бортовые стрингеры, бимсы холостые и рамные, карлингсы, фальшборты. Надстройка не моделировалась. Весь поперечный и продольный набор корпуса моделировался по площади поперечного сечения и моменту инерции, то есть

$$F_M = F_H / \lambda \tau, \quad (10)$$

$$I_M = I_H / \lambda^3 \tau. \quad (11)$$

Тавровый и прокатный профили натурального судна заменялись на полосу с соблюдением условий (10) и (11).

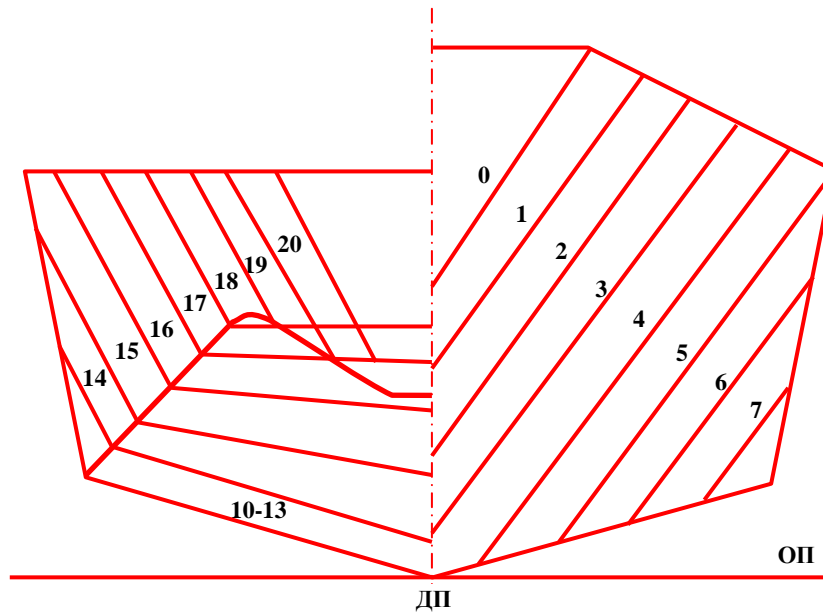


Рис. 1. Форма корпуса модели буксира

Конструкция винтов и привода к ним

Для воспроизведения в модели нагрузок, возникающих при работе натуральных винтов в ПНК, необходимо моделирование формы винтов и их характеристик. Для заданного режима работы натуральных ВРШ были изготовлены подобные модельные винты фиксированного шага. Винты были изготовлены из органического стекла в масштабе $\lambda=16$. Изгибная и крутильная жесткость валопровода не моделировалась. Привод валопроводов осуществлялся от электромоторов постоянного тока через угловые конические редукторы с передаточным отношением $i = 1/5,7$.

Конструкция модели ПНК

Форма модели ПНК полностью соответствовала натуре. В корпусе ПНК был воспроизведен весь набор, который устанавливался на натурном судне. Тавровый и прокатный набор заменялся в модели на полосу на основе уравнений (10) и (11).

Методика экспериментального исследования

Испытание модели буксира и ПНК проводилась на сборочном стапеле в лаборатории тензометрических моделей. Модель устанавливалась на стапельные опоры. Стапельные опоры моделировались по изгибной жесткости их вертикальных элементов. Моделирование деревянных подушек и деревянные клинья осуществлялось с помощью резиновых прокладок толщиной 10 мм. Площадь прокладки выбиралась из условия моделирования вертикальной жесткости каждой стапельной опоры.

На разных этапах испытания моделировалась работа двух винтов буксира в условиях ПНК и работа одного дизеля на действие пульсирующего крутящего момента.

Испытания модели при работе винтов

Испытания выполнялись для трех вариантов крепления корпуса буксира с ПНК.

1. Соединение корпуса буксира с корпусом ПНК было выполнено только на 32 шпангоуте с помощью соединительного водонепроницаемого комингса.

2. К первому варианту добавлена кормовая опора на 47 шпангоуте, которая имитировала кормовой домкрат ПНК.

3. К первым двум вариантам добавлялось дополнительное соединение с камерой в сечении по 41 шпангоуту.

Для каждого конструктивного варианта закрепления кормы испытания проводились при числе оборотов валов $n = 1200$ об/мин, что соответствовало $n = 300$ об/мин натурального судна.

Число оборотов валов контролировалось строботаксометром. Привод осуществлялся от электродвигателя постоянного тока через конический угловой редуктор.

При испытаниях регистрировались вертикальные и горизонтальные ускорения в точках установки датчиков. Нагрузка масс модели соответствовала ступенчатой эпюре для натурального судна. Ординаты ступенчатой эпюры пересчитывались с натурной эпюры по формуле

$$m_m = m_n / \lambda^3. \quad (11)$$

Массы дополнительных грузов, устанавливаемых на модель, определялись как разность между требуемой массой, определяемой по формуле (11) и массой корпуса модели и устанавливаемого на нее оборудования, приходящейся на данную шпацию. Все дополнительные груза были распределены по практическим шпациям. Дополнительные грузы имели цилиндрическую форму, величина груза определялась взвешиванием. Материалом грузов являлись латунь и свинец. К корпусу модели грузы крепились болтом в одной точке.

Испытания модели при действии пульсирующего крутящего момента

Амплитуда пульсаций момента в модельном эксперименте составляла $M = 2,08$ кг·см при числе оборотов $n = 8000$ об/мин, что соответствовало в натуре четырем пульсациям момента за один оборот коленчатого вала. Амплитуда пульсаций момента в натурном судне была задана заказчиком (136,5 тс·см). Число оборотов коленчатого вала дизеля = 5000 об/мин. Пульсирующий момент создавался специально сконструированной установкой с вращающимися эксцентрически расположенными массами. Распределение масс по длине и ширине модели одинаковое с первым этапом испытаний. На этом этапе испытаний записывались сигналы с датчика ускорений. Число оборотов вала электродвигателя ($n = 8000$ об/мин) контролировалось строботаксометром.

Аппаратура и обработка результатов измерений

Измерение ускорений

Для измерения ускорения использовались датчики ускорений ДУ-50 и виброизмерительная аппаратура ВИ-6-6 ТН. Схема установки датчиков на модели приведена на общей схеме расположения датчиков (рис. 2). Сигналы с датчиков передавались на компьютер посредством аналого-цифрового преобразователя (АЦП), где фиксировались в специальной программе обработки сигналов АЦП.

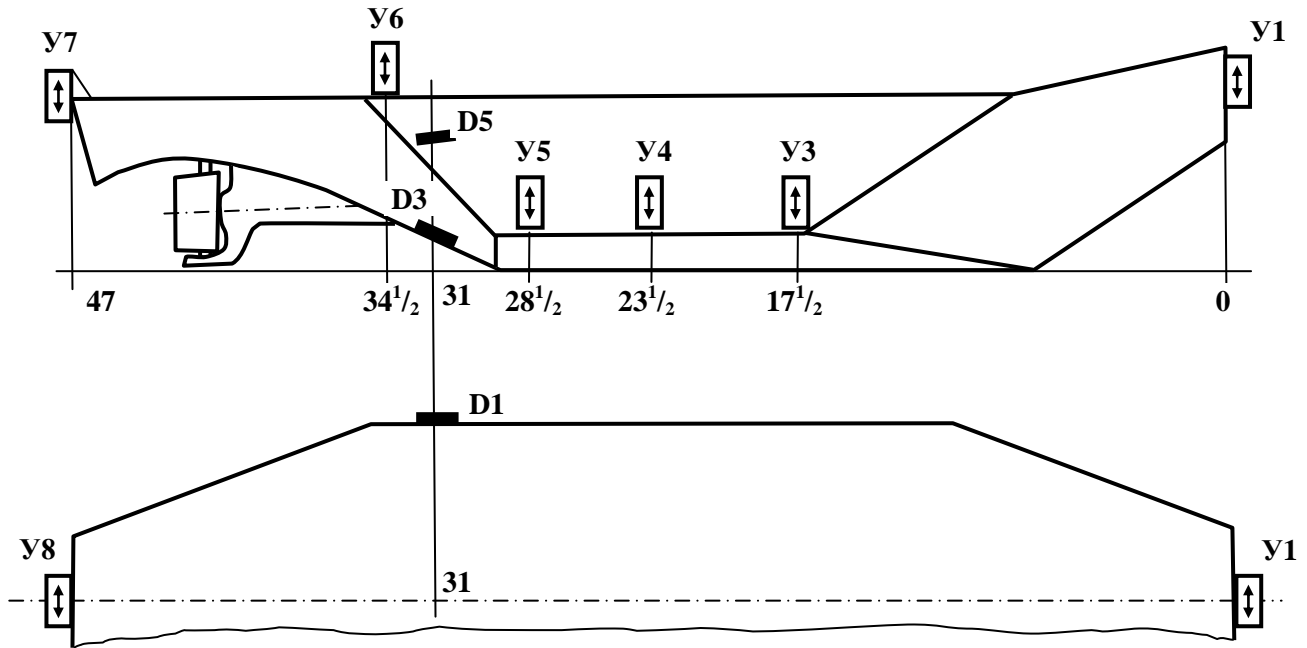


Рис. 2. Схема расположения датчиков на корпусе модели:

☒ — датчик ускорений (стрелками показано направление измеряемого ускорения);

— тензодатчики для измерения деформаций

Измерение деформаций

Измерение деформаций корпуса модели буксира выполнялось с помощью проволочных тензорезисторов с базой 13 мм и начальным сопротивлением $R_0=120$ Ом. Тензодатчики включались в электрическую измерительную схему в виде моста Уинстона. Измерения проводились по методу разбаланса моста (метод непосредственной оценки). Датчики наклеивались на очищенную и обезжиренную поверхность корпуса модели. Для усиления мощности сигнала разбаланса мостов использовался четырехканальный усилитель ТА-5. Усиленные сигналы мостовых схем передавались на компьютер посредством АЦП.

Деформации в корпусе модели определялись по формуле

$$\varepsilon = \frac{2}{S} \varepsilon_n \frac{A}{A_T} \cong 0,25 \cdot 10^{-3} \frac{A}{A_T},$$

где $S = 2,05$ — коэффициент тензочувствительности датчика;

$\varepsilon_n = 0,25 \cdot 10^{-3}$ — тарировочная относительная деформация прибора;

A — амплитуда записи, мм;

A_T — тарировочное отклонение, мм.

Результаты экспериментального исследования

В результате испытаний тензометрической модели буксира получены осциллограммы ускорений и деформаций корпусных конструкций в различных поперечных сечениях корпуса. Амплитудные значения ускорений и деформаций для различных этапов испытаний приведены в табл. 4. Обозначения этапов приведены в табл. 3.

Из анализа табл. 4 видно, что закрепление корпуса на 41 шпангоуте в дополнение к кормовому домкрату, увеличивает действующие ускорения в поперечных сечениях корпуса. Установка только кормового домкрата снижает ускорения в оконечностях по сравнению с незакрепленной кормой. Наибольшая величина ускорения получена для варианта закрепления на 41 шпангоуте и кормовым домкратом и равна $7,48 \text{ м/с}^2$. Для варианта с кормовым домкратом наибольшее ускорение при расчетном режиме составляет 6,67, при высоте налива воды в ПНК 3,44 м. При увеличении высоты налива воды в ПНК (осадки судна) до 3,7 м максимальная величина действующего ускорения снижается до $5,29 \text{ м/с}^2$. Для варианта незакрепленной кормой наибольшие ускорения достигают величины $6,56 \text{ м/с}^2$.

Величины перемещений корпуса относительно положения статического равновесия в местах установки датчиков ускорений для натурального корпуса буксира, полученные в результате пересчета, приведены в табл. 5, а также приведены величины амплитуд действующих динамических усилий на опорные конструкции для натурального судна. Наибольшее усилие 50 кН получено для варианта с дополнительным креплением корпуса к ПНК на 41 шпангоуте. Для варианта с кормовой опорой наибольшее усилие составляет 38,4 кН.

Таблица 3

Обозначение этапов испытаний

Этап	Нагрузка	Конструктивный вариант закрепления	Частота вращения		Уровень воды в ПНК	
			Модель	Натура	Модель, мм	Натура, м
I	Работа двух винтов	Корма не закреплена	1200	300	215	3,44
II	Работа дизеля	Корма не закреплена	8000	4×500=2000	215	3,44
III	Работа двух винтов	Корма закреплена на 46 ^{1/2} шп.	1200	300	215	3,44
IV	Работа двух винтов	Корма закреплена на 46 ^{1/2} шп.	1200	300	231	3,70
V	Работа двух винтов	Корма закреплена на 41 и 46 ^{1/2} шп.	1200	300	231	3,70
VI*	Вибромашина на шп.37	Корма не закреплена	0...16000	—	215	3,44
VII*	Вибромашина на шп.2	Корма не закреплена	0...16000	—	215	3,44

Примечание: * Этапы выполнены для определения собственных частот

Таблица 4

Результаты испытаний модели

Этап	Амплитуды ускорений, м/с^2								Амплитуды деформаций, $\epsilon \times 10^6$		
	У1	У2	У3	У4	У5	У6	У7	У8	D1	D2	D3
I	—	5,40	3,70	4,57	5,74	6,56	5,51	—	7,5	0,89	31,2
II	—	0,75	1,42	1,70	1,17	0,39	0,29	—	0	0	0
III	2,65	3,00	3,38	2,8	5,36	6,67	2,43	4,44	6,25	2,23	26,2
IV	3,35	3,30	3,38	3,69	5,1	5,29	3,40	3,88	7,5	2,23	31,2
V	4,18	4,50	5,15	5,05	4,34	7,48	7,45	4,00	6,25	4,46	24,6

Таблица 5

Результаты пересчета с модели на натурное судно

Этап	Амплитуды ускорений, мм								Амплитуды деформаций, кН		
	У1	У2	У3	У4	У5	У6	У7	У8	Д1	Д2	Д3
I	—	0,130	0,092	0,110	0,140	0,160	0,140	—	17,4	44,0	25,2
II	—	0,020	0,037	0,044	0,030	0,010	0,008	—	7,0	17,6	5,4
III	0,064	0,072	0,082	0,068	0,129	0,161	0,059	0,107	15,5	27,2	23,2
IV	0,088	0,086	0,088	0,096	0,133	0,138	0,039	0,102	16,6	38,4	23,9
V	0,104	0,112	0,128	0,125	0,108	0,186	0,186	0,100	24,2	50,0	19,4

Библиографический список

1. Архангородский, А. Г. Моделирование прочности судовых конструкций / А. Г. Архангородский, Л. М. Беленький. – Л.: Судостроение, 1969. – 222 с.
2. Давыдов, В. В. Динамический расчет прочности судовых конструкций / В. В. Давыдов, Н. В. Маттес. – Л.: Судостроение, 1974. – 336 с.
3. Дорогостайский, Д. В. Теория и устройство судна / Д. В. Дорогостайский, М. М. Жученко, Н. Я. Мальцев. – Л.: Судостроение, 1976. – 413 с.
4. Козлов, В. И. Судовые энергетические установки / В. И. Козлов, П. И. Титов, Ф. Л. Юдицкий. – Л.: Судостроение, 1969.
5. Курдюмов, А. А. Прочность корабля / А. А. Курдюмов. – Л.: Судпромгиз, 1956. – 384 с.
6. Курдюмов, А. А. Вибрация корабля / А. А. Курдюмов. – Л.: Судпромгиз, 1961.
7. Перлин, А. А. Исследование прочности судовых конструкций на металлических моделях / А. А. Перлин, М. К. Шалкин, Ю. К. Хрящев. – Л.: Судостроение, 1967. – 80 с.
8. Постнов, В. А. Вибрация корабля: учебник / В. А. Постнов, В. С. Калинин, Д. М. Ростовцев. – Л.: Судостроение, 1983. – 248 с.
9. Прочность судов внутреннего плавания: справочник / В. В. Давыдов [и др.]. – М.: Транспорт, 1978. – 520 с.
10. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1987. – 432 с.
11. Холодилин, А. Н. Моделирование мореходных качеств судов в опытовых бассейнах // А. Н. Холодилин / Сб. научн. тр. НТО Судпрома. – Л.: Судостроение, 1972. Вып. 173. С. 110–114.
12. Эпштейн, Л. А. Методы теории размерностей и подобия в задачах гидромеханики судов / Л. А. Эпштейн. – Л.: Судостроение, 1970. – 208 с.

Дата поступления
в редакцию 01.07.2014

V. D. Veshutkin, A. E. Zhukov

THE EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE VIBRATION OF THE SHIP'S HULL ON STRAIN GAUGE MODELS

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

Objective: Experimental investigation of the characteristics of the vibration of the hull of the tugboat, located on the building berth supports under the load of the engine and propeller screws, with the use of strain-gauge models.

Methodology/Approach: The theories of similarity and dimensions are used. The strain-gauge model for research was made of plexiglas

Results: As a result of tug model tests received graphics acceleration and deformations of hull structures in various cross sections of the body.

Key words: vibration, vibration, the hull of the vessel, tug, strain model, the theory of dimensions, the theory of similarity.

УДК 623.454.2:544.454.3:534.1

С. И. Герасимов, В.А. Кузьмин

**К ПРОБЛЕМЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ МЕХАНИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСА
РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ
НА КРУПНОМАСШТАБНЫЕ ТОНКОСТЕННЫЕ КОНСТРУКЦИИ**

РФЯЦ-ВНИИЭФ, г. Саров

Приведен анализ состояния проблемы моделирования механического действия импульса рентгеновского излучения (РИ) на тонкостенные конструкции, а также представлены некоторые результаты численного моделирования поведения цилиндрической оболочки при действии характерной для механического импульса РИ нагрузки.

Ключевые слова: механический импульс, рентгеновское излучение, высокоинтенсивное излучение, экспериментальное моделирование, взрывчатое вещество, светочувствительное взрывчатое вещество.

При создании современной техники большое внимание уделяется исследованию процессов, протекающих при воздействии высокоинтенсивных потоков энергии на вещество: рентгеновское излучение (РИ), мощное электромагнитное излучение оптического диапазона (лазер), потоки заряженных частиц. Наибольший практический интерес представляет воздействие РИ.

Одним из основных поражающих факторов РИ при облучении какого-либо объекта является механическое воздействие на этот объект [1]. Механическое воздействие (механический импульс) пропорционально количеству поглощенной материалом энергии (энергии сублимации).

В практической деятельности воздействие рентгеновского излучения, например на летательные аппараты, имеет место при ядерном взрыве в космосе, или в установках, эксплуатация которых связана с импульсными потоками излучений [2]. Методология и математическое описание процесса формирования импульса давления на поверхности облучаемого материала сформулированы в середине XX века [3].

Физический механизм возникновения механического импульса при действии высокоинтенсивного излучения также хорошо изучен как в лабораторных условиях на малых моделях, так и при проведении полномасштабных опытов в период разрешенных подземных ядерных испытаний.

Энергия высокоинтенсивного излучения поглощается тонким поверхностным слоем облучаемого материала. В массе поглощенного слоя возникают высокие плотности энергии, значительно превышающие энергию сублимации. В результате этого облучаемое вещество почти мгновенно разогревается до степени перехода в газообразное, сублимированное, состояние. Вследствие этого в слое материала развиваются высокие давления, достигающие нескольких тысяч атмосфер. Происходит быстрый разлет сублимированного вещества со свободной поверхности и образование ударной волны, распространяющейся вглубь холодного материала. Всей конструкции сообщается механический импульс отдачи, численно равный интегралу $\int p(t)dt$, где $p(t)$ – давление, действующее на границу раздела твердого и сублимированного веществ.

Удельный импульс при падении излучения по нормали к поверхности (J_0) вычисляется по известным значениям поглощенной энергии сублимации материала. Угловое распределение удельного импульса дается выражением

$$J = J_0 \cos(\varphi), \quad (1)$$

где φ - угол между направлением потока излучения и нормалью к облучаемой поверхности. Значение импульса, созданного разлетом сублимированного вещества, может увеличиться из-за возможных отколов вблизи границы с сублимированной частью материала. В этом случае большую часть суммарного механического импульса, сообщенного материалу, составляет импульс отдачи разлета откольных слоев. Характерное время действия импульса равно времени распространения волны разрежения от свободной поверхности до поверхности откола и составляет несколько десятых микросекунды [2].

Основным методом исследования поведения элементов конструкций при действии механического импульса на данный момент является проведение испытаний полномасштабных образцов при нестационарном нагружении устройствами воспроизведения механического действия высокоинтенсивных излучений.

Существующие методы и установки для исследования и моделирования действия высокоинтенсивных потоков излучения разделяют на три группы:

- для генерации высокоэнергетического излучения;
- моделирования действия высокоэнергетического излучения импульсными пучками частиц;
- газодинамические методы моделирования механического действия высокоэнергетического излучения.

К первой группе относятся установки для генерации мощных потоков излучения с использованием высокотемпературной плазмы.

Ко второй группе относятся генераторы мощных пучков частиц, преимущественно электронов.

Достаточно подробно лабораторные установки и комплексы рассмотрены в работах [4, 5].

Экспериментальные исследования стойкости полномасштабных конструкций к воздействию механического импульса, являющегося результатом действия мощного высокоэнергетического излучения с использованием методов и установок первой и второй групп, не представляются возможным в связи с отсутствием соответствующих лабораторных источников излучения, способных генерировать необходимые плотности на поверхностях с размерами порядка нескольких метров.

Наиболее удобными для реализации на испытательных площадках являются методы и установки третьей группы.

К этой группе относятся методы и установки, в которых нагружение конструкции осуществляется ударной волной от взрыва заряда взрывчатого вещества (ВВ) или электро-взрыва проводников.

К одному из способов создания импульсной нагрузки третьей группы относится метод скользящей детонации тонкого листового ВВ. Основные его достоинства - относительная простота, возможность нагружения поверхностей с большой площадью и испытания в полигонных условиях конструкций сложной формы. Энергетические и геометрические параметры ВВ позволяют изменять амплитуды и длительности нагрузок в широких пределах и независимо друг от друга. Помимо задания геометрии и использования различных ВВ, на характер импульса нагрузки влияют способы и временная последовательность детонирования, а также механические свойства прокладок между зарядом и испытываемыми элементами конструкций. Длительность импульса при газодинамическом методе может варьироваться в интервале $10^{-6} \dots 10^{-3}$ с, а импульс давления – $0,5 \dots 5$ кПа·с.

Наряду с очевидными преимуществами, данный метод имеет и существенные недостатки. Для испытаний многих конструкций требуется создание импульса меньшего, чем при скользящей детонации слоя пластического ВВ минимальной толщины (порядка 0,5 мм). С этой целью применяются перфорированные листы ВВ, в которых удельная масса ВВ уменьшается за счет равномерно расположенных отверстий как показано на рис. 1.

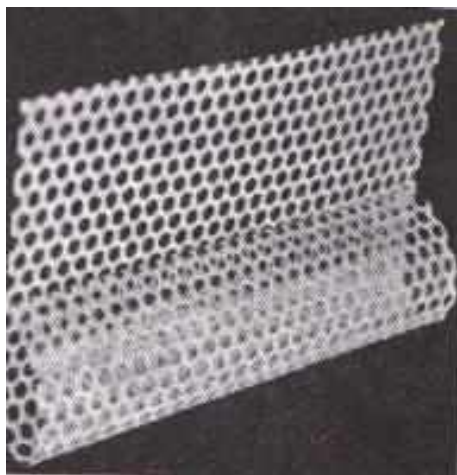


Рис. 1. Перфорированный лист ВВ

Выбранный диаметр отверстий и схема их расположения позволяют уменьшить удельную массу ВВ (и соответственно механический импульс). При одноточечном инициировании ВВ существует разновременность приложения нагрузки (10-100 мкс) по поверхности объектов с характерным размером 0,1 -1 м, а также возникают трудности организации детонации по всей поверхности, прерывание детонации в листовом ВВ из-за уменьшения толщины до критической величины, при которой детонация не происходит. Подобное нагружение существенно влияет на картину деформирования оболочечных конструкций.

Дальнейшее совершенствование газодинамического (взрывного) метода воспроизведения механического действия высокоинтенсивного излучения связано с решением вопроса о малых уровнях воздействия. Необходима разработка методик формирования малых и сверхмалых импульсов давления.

Для этих целей некоторыми исследователями [8] предложено использовать сверхтонкие листовые ВВ, полученные с использованием метода термовакуумного напыления. Критическая толщина слоя, при которой возможна детонация, составляет 50-80 мкм. Это почти на порядок ниже, чем у штатных пластичных ВВ, минимальная толщина которых составляет 0,3-0,4 мм. Такое ВВ позволяет расширить диапазон воспроизводимых импульсов давления от 10 до 100 Па·с, создать метод воспроизведения механического действия сверхмалых импульсов давления. Однако технология получения такого ВВ и подготовка образцов для испытаний очень сложна.

Рассмотрев изложенные выше методы моделирования механического воздействия на конструкции высокоинтенсивного излучения, перечислив их достоинства и недостатки, можно сформулировать требования к универсальному методу испытаний современной техники на действие РИ: относительная простота, возможность одновременного нагружения поверхностей с большой площадью и испытания в полигонных условиях конструкций сложной формы, обеспечение высокой точности измерения необходимых параметров, защита электрооборудования от воздействия электромагнитных наводок, обеспечение широты диапазона на уровней прикладываемых нагрузок, кратковременность приложения нагрузки. Важнейшими из этих требований являются кратковременность и одновременность.

Для создания механического импульса малой амплитуды и меньшей по сравнению с зарядом пластичного ВВ длительностью на поверхностях большой площади предлагается контактный светодетонирующий заряд, выполненный из тонкого слоя светочувствительного ВВ (СВВ) [1, 12]. Этот способ удовлетворяет всем перечисленным выше требованиям.

В Сандийской лаборатории еще в 60–70-х годах прошлого века была создана установка LINE (Ligh-Initiated High Explosive) для моделирования импульсного механического воздействия высокоинтенсивного излучения на образцы военной техники [13, 14].

Светочувствительное взрывчатое вещество SASN (ацетиленид-нитрат серебра) напы-

лялось непосредственно на поверхность испытываемой конструкции. Инициирование происходило в результате светового импульса электровзрыва массива тонких вольфрамовых проводников. Работа этой установки усовершенствована и возобновлена в настоящее время [15].

Примеры испытаний на установке LINE приведены на рис. 2. Из отечественных светочувствительных взрывчатых составов известны составы на основе перхлората ртути, перхлората меди и гексаметиленпероксиддиамин [16]. Свойства этих ВВ исследованы с различных сторон и в полной мере и опубликованы. Существуют также работы с описанием возможностей создания на основе СВВ портативных взрывных установок и прежде всего лазерных светодетонаторов [12, 16–17].

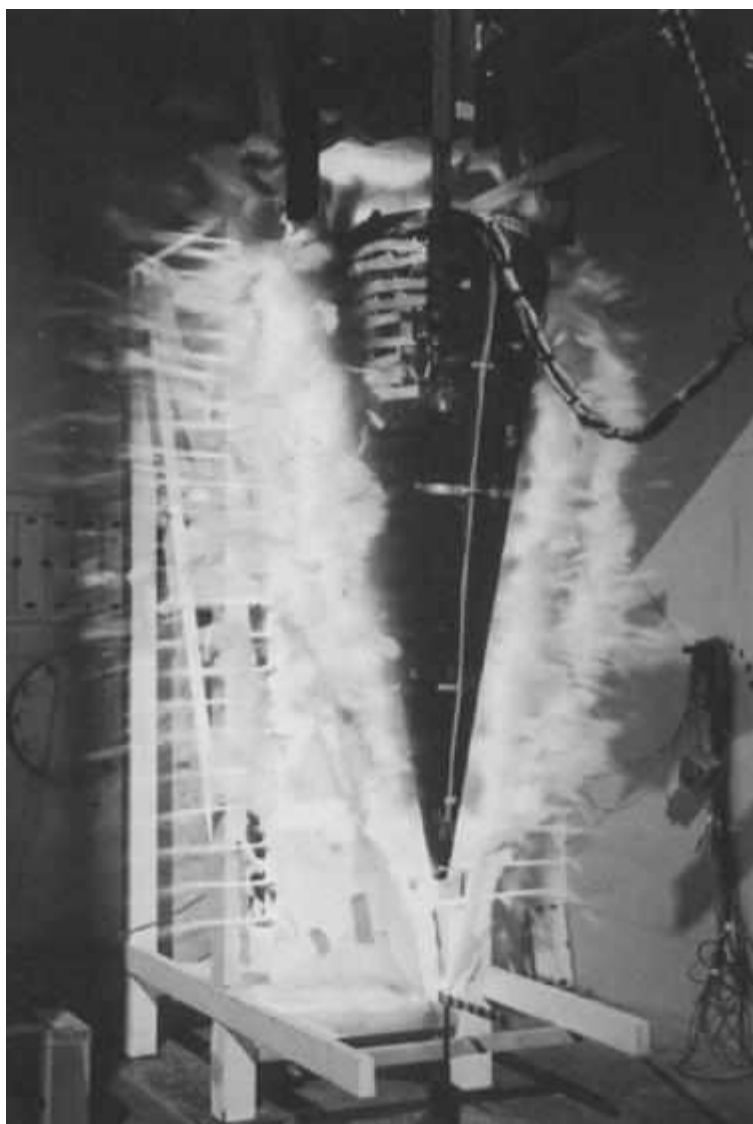


Рис. 2. Проведение испытаний головной части на установке LINE в Сандийской лаборатории

Аномально высокая чувствительность перечисленных ВВ к воздействию мощных источников излучения оптического диапазона (лазеры, импульсные источники света) дает возможность осуществлять испытания натуральных конструкций в полигонных условиях, обеспечивает одновременную детонацию по всей поверхности ВВ на большой площади, обеспечивает низкие уровни импульсного воздействия, короткой длительности.

Для иллюстрации того, насколько сильно влияет способ генерации механического импульса на динамику конструкции, далее приведено численное решение для цилиндриче-

ской оболочки. Рассмотрены два случая приложения нагрузки: последовательное, которое имеет место в методе скользящей детонации при односточечном инициировании, и одновременное, в случае использования СВВ.

Нагружение осуществляется по образующей линии.

Геометрия задачи показана на рис. 3.

Материал конструкции – сплав АМг6. Характеристики сплава приведены в табл. 1.

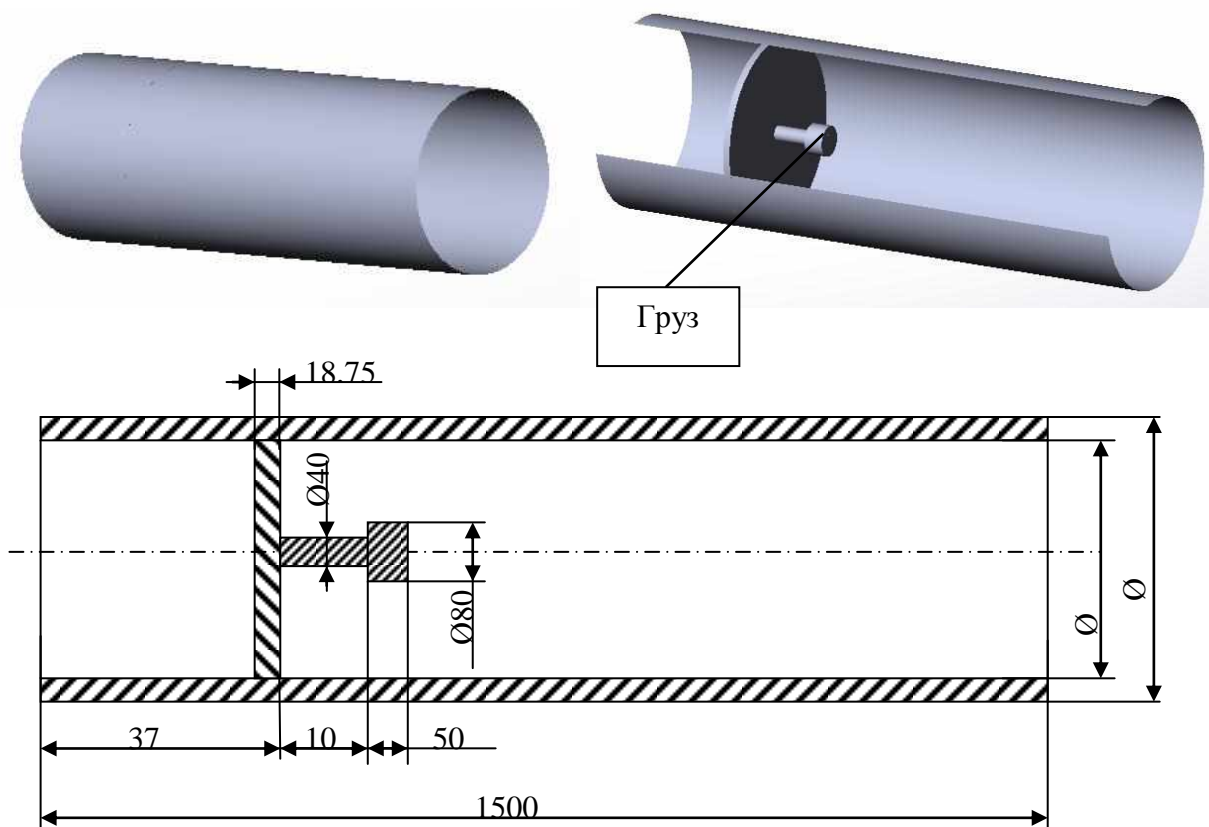


Рис. 3. Геометрия задачи

Таблица 1

Характеристики сплава АМг6

Характеристика	Значение
Плотность, кг/м ³	2700
Модуль упругости, МПа	68000
Коэффициент Пуассона	0,3
Предел текучести, МПа	160

Постановка задачи исследования

Граничные условия - шарнирное закрепление торцов трубы.

Рассматривается два случая приложения нагрузки.

Случай 1

В каждый узел нагрузка в виде сосредоточенной силы прикладывается в определенный момент времени. Приложение нагрузки осуществляется последовательно по линии, как показано на рис. 4. В момент времени $t=0$ прикладывается сила в т. О. Момент времени приложения силы в точках А и А' определяется из соотношения $t = \frac{\Delta X}{D}$, где ΔX - расстояние от

т.О до точек A и A' , D - скорость распространения воздействия. И так для каждой точки последовательно. В задаче принято $D = 6000$ м/с (такая скорость характерна для детонации ВВ). График изменения силы показан на рис. 5.

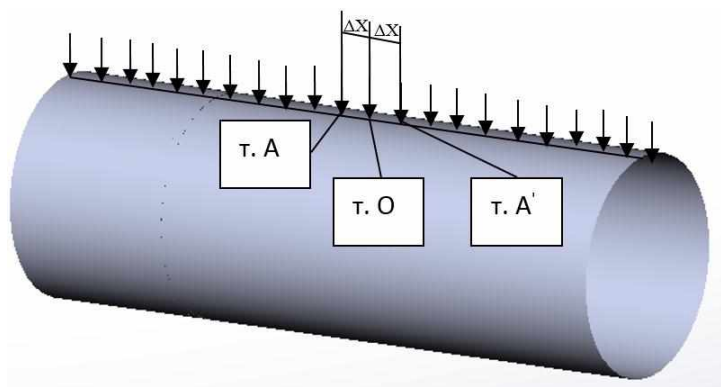


Рис. 4. Оболочечная конструкция, используемая для численного моделирования

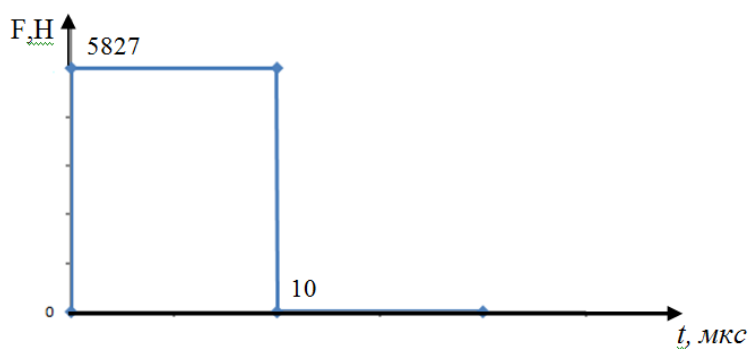


Рис. 5. Зависимость возбуждаемой силы (F, H) от времени ($t, \text{мкс}$)

Случай 2

Нагрузка прикладывается в каждый узел вдоль линии одновременно в момент времени $t=0$.

График изменения силы показан на рис. 5.

В результате численного решения задачи получены графики изменения ускорения груза, который показан на рис. 3, во времени. Графики приведены на рис. 6.

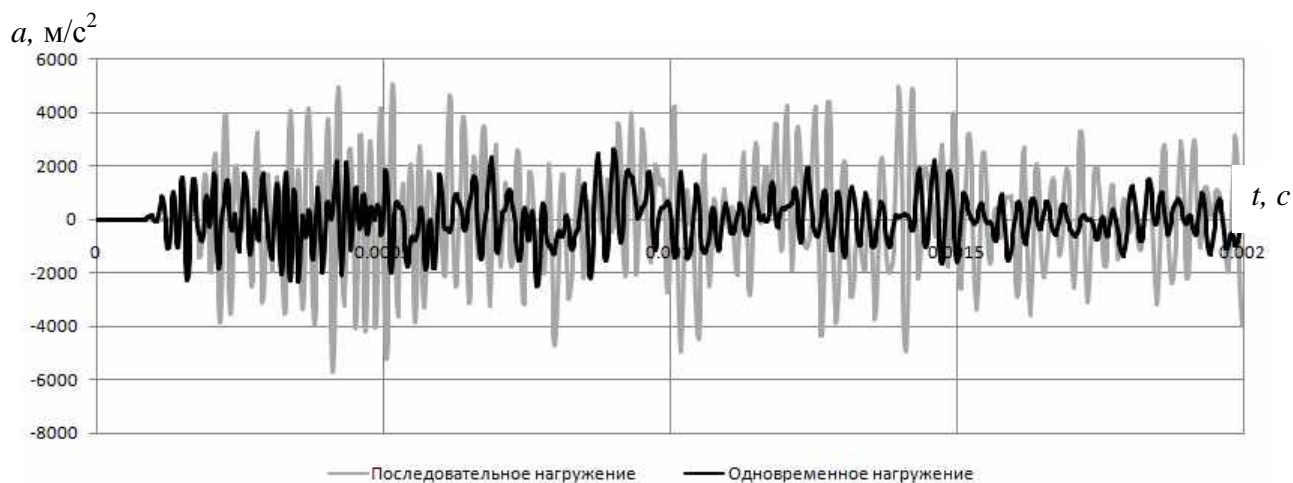


Рис. 6. Зависимость ускорения ($a, \text{м/с}^2$) от времени ($t, \text{с}$) для разных случаев приложения нагрузки

Черным цветом представлен график изменения ускорения груза в случае одновременного приложения нагрузки, серым - при последовательном приложении нагрузки.

На графиках видно, что уровни ускорений при последовательном приложении силы выше в два раза, чем при одновременном. Это можно объяснить резонансными эффектами, возникающими в оболочке при последовательном приложении нагрузки.

Подводя итог анализа проблемы моделирования механического воздействия РИ на тонкостенные конструкции, можно отметить, что на сегодняшний день существующая экспериментальная база по генерированию механического импульса нуждается в совершенствовании из-за отсутствия устройств низкоимпульсного нагружения, малой длительности и одновременности на больших поверхностях.

Создание универсальной методики и установки возможно с использованием светочувствительных взрывчатых веществ.

Библиографический список

1. Механическое действие рентгеновского излучения на тонкостенные композиционные конструкции / В.Н. Бакулин [и др.]. – М.: Наука, 2008. – 256 с.
2. **Могилев, В.А.** Техника взрывного эксперимента для исследования механической стойкости конструкций / В.А. Могилев, С.А. Новиков, Ю.И. Файков. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2007. – 215 с.
3. **Немчинов, И.В.** Разлет плоского слоя газа при постепенном выделении энергии // ПМТФ. 1961. №1. С. 17–26.
4. **Острик, А.В.** Методы моделирования механического действия излучений на материалы и конструкции / А.В. Острик, В.П. Петровский, А.А. Чепрунов // Научно-техн. сб. № 1 ЦФ-ТИ МО РФ. Сергиев Посад, 1997. – 75 с.
5. Методы динамических расчетов и испытаний тонкостенных конструкций / А.В. Кармишин [и др.]; под ред. А.В. Кармишина. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
6. **Голубев, В.К.** О механическом нагружении преград скользящей детонацией тонкого слоя ВВ / В.К. Голубев [и др.] // ФГВ. 1991. Т.27. №4. С. 94–99.
7. Физика ядерного взрыва. В 5 т. Т. 3. Воспроизведение факторов взрыва/ МО РФ. 12 ЦНИИ. – М.: Издательство физико-математической литературы, 2013. – 472 с.
8. **Фисенко, А.К.** Исследование физико-химических и взрывчатых свойств ТЭНа и БТФ в виде тонких слоев, полученных методом термовакуумного напыления / А.К. Фисенко [и др.] / Труды Международной конференции "3 Харитоновские научные чтения". – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2002. С. 90–93.
9. Los Alamos National Laboratory A. National Resource// LALP 89-49 July 1990. P.10.
10. **Бурцев, В.А.** Электрический взрыв проводников и его применение в электрофизических установках. Бурцев В.А., Калинин Н.В., Лучинский А.В. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 288 с.
11. **Демьяновский, С.В.** Формирование профиля нестационарной ударной волны, образованной при электровзрыве плоской металлической фольги / С.В. Демьяновский [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Теоретическая и прикладная физика. 1994. Вып. 2. С. 3–6.
12. **Герасимов, С.И.** Кумулятивные источники света / С.И. Герасимов, Ю.И. Файков, С.А. Холлин. – Саров: ФГУП "РФЯЦ-ВНИИЭФ", 2011. – 327 с.
13. Benham R A. Simulation of X-ray blow-off impulse loading on a reentry vehicle AFT end using light-initiated high explosive. The Shock and Vibration bulletin, 1975. P. 183–189.
14. Nevill G E, Jr, et al. Impulse loading using sprayed silver acetylide-silver nitrate. Experimental mechanics. 1965. 5. P. 294–298.
15. "Let there be LINE". SANDIA LAB News, March 2, 2007.
16. Разработка компонентов высокоэнергетических композиций / М.А. Илюшин [и др.]; под ред. Целинского И.В. – СПбГТИ (ТУ), 2006. – 150 с.

17. Герасимов, С.И. Исследование особенностей инициирования светочувствительными взрывчатыми составами некогерентным излучением / С.И. Герасимов, В.А. Кузьмин // Труды Международной конференции "16 Харитоновские научные чтения". – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2014. С. 90–93.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2014*

S. I. Gerasimov, V. A. Kuzmin

**PROBLEM OF MODELING OF THE MECHANICAL IMPULSE OF X-RADIATION
ON THE THIN-WALLED CONSTRUCTIONS**

Russian Federal Nuclear Center
All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

At creation of the modern technique much attention is paid to research of the processes which accompany the impact of high-intensity streams of energy on substance: X-radiation, electromagnetic radiation of optical spectrum, streams of the charged particles. One of the major factors of the X-ray impulse at radiation of any object is mechanical impact on this object. Now, one of the main researching method of behavior of construction's elements for action of a mechanical impulse is carrying out experiments of full-scale exemplars at a nonstationary loading devices, which produce mechanical action of high-intensity radiation. The method of a sliding detonation of thin sheet explosive belongs to one of ways of creation of impulse loading. The numerical decision for a cylindrical shell with amortized mass is given for an illustration how strongly the way of oscillation of a mechanical impulse influences on dynamics of a design. Two cases of the appendix of loading are considered: serial which takes place in a method of a sliding detonation at single-point initiation, and simultaneous, in case of use of photosensitive explosive. On schedules it is visible that levels of accelerations at serial application of force are twice higher, than at the simultaneous. It can be explained with the resonance effects arising in a shell at the serial appendix of loading.

Summing up the result of a case study of model operation of mechanical influence of X-radiation on thin-walled designs, it is possible to tell that today the existing experimental base on generation of a mechanical impulse needs perfecting due to the lack of devices of a low-pulse loading, small duration and simultaneity on larger surfaces.

Creation of the universal methodology and plants can be possible with using photosensitive explosives.

Key words: mechanical impulse, X-radiation, high-level radiation, experimental modeling, explosive, photosensitive explosive.

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

УДК 621.314

А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов, Ф.Ф. Юрлов, Н.В. Усов

ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ДИЗЕЛЬ-ГЕНЕРАТОРНЫХ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ С ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТОЙ ВРАЩЕНИЯ ВАЛА

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Цель: Исследование дизель-генераторных электростанций с переменной частотой вращения вала.

Методы исследования: Техничко-экономическое обоснование применения дизель-генераторных электростанций с переменной частотой вращения вала проведено с использованием «Методических рекомендаций по оценке инвестиционных проектов».

Результаты: Разработана функциональная схема дизель-генератора переменной частоты вращения на базе синхронного генератора; дана оценка экономической эффективности таких электростанций.

Выводы: Расчеты экономической эффективности свидетельствуют о целесообразности применения Д-Г электростанций с переменной частотой вращения вала.

Ключевые слова: дизельная электростанция, двигатель внутреннего сгорания, синхронный генератор, преобразователь частоты.

Системы "двигатель внутреннего сгорания (ДВС) – генератор" представляют широкий класс электроэнергетических систем, к которому относятся установки типа "дизель-генератор" (Д-Г), "бензиновый двигатель – генератор", судовые валогенераторные установки, ветроэлектростанции и ряд других электрогенерирующих комплексов. Из приведенных систем наибольшее распространение получили установки типа Д-Г. Они, обладая высокой надежностью, достаточно большим моторесурсом и долговечностью, незаменимы в качестве автономных источников основного или резервного электроснабжения.

подавляющее большинство существующих Д-Г работают с постоянной (номинальной) частотой вращения вала во всем диапазоне изменения нагрузки. Известно, что работа ДВС с постоянной частотой вращения, но при переменной нагрузке, характеризуется неоптимальным (повышенным) расходом топлива.

Для выбора экономичного режима работы ДВС удобно использовать его многопараметровую характеристику, которая строится в системе координат, где переменными служат два основных показателя его работы, при различных значениях третьего, используемого в качестве параметра остающегося постоянным [1]. На многопараметровой характеристике, представленной на рис. 1, штрихпунктирной линией показана зависимость эффективного давления p_e и эффективной мощности N_e от частоты вращения вала ДВС при наименьшем удельном расходе топлива g_e .

Согласно рис. 1 для обеспечения режима работы ДВС при оптимальном потреблении топлива необходимо уменьшение частоты его вращения при снижении мощности нагрузки. При этом приводимый во вращение ДВС электрический генератор будет вырабатывать напряжение, частота которого будет меняться и, как правило, будет ниже номинального значения. Это требует совершенно нового подхода к построению системы регулирования Д-Г,

которая должна обеспечивать стабилизацию амплитуды и частоты напряжения генераторного комплекса с помощью преобразователя частоты (ПЧ) [1-3].

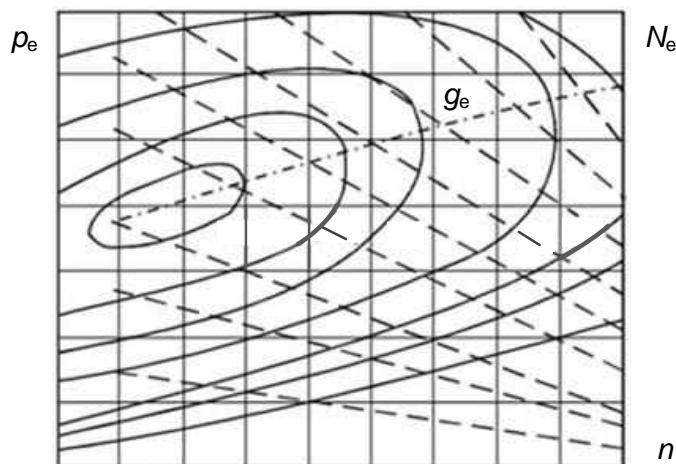


Рис. 1. Многопараметровая характеристика ДВС

Авторами предложена структура Д-Г электростанции с переменной частотой вращения вала (рис. 2) [4]. Устройство работает следующим образом. Интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей, представленный блоком 7, получает сигнал с блока вычисления мощности нагрузки 15, который соединен с выходами датчика напряжения 14 и датчика тока 4, измеряющими соответственно напряжение и ток на выходе ПЧ 3. В зависимости от значения мощности нагрузки блок 8 задания экономичного режима (ЗЭР), в программу работы которого заложены оптимальные зависимости частоты вращения дизеля 1 от мощности нагрузки, соответствующие минимальному расходу топлива, формирует сигнал, пропорциональный оптимальной частоте вращения вала дизеля 1. Этот сигнал поступает на вход электропривода 9 перемещения рейки топливного насоса, который поддерживает частоту вращения дизеля 1 на уровне, заданном блоком 8.

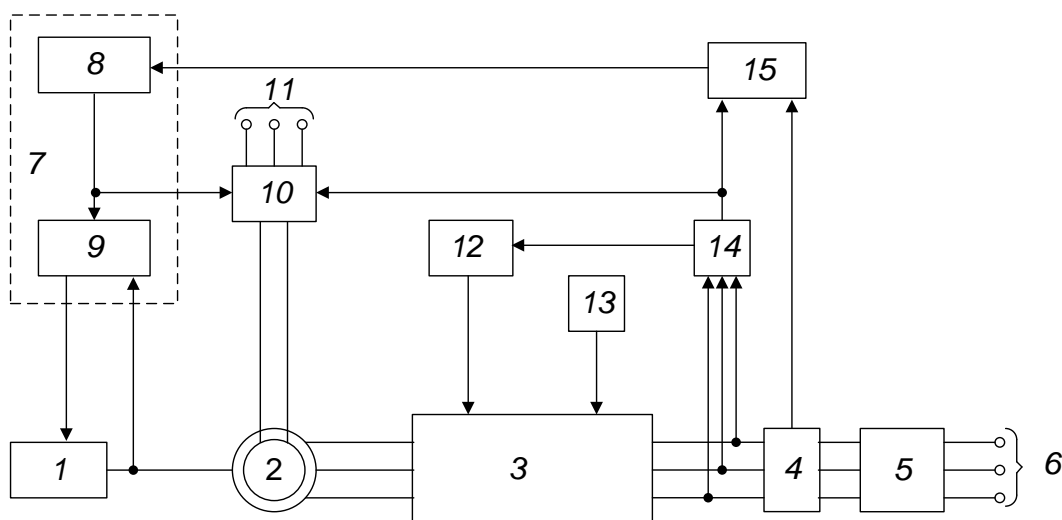


Рис. 2. Функциональная схема системы Д-Г переменной частоты вращения:
 1 – дизель; 2 – СГ; 3 – ПЧ; 4 – датчик тока; 5 – ПТ; 6 – выходные выводы; 7 – интеллектуальный сервопривод управления топливоподачей; 8 – ЗЭР; 9 – электропривод перемещения рейки топливного насоса; 10 – блок возбуждения СГ; 11 – выходы подключения питания блока возбуждения СГ; 12 – блок стабилизации напряжения; 13 – задатчик частоты выходного напряжения; 14 – датчик напряжения; 15 – блок вычисления мощности нагрузки

Поскольку частота вращения вала дизеля 1 будет изменяться в зависимости от мощности нагрузки, то амплитуда и частота переменного напряжения синхронного генератора (СГ) 2 будут также при этом изменяться. Стабилизация амплитуды переменного напряжения на выходных выводах 6 на уровне номинального значения для СГ 2 осуществляется с помощью ПЧ 3 и повышающего трансформатора (ПТ) 5.

Стабилизация выходного напряжения ПЧ 3 на заданном уровне осуществляется с помощью блока 12 стабилизации напряжения. Для повышения выходного напряжения на выходных выводах 6 до уровня номинального напряжения СГ 2 на выходе ПЧ 3 установлен ПТ 5. Блок 10 возбуждения СГ 2, получающий питание через выводы 11 подключения питания, формирует ток в обмотке возбуждения СГ 2 с учетом сигнала от блока 8 ЗЭР и от датчика напряжения 14.

Частота выходного напряжения на выходных выводах 6 при изменении частоты вращения вала дизеля 1 поддерживается неизменной с помощью ПЧ 3 на уровне, определяемом блоком 13 задатчика частоты выходного напряжения.

Авторами разработана методика расчета топливной экономичности системы Д-Г на базе дизеля переменной частоты вращения [5] (табл. 1). Согласно разработанной методике рассчитывается общий КПД цепи СГ 2 – ПЧ 3 – ПТ 5. Алгоритм расчета КПД учитывает, что элементы электрооборудования, входящие в состав системы Д-Г на базе дизеля переменной частоты вращения (СГ, ПЧ и ПТ), работают при переменной частоте и амплитуде напряжения.

Таким образом, для каждого значения мощности нагрузки определяется мощность на валу дизеля 1. Расход топлива дизеля при конкретных значениях мощности нагрузки и частоте вращения вала определяется по его многопараметровой характеристике.

С помощью разработанной методики в пакете Mathcad выполнен расчет энергетических характеристик Д-Г электростанций типа SDMO EXEL номинальной мощностью $P_{ном}=727, 1232$ и 1600 кВт. На основании расчетов были получены зависимости расхода топлива Д-Г в режимах с переменной и постоянной (номинальной) частотами вращения. Также построены диаграммы экономии топлива Д-Г, достигаемой за счет регулирования частоты вращения дизеля в зависимости от мощности нагрузки (рис. 3).

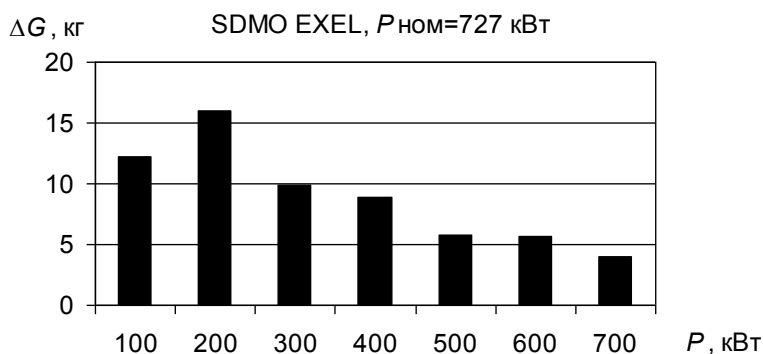
Как видно из рис. 3, наибольшая экономия топлива для рассматриваемых Д-Г номинальной мощностью $P_{ном}=727, 1232$ и 1600 кВт наблюдается при мощностях нагрузки 200, 300 и 200-400 кВт соответственно.

Таблица

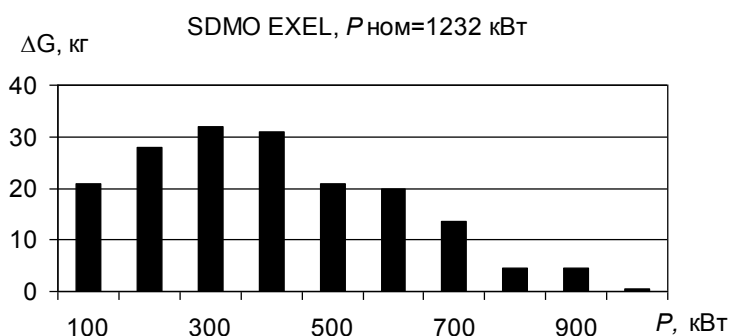
Показатели эффективности внедрения Д-Г переменной частоты вращения

Номинальная мощность Д-Г, кВт	ЧТС, тыс. руб.	ИД	ВНД, %	Ток, лет
727	1504	1,42	40	2,0
1232	4230	1,69	73	2,0
1600	2358	1,23	43	2,0

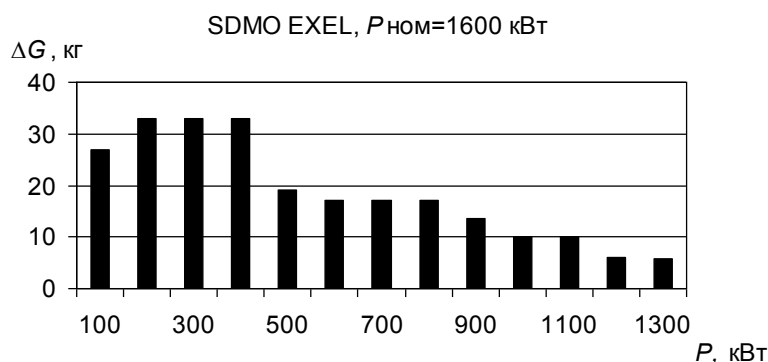
На основании диаграмм топливной экономичности (рис. 3) и стоимости дополнительного оборудования (ПЧ 3, ПТ 5, интеллектуального сервопривода управления топливоподачей 7, блоков 4, 12-15), которые необходимо установить на Д-Г электростанцию, чтобы обеспечить возможность ее работы в режиме с переменной частотой вращения, авторами проведена оценка экономической эффективности системы Д-Г переменной частоты вращения. Оценка проведена с использованием «Методических рекомендаций по оценке инвестиционных проектов», которые утверждены Министерством экономики РФ, Министерством финансов РФ, Государственным комитетом РФ по строительной, архитектурной и жилищной политике [6, 7].



а)



б)



в)

Рис. 3. Диаграммы топливной экономичности Д-Г по абсолютному расходу топлива G при различной мощности нагрузки:
 ΔG – уменьшение абсолютного расхода топлива дизеля; P – мощность нагрузки Д-Г

Согласно указанным рекомендациям в качестве критериев эффективности инвестиционных проектов были рассчитаны: чистая текущая стоимость (ЧТС), индекс доходности (ИД), внутренняя норма доходности (ВНД), срок окупаемости инвестиций (Ток) (табл. 1). При расчетах коэффициент дисконтирования принимался равным 20% в год. Стоимость 1 кг дизельного топлива принималась равной 37 руб.

В результате расчетов, проведенных для всех исследуемых Д-Г, было получено, что $ЧТС > 0$, $ИД > 1$. Следовательно, проект прибыльный и эффективный. Расчетный срок окупаемости проекта «Ток» – 2 года.

Библиографический список

1. **Хватов, О.С.** Нейросетевой алгоритм системы управления топливоподачей дизель-генератора переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Поляков // Вестник Ивановского гос. техн. ун-та. 2013. Вып. 3.
2. **Дарьенков, А.Б.** Автономная дизельная электростанция с нейросетевым задатчиком экономичного режима / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Промышленная энергетика. 2013. № 12.
3. **Дарьенков, А.Б.** Интеллектуальные средства управления высокоэффективной дизель-генераторной установкой переменной частоты вращения / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов // Вестник Тульского гос. ун-та. Технические науки, 2010. Вып. 3.
4. Пат. 2412513 РФ. Автономная электростанция переменного тока / А.Б. Дарьенков, О.С. Хватов - Опубл. в бюл., 2011, № 5.
5. **Хватов, О.С.** Топливная экономичность единой электростанции автономного объекта на базе двигателя внутреннего сгорания переменной скорости вращения / О.С. Хватов, А.Б. Дарьенков, И.С. Самоявчев // Эксплуатация морского транспорта: сб. науч. статей. – СПб.: ГМА им. адмирала С. О. Макарова, 2013. № 1.
6. Методические рекомендации по оценке эффективности инвестиционных проектов. 21 июня 1999 г. № ВК 477. – М.: Экономика, 2000.
7. **Юрлов, Ф.Ф.** Оценка эффективности инвестиционных проектов и выбор предпочтительных решений / Ф.Ф. Юрлов, А.Ф. Плеханова, Т.В. Болоничева; Нижегород. гос. техн. ун-т им. Р.Е. Алексеева. – Н. Новгород, 2011. – 307 с.

*Дата поступления
в редакцию 01.07.2014*

A.B. Daryenkov, O.S. Khvatov, F.F. Yurlov, N. V. Usov

**TECHNICAL-ECONOMIC BASIS OF THE USE OF DIESEL
ELECTRIC POWER STATION CHARACTERIZED BY ALTERNATING
FREQUENCY ROTATION OF SHAFT**

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

Purpose: The research of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation of shaft.

Design/methodology/approach: Technical-economic basis of the use of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation of shaft is developed by using the "Methodological recommendations for assessment of investment projects".

Findings: Developed flow sheets of diesel electric power station based on a synchro generator and characterized by alternating frequency rotation of shaft; the assessment of economic efficiency of such electric power station is given.

Originality/value: Calculation of economic efficiency indicate about the advisability of the use of diesel electric power station characterized by alternating frequency rotation of shaft.

Key words: electric power station, diesel generator, synchro generator, converter.

УДК621.3

А.С. Репин, В.В. Гуляев, О.А. Бурмакин

**ДИНАМИКА СИСТЕМ СТАРТЕРНОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА ДИЗЕЛЯ
С ЕМКОСТНЫМИ НАКОПИТЕЛЯМИ ЭНЕРГИИ**

Волжская государственная академия водного транспорта

Рассмотрены вопросы динамики систем стартерного электропривода с накопителями энергии молекулярного типа. Исследованы разомкнутые системы пуска с параллельным включением стартерной батареи и накопителя, а также проблемы использования накопителя в качестве самостоятельного источника питания стартерного двигателя. Получены и проанализированы динамические и интегральные энергетические характеристики и показатели таких систем.

Ключевые слова: стартерный электропривод, электростартерный пуск, молекулярный накопитель.

Системы пуска ДВС транспортных средств, дизель-генераторных установок (ДГУ) автономных источников электроснабжения и станций базируются на основе стартерных двигателей (СД) постоянного тока, как правило, последовательного возбуждения. До сих пор подавляющее число электростартерных систем реализует запуск двигателей методом прямого включения, а сама система стартерного электропривода с точки зрения регулирования имеет разомкнутую структуру.

Долгое время считалось, что использование принципа регулирования по отклонению в стартерном электроприводе нецелесообразно, поскольку главной задачей системы пуска является выведение двигателя за регламентированное время в режим, когда его угловая скорость вращения становится выше пусковой и индикаторная работа превышает работу, затрачиваемую на преодоление момента сопротивления движению. В этом случае имеют место постоянные устойчивые вспышки топлива в цилиндрах дизеля и создаются благоприятные условия для его успешного запуска в работу. Часто вывод дизеля в установившийся режим сопровождается переходом в режим холостого хода с последующим набросом нагрузки (система пуска ДГУ).

Такой традиционный подход, сложившийся в проектировании электростартерных систем, в частности, приводит к тому, что электрическая емкость стартерных батарей зачастую завышается и избыточна, увеличиваются стоимость и массогабаритные показатели системы. В процессе эксплуатации запуск двигателей сопровождается огромными пиковыми токами в начальный момент пуска, глубокими провалами напряжения на зажимах стартерной батареи, быстрым отбором требуемой электрической емкости, опережающим нормальную скорость протекания химических реакций в источнике. Это приводит к тому, что заявленный производителем срок службы аккумуляторных батарей сокращается на 30–50%, особенно, если система эксплуатируется в жестких климатических условиях.

В то же время ужесточение требований к современным системам пуска в части снижения энергопотребления, повышения надежности пуска и их отдельных элементов заставляет пересматривать сложившиеся подходы к их разработке и искать новые пути их совершенствования. Широкое распространение получает софт-стартерный пуск [2], замкнутые системы с контролем тока разряда стартерной батареи, системы пуска с изменяемой структурой источника питания и др.

Одним из перспективных направлений этой работы является привлечение в стартерный электропривод электрических накопителей – импульсных конденсаторов сверхвысокой энергоемкости (ИКСЭ)[1]. ИКСЭ по принципу действия представляет собой накопитель мо-

лекулярного типа и способен аккумулировать энергию большого объема. Отечественной и зарубежной промышленностью освоен выпуск накопителей для систем стартерного электропривода емкостью до 300 Ф при рабочем напряжении в десятки вольт. Энергоемкость таких накопителей оказывается достаточной для осуществления пуска дизелей даже средней и большой мощности, без использования в процессе запуска аккумуляторных батарей.

В связи с изложенным представляет интерес исследование динамики таких систем как при работе накопителя совместно с аккумуляторной батареей, так и в качестве индивидуального источника питания СД, с предварительным зарядом его от аккумуляторной батареи перед пуском. В последнем случае важно знать количество возможных попыток пуска от накопителя в зависимости от его электрической емкости и от мощности силового агрегата.

Следует отметить, что системы с накопителями молекулярного типа предложены уже достаточно давно и известны отдельные и вполне успешные попытки их практического внедрения. Однако строгого систематического исследования динамики таких систем с получением интегральных показателей практически не предпринималось.

С 2002 по 2012 годы авторами выполнена разработка теоретической базы для моделирования таких систем и осуществлены работы практического характера по сбору, анализу и систематизации отдельных показателей опытно-экспериментальных систем стартерных электроприводов с накопителями для запуска дизелей К6S310DR, мощностью 885 кВт.

Математически процесс пуска может быть описан системой дифференциальных уравнений, которая претерпевает изменения при переходе системы от одного этапа пуска к другому. Процесс пуска представляется трехэтапным: 1-й этап – дизель является нагрузкой СД, 2-й этап – совместная работа СД и дизеля, ввиду появления устойчивых вспышек топлива в цилиндрах, 3-й этап – самостоятельная работа дизеля с выходом в установившийся режим. На всех этапах дизель рассматривается как объект регулирования угловой скорости (оборотов).

$$\left\{ \begin{array}{l} u_{GB} = u_{p.ц.} - i_{GB} \cdot r_{ном.} \\ u_{GB} = u_C = e_M + i_a \cdot r_a + L_a \frac{di_a}{dt} \\ i_a = i_C + i_{GB} \\ i_C = -C \frac{du_C}{dt} \\ J_{э.пр.} \frac{d\omega_M}{dt} = \begin{cases} 0, n_{пр} \rightarrow M_{M.эм.} < M_{с.пр.N.}, M_{M.эм.} = M_{с.пр.}, \omega_{диз.} = 0 \\ M_{M.эм.} - M_{с.пр.N.}, n_{пр} \rightarrow 0 < \omega_{диз.} < \omega_{пуск.}, M_{M.эм.} \geq M_{с.пр.N.} \\ M_{диз.эф.пр.} + M_{M.эм.} - M_{с.пр.N.}, n_{пр} \rightarrow \omega_{пуск.} \leq \omega_{диз.} < \omega_{уст.}, \\ M_{M.эм.} \geq M_{с.пр.N.} \end{cases} \\ e_M = c\phi_M \omega_M = ck_a \cdot (i_C + i_{GB}) \omega_M \\ \phi_M = k_a i_a = k_a \cdot (i_C + i_{GB}) \\ M_{M.эм.} = c\phi_M i_a = ck_a \cdot (i_C + i_{GB})^2 \end{array} \right.$$

Этой системе соответствуют структурные схемы, представленные на рис. 1, которые отражают работу системы от 0 до пусковой частоты вращения коленчатого вала дизеля и от пусковой частоты вращения до значения, соответствующего 115–120% пусковой частоты, то есть на 1-м и 2-м этапах пуска. На 3-м этапе пуска вступает в работу объединенный регулятор дизеля, и структура приобретает известный замкнутый вид с ПИ–регулятором.

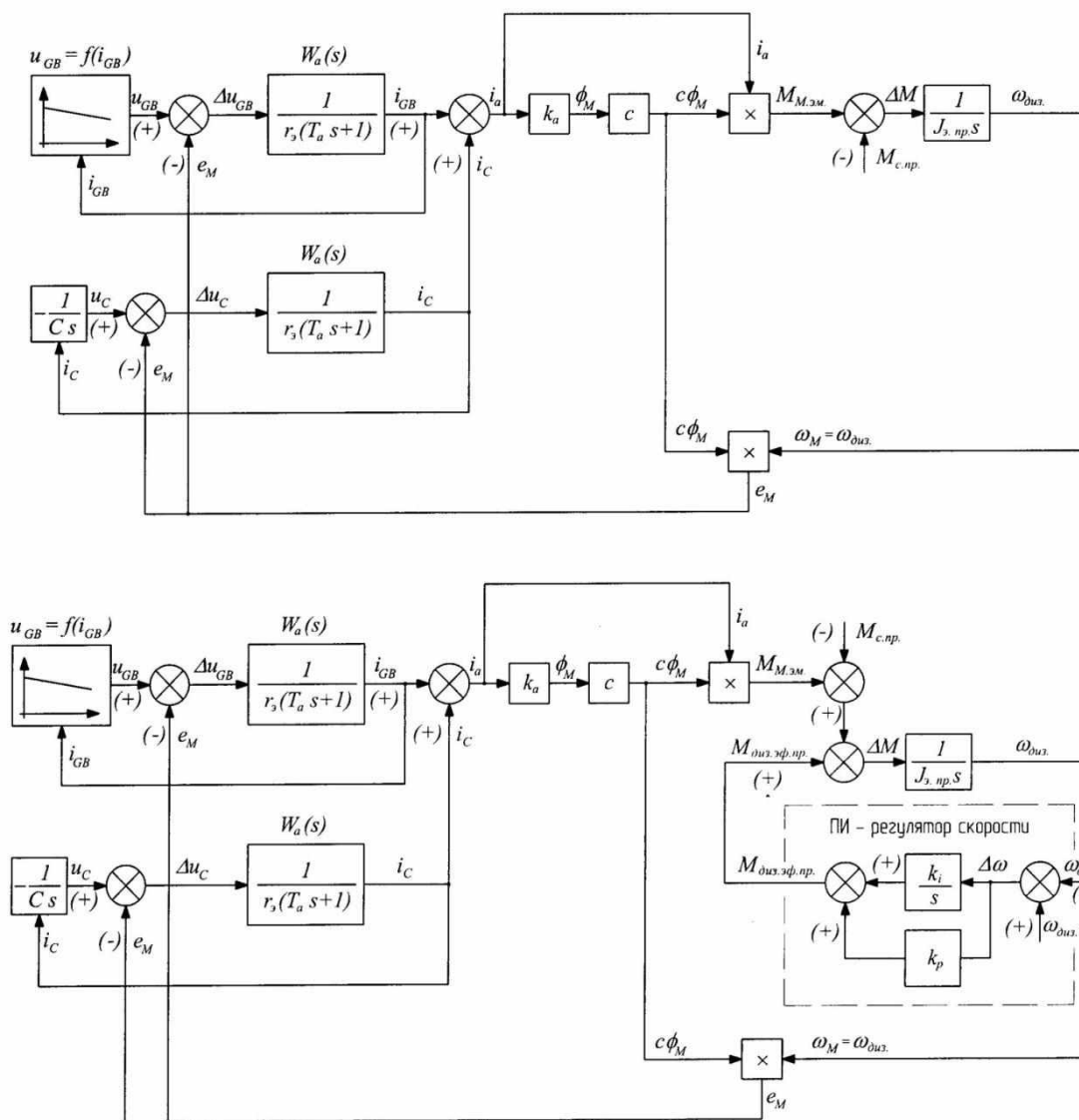


Рис. 1. Структурные схемы системы электростартерного пуска дизеля с емкостным накопителем энергии

Работа системы предполагает предпусковой заряд накопителя от аккумуляторной батареи с последующим включением их на параллельную работу. Причем цепи разряда стартерной батареи и накопителя в процессе пуска разделены между собой диодами. Это сделано для исключения обмена энергией между батареей и накопителем в процессе пуска и устранения уравнительного тока между ними. При такой схеме включения накопитель берет на себя кратковременную пиковую нагрузку в начале пуска, что создает хорошие условия для «отрыва» вала от мертвой точки покоя. Стартерная батарея в этот момент работает в облегченном режиме, способствуя дальнейшей раскрутке коленчатого вала дизеля до пусковой частоты вращения. Разгрузка стартерной батареи с переводом значительной части пиковой мощности на накопитель существенно улучшает процесс отбора мощности, что положительно сказывается на увеличении срока ее службы.

Ресурсные испытания стартерных батарей показывают, что снижение пикового тока разряда в два раза позволяет повысить срок службы аккумуляторов в 1,6–1,8 раза. Однако параллельное включение батареи и накопителя придает системе в целом и существенный недостаток: общий ток разряда в нагрузку (ток СД) становится больше, по сравнению с аналогичным показателем в режиме прямого включения при питании СД только от аккумулятора.

Это приводит к увеличению динамических нагрузок на отдельные элементы системы, ухудшает условия коммутации тока в СД, сокращая сроки его межремонтных пробегов. Поэтому привлечение в структуру стартерного электропривода накопителей целесообразно осуществлять совместно с преобразователями, реализующими принцип импульсного отбора мощности от комбинированного источника питания СД при пуске.

Динамические характеристики разомкнутой системы с комбинированным источником питания СД на примере пуска дизеля мощностью 885 кВт с накопителями емкостью 4 Ф и 23 Ф приведены на рис. 2.

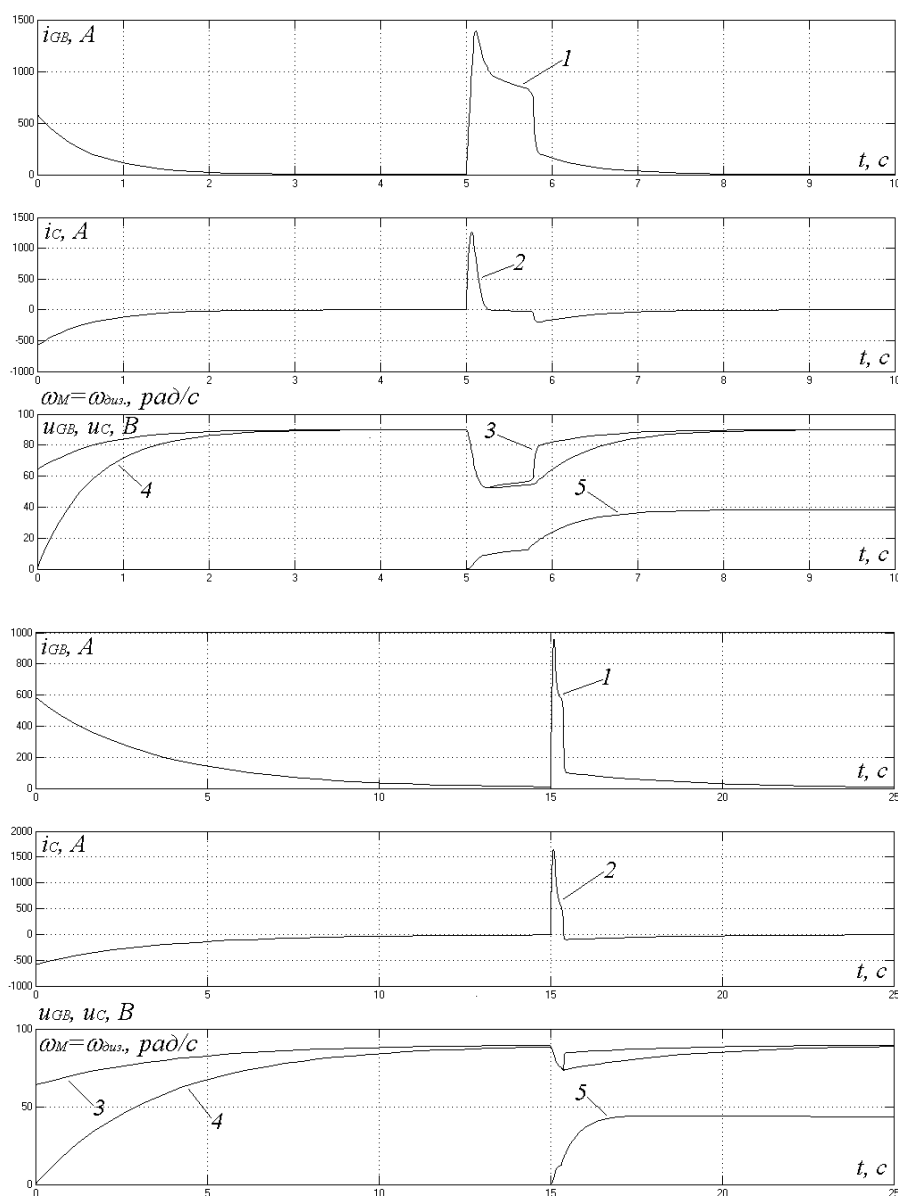


Рис. 2. Динамические характеристики системы пуска с накопителями различной емкости:
 1 – ток разряда автономного источника (стартерной батареи); 2 – ток заряда/разряда накопителя;
 3 – напряжение на внешних зажимах стартерной батареи; 4 – напряжение на внешних зажимах накопителя; 5 – угловая скорость вала СД, равная скорости коленчатого вала дизеля;
 а – $C_{EHЭ} = 4$ Ф, $i_{GB, \max} = 1393$ А; $\Delta u_{GB} = 37,4$ В; б – $C_{EHЭ} = 23$ Ф, $i_{GB, \max} = 988,6$ А; $\Delta u_{GB} = 31,12$ В;

Из рассмотрения характеристик видно, что с увеличением электрической емкости накопителя пиковое значение тока разряда снижается, в то время как ток разряда накопителя – увеличивается. Очевидно, что при разработке таких систем должен обеспечиваться разум-

ный баланс между качественными показателями переходного режима пуска с одной стороны и массогабаритными, стоимостными показателями, с другой.

Использование накопителей с энергетической точки зрения иллюстрируют обобщенные интегральные характеристики, представленные в виде столбцовых диаграмм на рис. 3.

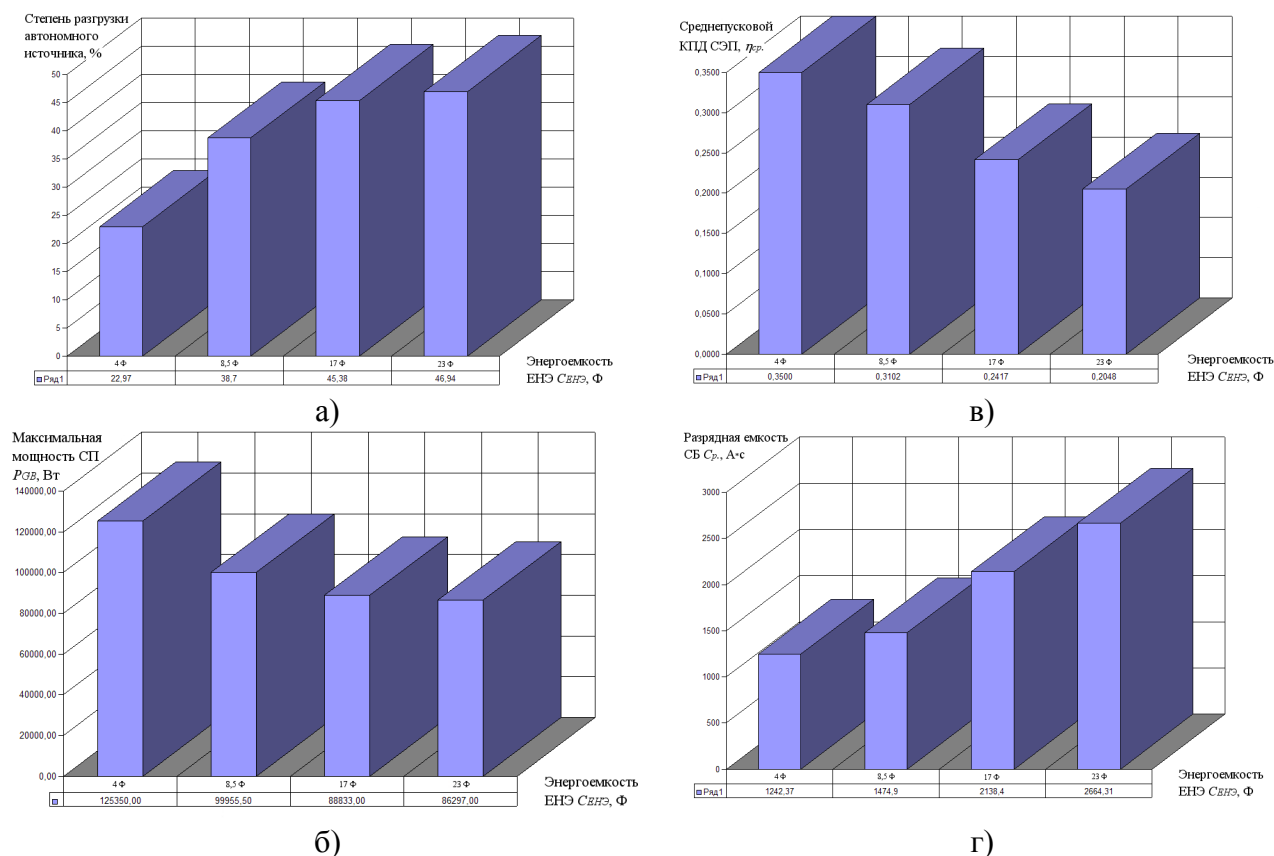


Рис. 3. Удельные и интегральные характеристики систем пуска с накопителями, необходимые для оценки эффективности их использования в буферном режиме совместно с СБ

С увеличением емкости накопителя, повышается степень разгрузки стартерной батареи, улучшается режим ее работы и одновременно снижается значение мощности, необходимой для успешного запуска двигателя. В то же время снятие пиковой нагрузки в начальный момент времени приводит к некоторому затягиванию процесса пуска и, как следствие, к увеличению разрядной емкости, отдаваемой источником в нагрузку. Поэтому использование накопителя положительно сказывается на характере отбора мощности от стартерной батареи, а значит, и на ее сроке службы.

Моделирование системы пуска с накопителем в качестве индивидуального источника питания СД может быть выполнено с использованием тех же структурных схем рис. 1. Для этого достаточно исключить канал формирования выходной координаты стартерной батареи – тока ее разряда i_{GB} .

Динамические характеристики такой системы с накопителем емкостью 50 Ф представлены на рис. 4. Здесь имеет место серия неудачных попыток пуска дизеля.

Из рассмотрения этих кривых видно, что от попытке к попытке накопитель теряет свой заряд, а пиковое значение тока разряда снижается. Варьируя номинальным напряжением источника заряда и энергоемкостью накопителя можно аккумулировать такое количество энергии, которое обеспечит требуемое число пусков дизеля. Однако на практике число возможных пусков двигателя конечно и невелико. Это обусловлено тем, что, во-первых, современные ИКСЭ имеют максимальное рабочее напряжение не более 200 В и, во-вторых, их высокая электрическая емкость сочетается с довольно высокими массогабаритными показателями.

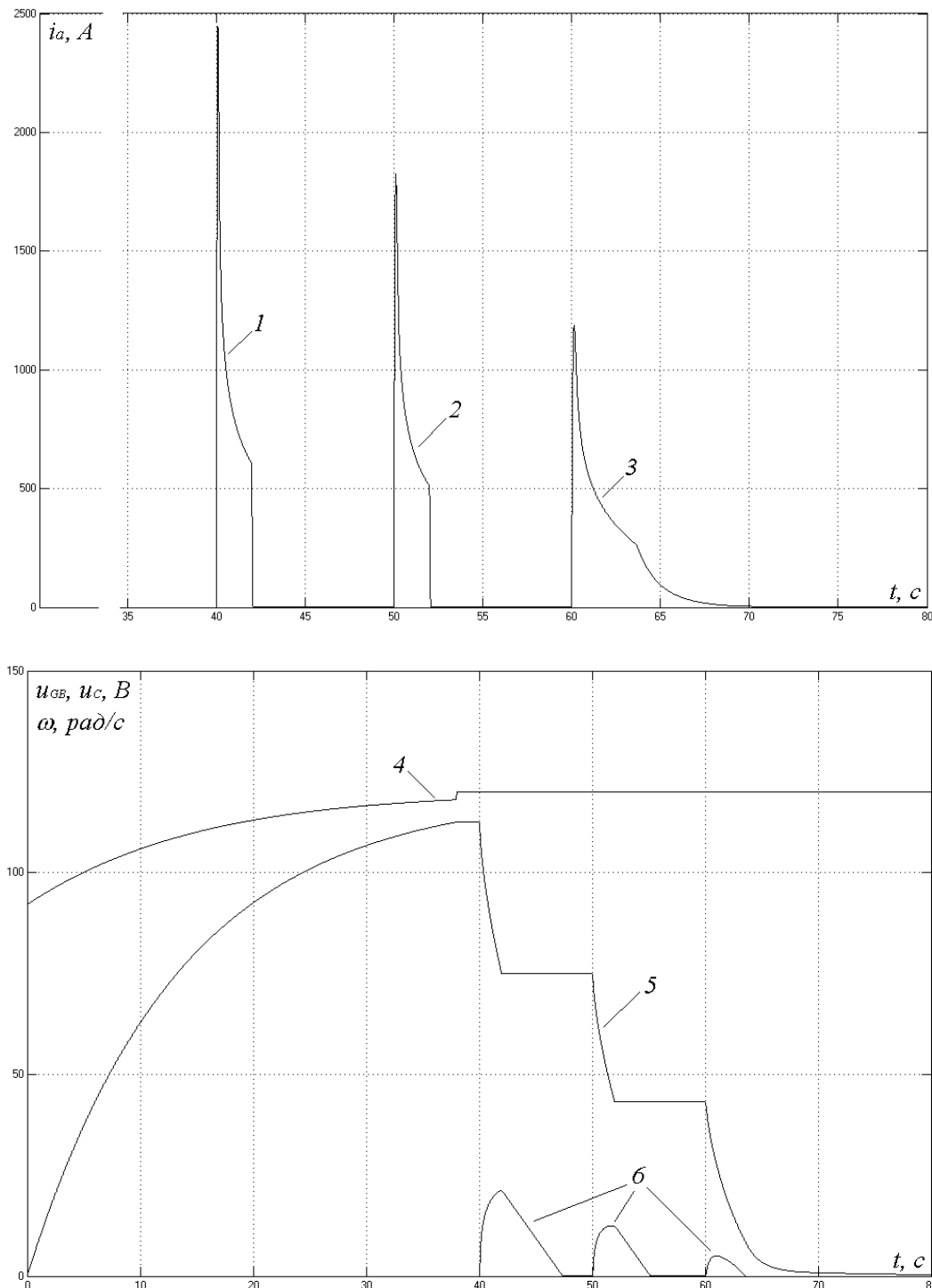


Рис. 4. Динамические характеристики переходного режима пуска дизеля в системе накопитель – СД последовательного возбуждения при наличии серии неудавшихся попыток запуска:
 $a - 1, 2, 3 - i_a = i_C = f(t)$; $b - 4 - u_{GB} = f(t)$; $5 - i_C = f(t)$; $6 - \omega_{диз.} = f(t)$

Эффективность использования различных накопителей в системе может быть оценена по интегральным столбцовым диаграммам рис. 5.

Анализируя полученные результаты, представляется, что привлечение в структуру стартерного электропривода дизеля накопителей и импульсных преобразователей придаст системам пуска ряд ценных качеств в части надежности, существенного улучшения динамич-

ческих характеристик и показателей, расширит температурный диапазон эффективного использования на практике.

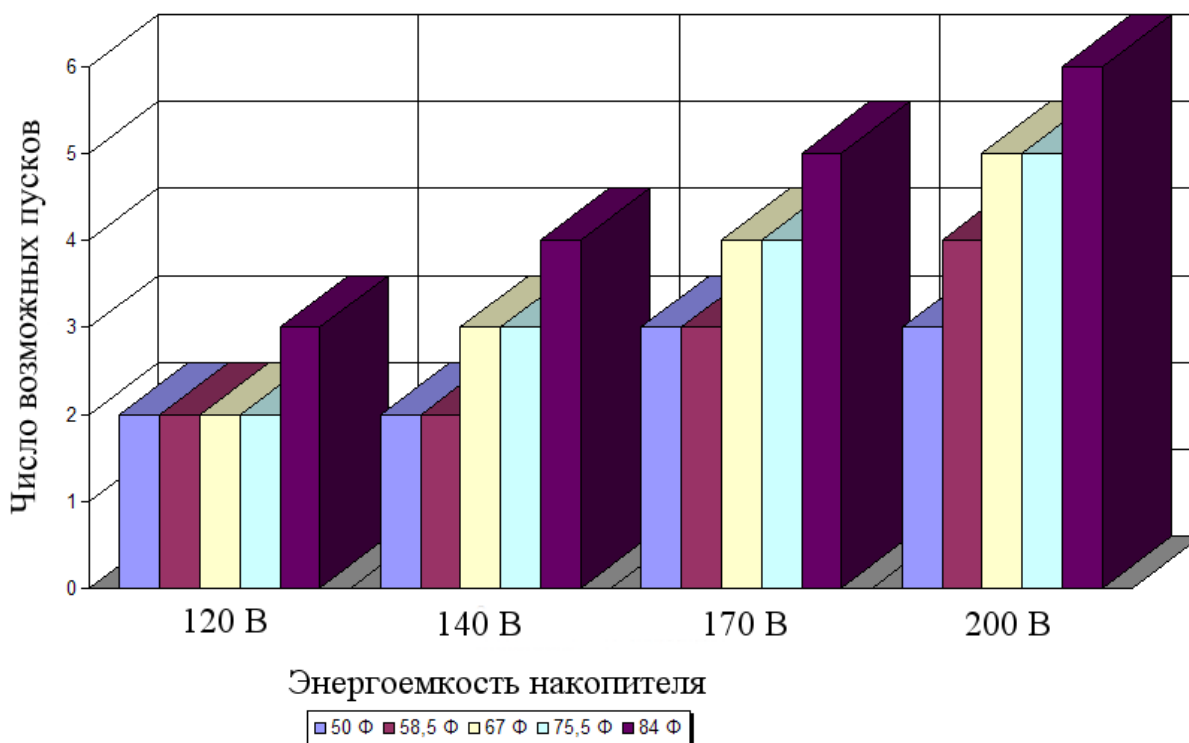


Рис. 5. Зависимость числа возможных пусков дизеля в системе накопитель – СД последовательного возбуждения от количества энергии, запасенной в ИКСЭ

Библиографический список

1. **Репин, А.С.** Система стартерного электропривода с дискретно-импульсным регулятором напряжения и ячейковыми накопителями энергии / А.С. Репин, В.В. Гуляев, О.А. Бурмакин // Труды 14-го международного научно-промышленного форума «Великие реки – 2012». Проблемы использования и инновационного развития внутренних водных путей в бассейнах великих рек. Т. 2. С. 284–286.
2. **Репин, А.С.** Система электростартерного пуска двигателей внутреннего сгорания (ДВС) с адаптивным ШИМ-регулятором / А.С. Репин, О.А. Бурмакин, В.В. Гуляев // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Вып. № 33. С. 196–200.

*Дата поступления
в редакцию: 01.07.2014*

A.S. Repin, V.V. Gulyaev, O.A. Burmakin

DYNAMIC MODES OF DIESEL’S ELECTRICAL STARTING SYSTEMS WITH CAPACITOR STORES OF ENERGY

Volga State Academy of Water transport

Questions of system’s dynamics of the start-up electric drive with stores of energy of molecular type are considered. The opened systems of start-up with parallel turning on of the start-up battery and the store, and also a problem of use of the store as the independent power supply of the start-up engine are investigated. Dynamic and integrated power characteristics and indicators of such systems are received and analyzed.

Key words: start-up electric drive, electrical start-up, molecular store.

УДК 621.3

Д.Б. Курицын, В.В. Соколов

МОНИТОРИНГ И УДАЛЕННОЕ УПРАВЛЕНИЕ СОВРЕМЕННЫМ ПРОМЫШЛЕННЫМ ОБОРУДОВАНИЕМ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Приведен вариант построения современной системы мониторинга и удаленного управления электроприводами на базе лабораторного стенда. Представлена функциональная схема стенда с описанием его оборудования. Разработан графический интерфейс SCADA системы. Предложены варианты организации системы удаленного управления по беспроводной сети Wi-Fi с использованием планшетных компьютеров.

Ключевые слова: SCADA система, мониторинг, технологический процесс, программируемый логический контроллер, удаленное управление, человеко-машинный интерфейс.

Современные предприятия не могут быть конкурентоспособны без использования новейших достижений техники для организации технологических процессов. Ввиду увеличения числа компьютеров, программируемых логических контроллеров, датчиков и других подобных устройств возникла необходимость их объединения в единую систему, которая позволяла бы осуществлять мониторинг и удаленное управление технологическим процессом в режиме реального времени.

В настоящее время для решения подобной задачи в автоматизированные системы управления технологическим процессом внедряются SCADA системы. SCADA (аббревиатура от английского *supervisory control and data acquisition*, диспетчерское управление и сбор данных) - это программный пакет, предназначенный для разработки или обеспечения работы в реальном времени систем сбора, обработки, отображения и архивирования информации об объекте мониторинга или управления. Одной из задач, стоящих перед специалистами в области автоматизации в настоящее время является поиск оптимальной организации удаленного управления с использованием переносных устройств. Ввиду имеющихся потребностей рынка в подобных технических решениях, предложены и апробированы системы мониторинга и удаленного управления промышленного оборудования на примере разработанного учебного стенда с промышленным оборудованием фирмы OMRON.

Лабораторный стенд, предназначенный для изучения и испытания технических решений, состоит из управляющего и исполнительного оборудования фирмы OMRON. Структурная схема стенда приведена на рис. 1. К управляющему оборудованию относятся: операторская панель, программируемый логический контроллер, персональные компьютеры, планшетный компьютер. Исполнительная часть стенда построена на двух электроприводах: асинхронного привода и сервопривода.

Асинхронный электропривод состоит преобразователя частоты MX2 фирмы OMRON и асинхронного двигателя ECO Drive. Для создания сервопривода применяются серводрайвер SmartStep2 и сервомотор R88M. Использование электроприводов данного типа обусловлено малыми габаритами устройств, а также широким применением подобных систем для организации различных технологических процессов. Конфигурирование параметров преобразователей осуществляется в среде разработки CX-Drive, поставляемой вместе с оборудованием.

В качестве полевого устройства измерения и управления используется программируемый логический контроллер (ПЛК) фирмы OMRON CP1L с подключенным модулем расширения аналоговых входов/выходов CP1W-MAD11. Наличие данного модуля позволяет значительно расширить число возможных точек подключения приводов, датчиков к системе, потенциально позволяя апробировать большее количество технических решений.

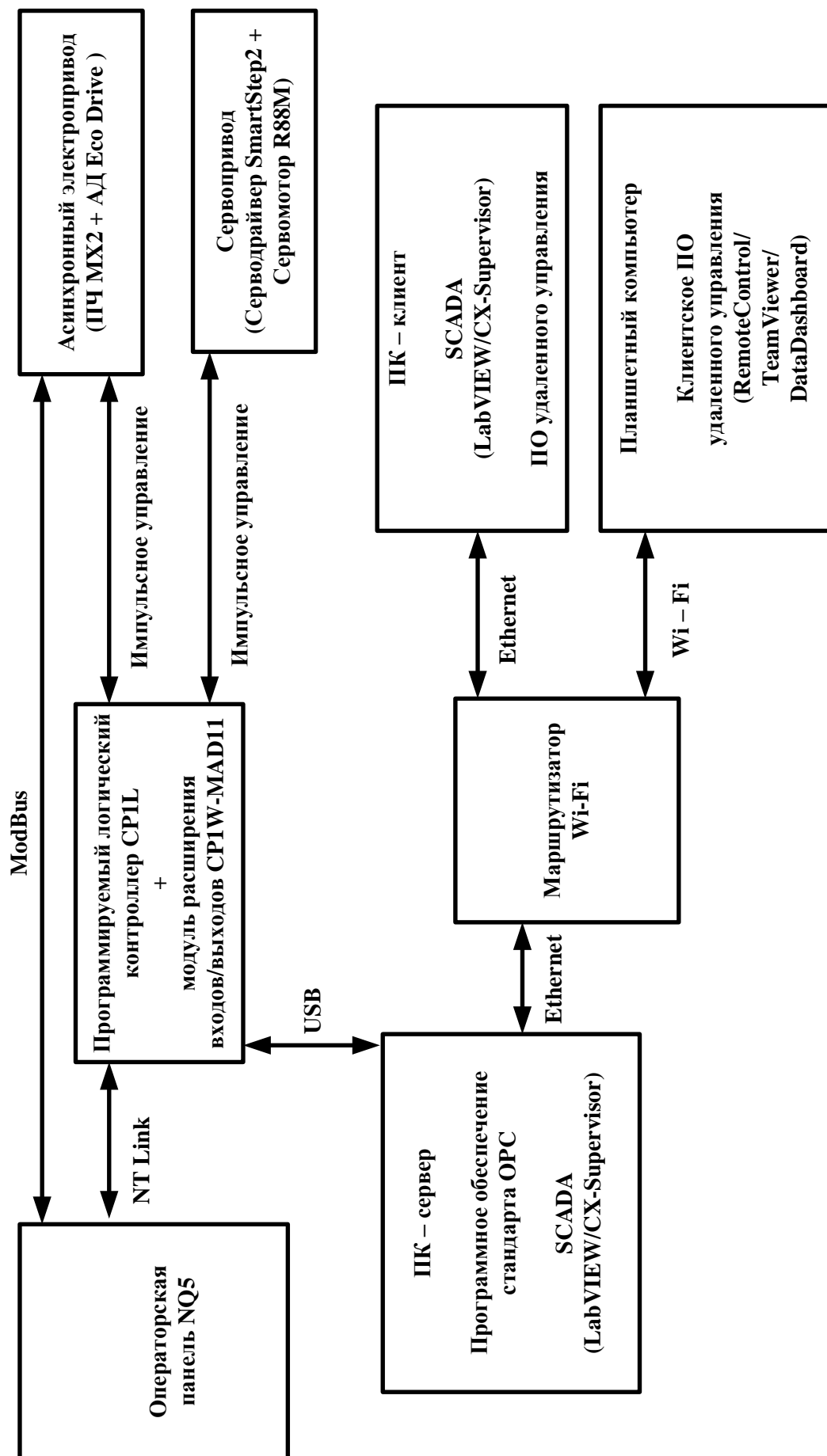


Рис. 1. Структурная схема лабораторного стенда

Используемый ПЛК имеет USBпорт для соединения с персональным компьютером. В данном случае порт позволяет выполнять не только функцию программирования, но и управления контроллера. Данный факт позволяет упростить настройку и подключение SCADA системы входящей в состав информационной части стенда.

Первое техническое решение для мониторинга и удаленного управления реализовано путем подключения к системе операторской панели NQ5. Панель управления имеет два порта через которые по протоколу NT-Link (интерфейс RS-232) и протоколу ModBus RTU (интерфейс RS-485) осуществляется управление программируемым логическим контроллером и преобразователем частоты. Человеко-машинный интерфейс данного технического решения разработан в программе NQ-Designer фирмы OMRON. Управление и мониторинг при использовании подобного оборудования наиболее часто применяется для установки на передней панели шкафа управления, что позволяет сократить габариты необходимые для систем, которые предназначены для малых технологических процессов.

В состав информационной системы второго технического решения входят:

- компьютер сервер под управлением ОС Windows 7, на котором загружены SCADA системы и OPC сервер;
- компьютер клиент под управлением ОС Windows 7, на котором загружены аналогичные серверу SCADA системы, программа дистанционного управления TeamViewer;
- планшетный компьютер под управлением ОС Android 4.2, на котором загружены клиентские программы для мониторинга и удаленного управления RemoteControl, TeamViewer, DataDashboard.

Вычислительная сеть между перечисленными устройствами создана на базе технологии Ethernet. Данный выбор обоснован дешевизной оборудования необходимого для организации связей (кабели с унифицированными разъёмами 8P8C и маршрутизатор Wi-Fi), простотой внедрения, а также многомастерностью интерфейса, которая необходима при построении подобной разветвлённой системы управления.

SCADA система LabVIEW создается на языке программирования G в режиме потока данных, что позволяет разработчику полностью сфокусироваться на мониторинге параметров системы и путях их обработки. Это является основным отличием от стандартных текстовых языков, которые используют последовательное выполнение команд. Средства отладки позволяют наглядно отобразить процесс распространения данных по проводникам, а также отобразить соответствующие значения на входах и выходах узлов кода. Потокое программирование обуславливает необходимость работать в терминологическом поле прикладной области задачи. Основным преимуществом LabVIEW среди других SCADA систем является широкий инструментарий, позволяющий рассмотреть практически любые аспекты технологического процесса. Перечисленный ряд фактов является одним из аргументов в пользу использования подобной системы для разработки системы мониторинга и удаленного управления, и апробирования возможностей стенда с целью использования полученных результатов в дальнейших разработках.

Вторая SCADA система разработана на базе программного обеспечения CX-Supervisor. CX-Supervisor использует коммуникационный драйвер CX-Server для непосредственной связи с оборудованием промышленной автоматизации компании OMRON. Ввиду данной особенности его применение в разработанной системе будет весьма целесообразно. Окна человеко-машинных интерфейсов (ЧМИ) разработаны в программных средах NQ-Designer, CX-Supervisor, LabVIEW и приведены на рис. 2.

Одной из ключевых особенностей внедрения SCADA системы является необходимость обеспечения ее корректного обмена информацией с оборудованием. Для решения данной задачи было использовано программное обеспечение CX-Server OPC. Указанная разработка фирмы OMRON является реализацией международного стандарта позволяющего унифицировать обмен информацией между оборудованием и программной средой, которые созданы различными производителями. Данное техническое решение позволило упростить сопряжение устройств в разработанной системе.

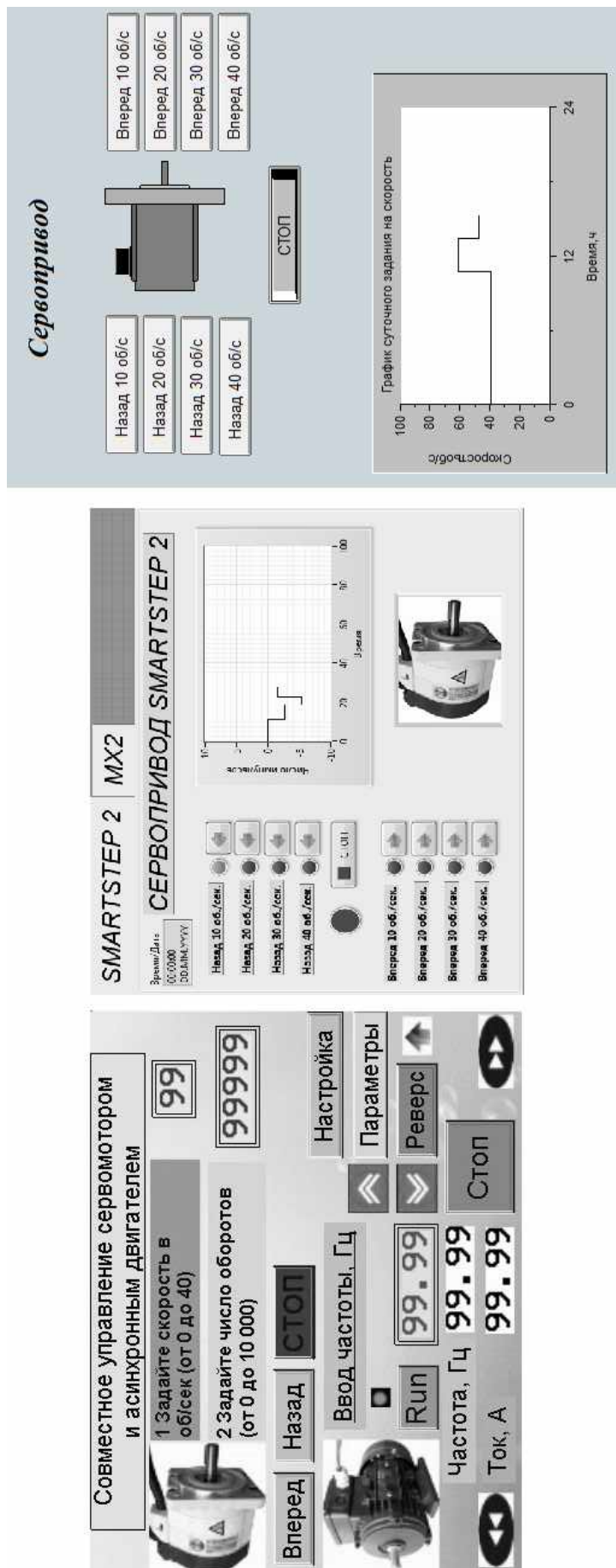


Рис. 2. Окна ЧМИ разработанных в различных программных средах (слева на право: NQ-Designer, CX-Supervisor, LabVIEW)

Завершающим этапом стало создание человеко-машинных интерфейсов для мониторинга и удаленного управления в программах DataDashboard, TeamViewer, RemoteControl. Первое из перечисленных приложений позволило создать систему мониторинга путем подключения к параметрам SCADA системы, транслируемым в локальную сеть.

Вторая программа не требует навыков программирования и осуществляет трансляцию окон управления электроприводами стенда на экран планшетного компьютера. Remote Control является разработкой компании TOOLS for SMART MINDS. Данное приложение является дополнением к программной среде LabVIEW. Оно позволило внедрить в систему функциональные блоки необходимые для работы программы на планшетном компьютере. Remote Control является новой и весьма перспективной разработкой для кросс-платформенных устройств. Примеры окон человеко-машинных интерфейсов планшетных компьютеров, разрабатываемых в перечисленных программах, приведены на рис. 3.

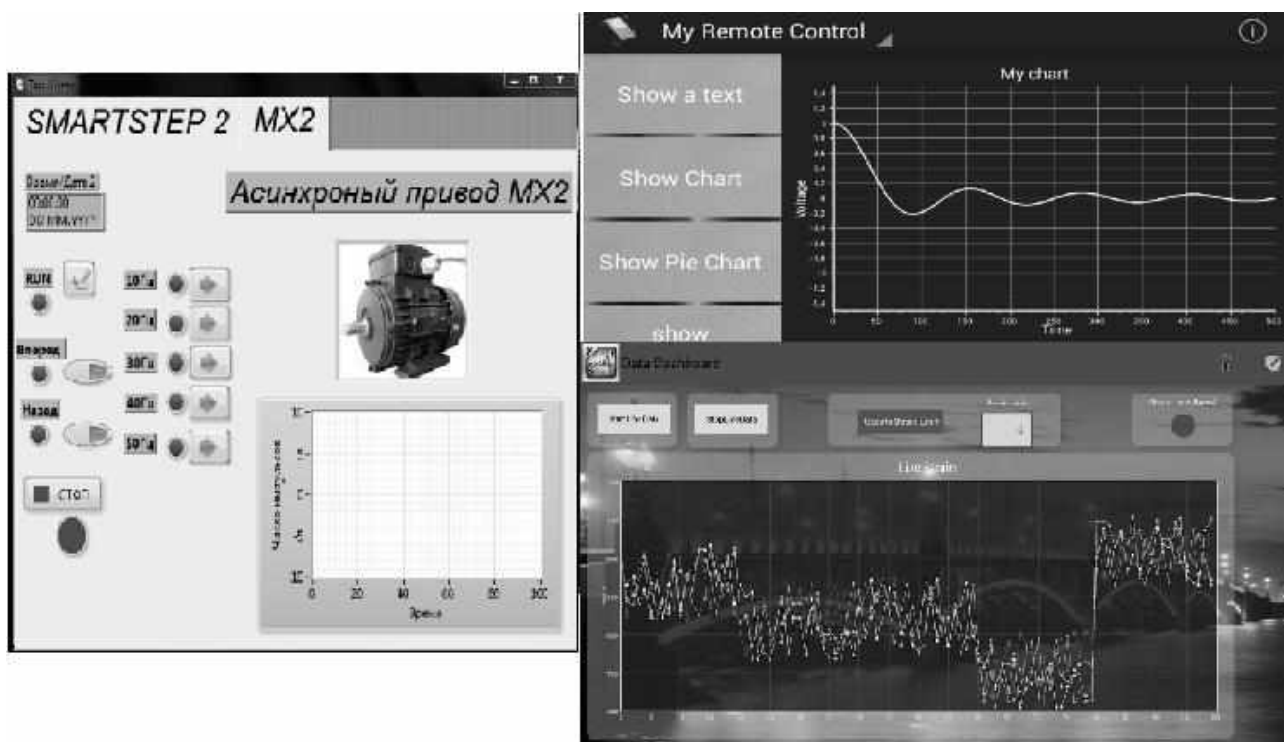


Рис. 3. Примеры окон ЧМИ реализованных в различных программах
(слева на право: TeamViewer, RemoteControl, DataDashboard)

На завершающем этапе работы были апробированы мониторинг и управление оборудованием стенда осуществляется через человеко-машинный интерфейс четырех устройств: операторская панель NQ5, ПК-сервер, ПК-клиент, планшетный компьютер. Данные устройства используют указанные в статье связи и соединяются с программируемым логическим контроллером, который управляет электроприводами стенда.

Приведенные в статье технические решения послужили основой для создания лабораторного стенда по изучению вариантов построения систем мониторинга и удаленного управления современным промышленным оборудованием. Применение рассмотренного приложения Remote Control для планшетных устройств значительно снизит затраты, на создание переносных устройств мониторинга и удаленного управления. Использование подобного оборудования позволит значительно сократить время наладки и ремонта автоматизированных линий производства. Большой функционал и точность работы SCADA систем позволяет прогнозировать и выявлять неисправные узлы на производстве, повышать качество выпускаемой продукции, сокращать затраты на обслуживающий персонал и повышать энергоэффективность технологического процесса.

Библиографический список

1. **Изерман, Р.** Цифровые системы управления / Р. Изерман. – М.: Мир, 1984. – 530 с.
2. OMRON Support [Электронный ресурс]. – Japan: OMRON, corp. 2007 – 2014. –Режим доступа: [http:// www.omron.com](http://www.omron.com)
3. Tools for smart minds Forum [Электронный ресурс]. –Italy: Tools for smart minds – Режим доступа: [http:// www.toolsforsmartminds.com](http://www.toolsforsmartminds.com)
4. Labview Forum [Электронный ресурс]. – USA: National instruments, corp. 2014 – Режим доступа: <http://russia.ni.com>

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

D.B. Kuritsyn, V.V. Sokolov

MONITORING AND REMOTE CONTROL OF MODERN INDUSTRIAL EQUIPMENT

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

The article gives an option to build a modern system of monitoring and remote control of electric drives within the laboratory stand. The functional scheme of stand is describing its constituent parts. Graphical interface of SCADA system has been designed. Options for remote control have been proposed for tablet PCs using of a wireless Wi-Fi network.

Key words: SCADA system, monitoring, technological process, programmable logic controller, remote control, human machine interface.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК: 620.172.21:669.017.16

С. К. Гребеньков¹, В. А. Скуднов², А. А. Шацов¹, Л.М. Клейнер³

ДЕФОРМАЦИОННОЕ УПРОЧЕНИЕ НИЗКОУГЛЕРОДИСТЫХ МАРТЕНСИТНЫХ СТАЛЕЙ СИСТЕМЫ Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb

Пермский национальный исследовательский политехнический университет¹,
Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева²,
ООО "КРАСС", г. Пермь³

Исследовано упрочнение низкоуглеродистых мартенситных сталей (НМС), склонных к структурной наследственности. Приведены микро- и тонкая структура термообработанных НМС, характеристики прочности, пластичности и вязкости. Образование и распад аустенита изучены методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК). Построены истинные диаграммы и модели деформирования. Рассчитаны численные показатели упрочнения для стадии равномерной и сосредоточенной деформации.

Ключевые слова: упрочнение, деформация, низкоуглеродистые мартенситные стали, структура, показатель упрочнения, коэффициент упрочнения, ДСК-кривые.

Введение

Низкоуглеродистые мартенситные стали (НМС) [1], обычно содержат менее 0,12 % С, легированы 1-3 % Cr, 1-2 % Mn, 1 % Ni и часто сильными карбидообразующими элементами. Добавки V, Nb и/или Ti способствуют росту отпускостойчивости и проявлению структурной наследственности [2]. НМС, при равной со среднеуглеродистыми сталями прочности, обладают вдвое более высокими характеристиками надежности [3].

Важной характеристикой стали являются параметры деформационного упрочнения. Оценить упрочнение материала на стадии равномерной деформации позволяет показатель деформационного упрочнения n уравнения Людвига-Холломома (1) [4]:

$$\sigma_W = K_L e^n, \quad (1)$$

где σ_W – истинное напряжение, МПа; K_L – коэффициент упрочнения, МПа; e – истинная деформация; n – показатель упрочнения.

Величину показателя упрочнения определяют микромеханизмы деформации и предыдущее упрочнение [5]. Другие важнейшие факторы, влияющие на показатель упрочнения: тип кристаллической решетки, состав, структура, температура, скорость нагружения, размер и морфология характерного элемента структуры – представлены в табл. 1.

Зависимость истинного напряжения от истинной деформации на стадии предразрушения хорошо описывает линейная зависимость (2)

$$\sigma_W = ae + b, \quad (2)$$

где a и b – коэффициенты линейного уравнения, МПа.

Упрочнение НМС, имеющих, главным образом, речечную структуру, мало изучено [10]. Структура альтернативных низкоуглеродистых кремний-марганцевых сталей (0.15 – 0.25% С), содержащих до 0.5% Al и другие сильные карбидообразующие элементы,

представляет собой смесь пакетного мартенсита и крупных включений α -фазы, близких по форме к пластинам [10]. Показатель упрочнения n сталей с речно-пластинчатой структурой [10] составил от 0,10 до 0,13. Существование высокотемпературной α -фазы, по форме напоминающей пластины, при содержании углерода на уровне 0.38% экспериментально доказано в работе [11].

Таблица 1

Сравнительные характеристики упрочнения материалов на стадии равномерной деформации

Материал	Кристаллическая решетка / структура	n
Сталь 10	ОЦК	0.3
Сплав алюминия Д1	ГЦК	0.5
Сплав алюминия А85 ($d=50$ мкм)	ГЦК	0.5
Сплав алюминия А85 ($d=0.5$ мкм)	ГЦК	0.07
Сплав циркония	ГПУ	0.2
Титан ВТ1-00 ($d<0.1$ мкм)	ГПУ	0.06
Сталь 10	Феррит	0.3
Сталь Х70 (12Г2СФТБ)	Феррит + сорбит	0.2
Сталь 42CrMo4 (40ХМ)	Феррит + сорбит	0.1
Сталь Х2CrNiMo18.12 (02Х18Н12М)	Аустенит + мартенсит (деформационное $\gamma - \alpha$ превращение)	0.36

Примечание: скорость деформации в интервале 0.25 – 5 мм/мин.

Для оценки поведения материала в реальных условиях нагружения, с учетом упрочнения, строят истинные диаграммы деформации "напряжение – деформация".

Цель работы: исследование деформационного упрочнения термообработанных НМС системы Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb на стадиях равномерной и сосредоточенной деформаций.

Методика эксперимента и исследования

Исследовали НМС системы Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb с повышенным содержанием углерода (табл. 2). Образцы для исследований изготовлены из прутка диаметром 110 мм (сталь 15Х2Г2НМФБА), и диаметром 90 мм (сталь 19Х2Г2НМФБА).

Таблица 2

Химический состав исследованных сталей

Условное обозначение стали	C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	Mo, %	V, %	Nb, %
15Х2Г2НМФБА	0.15	0.26	2.07	2.10	1.23	0.42	0.09	0.063
19Х2Г2НМФБА	0.19	0.21	2.02	2.16	1.22	0.41	0.09	0.056

Примечание: содержание Cu и Al составляло 0.02-0.05 %, S и P не более 0.025 %, H не более 1,5 ppm, N не более 0,011 %.

Термообработка сталей для проведения механических испытаний: закалка с температуры 980° С, выдержка 1 ч, охлаждение на воздухе и отпуск 250 °С 2 ч. Прутки поставляли в высокоотпущенном состоянии, 650 °С 4 ч.

Микроструктуру выявляли травлением микрошлифа 4%-ным раствором азотной кислоты в этиловом спирте и исследовали на микроскопе Neophot-32 при увеличениях до 2000 крат. Фотографирование структуры производили заменой одного окуляра микроскопа на специальную камеру Levenhuk С800 NG, 8М pixels, USB 2.0. Зеренную структуру изучали на шлифах методом окисления и последующего травления пикриновой кислотой.

Исследования тонкой структуры проводили на специальных фольгах при помощи просвечивающего электронного микроскопа ЭМ-125 (ускоряющее напряжение 100–125 кВ).

Микроскоп оснащен специальной цифровой камерой для вывода на экран монитора и сохранения на внешнем носителе изображения. Дополнительно исследования тонкой структуры проводились на просвечивающем электронном микроскопе JEM 200CX (ускоряющее напряжение до 200 кВ).

Рентгеноструктурный фазовый анализ (РСА) проводили на модернизированном дифрактометре ДРОН-3М при ускоряющем напряжении 30 кВ, силе тока 5 мА, использовали железное K_{α} излучение.

Температуру фазовых переходов, табл. 3 определяли методом дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) на приборе STA Jupiter 449 фирмы Netzsch. Нагрев и охлаждение образцов диаметром 4 мм и высотой 3 мм производились в атмосфере аргона со скоростью 10 °/мин.

Таблица 3

Температуры фазовых переходов

Обозначение стали	A_{C1} , °C	A_{C3} , °C	M_n , °C	M_k , °C
15X2Г2НМФБА	720	847	368	306
19X2Г2НМФБА	720	844	349	279

Примечание: температура аустенитизации 1000 °C.

Испытания на растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 1497–84 на машине Instron 300 LX. Использовали цилиндрические образцы тип III, номер 7. В процессе испытаний разрывная машина, оснащенная ПЭВМ со специальным программным обеспечением BlueHill2, записывает диаграммы деформации и рассчитывает характеристики механических свойств. Ударную вязкость определяли, согласно ГОСТ 9454–78, на маятниковом копре ИО 5003-0,3, образцы типа 11 с V-образным надрезом. Значения KCV, σ_b , σ_t , δ , ψ получали как среднее арифметическое по результатам испытаний не менее трех образцов, твердость измеряли по стандартной методике (ГОСТ 9013-59) по шкале HRC на твердомере тип ТК-2М (табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства исследованных сталей

Обозначение стали	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %	Ψ , %	KCV, Дж/см ²	HRC ₁	HRC ₂
15X2Г2НМФБА	1090	1350	16	65	95	40	23
19X2Г2НМФБА	1150	1440	18	61	85	41	24

Примечание: HRC₁ – твердость образцов по шкале Роквелла после закалки и низкого отпуска, HRC₂ – твердость образцов по шкале Роквелла, после закалки и высокого отпуска (состояние поставки).

Результаты

Методом РСА установлено, что на дифрактограммах присутствуют только пики, соответствующие α -фазе. Количество остаточного аустенита не превышало погрешности измерений (3 %).

ДСК анализ позволяет получать более точную и полную информацию по сравнению с ранее используемыми методами. Исследованиями установлено двустадийное образование аустенита при нагреве (рис. 1, а, в и рис. 2, а, в). Об этом свидетельствуют немонотонные участки кривой ДСК и ее первой производной.

При охлаждении с температуры аустенитизации 1100°C НМС 19X2Г2МНФБА существует два пика на кривой ДСК и ее первой производной (рис. 2, г) у стали 15X2Г2МНФБА локальный экстремум и перегиб кривой. Исходя из данных ДСК, можно предполагать выделение при охлаждении α -фазы двух морфологических типов.

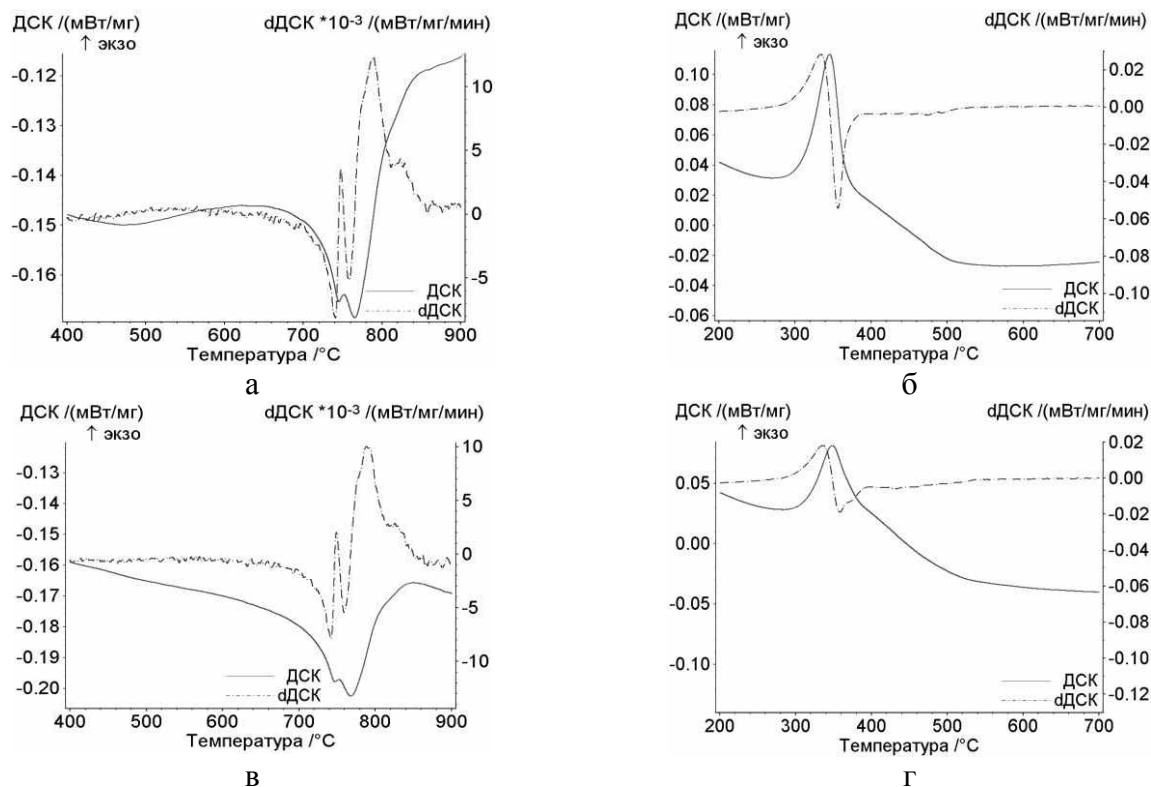


Рис. 1. ДСК кривые нагрева и охлаждения НМС 15Х2Г2МНФБА:
нагрев (а) и охлаждение (б) – 1000 °С, нагрев (в) и охлаждение (г) – 1100 °С

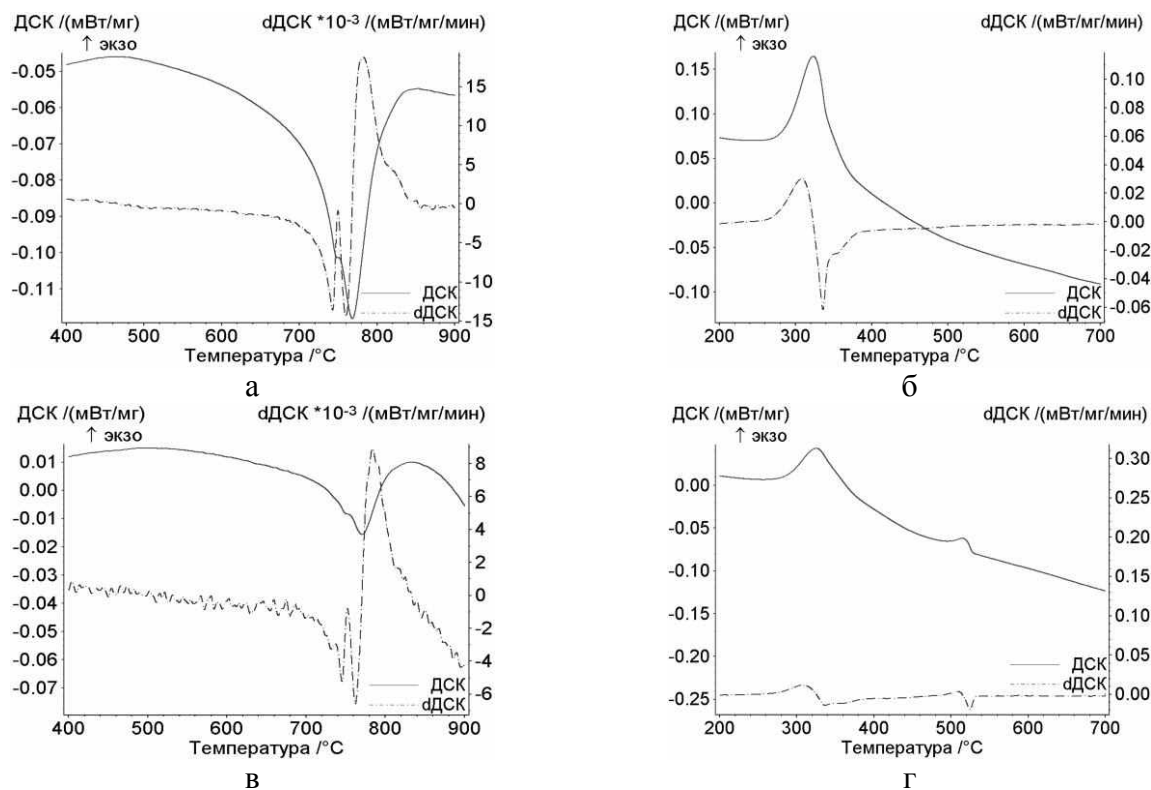


Рис. 2. ДСК кривые нагрева и охлаждения НМС 19Х2Г2МНФБА:
нагрев (а) и охлаждение (б) – 1000 °С; нагрев (в) и охлаждение (г) – 1100 °С

Средний размер зерна для обеих сталей – 17 мкм (рис. 3); в каждом зерне обнаруживали 4–6 пакетов мартенсита (рис. 4, а, б). Ширина рейки (рис. 4, в, г) составляет

200–300 нм. Отношение наибольшей и наименьшей полуосей рейки соответствует отношению $a:c =$ от 1:7 до 1:35 [12, 13].

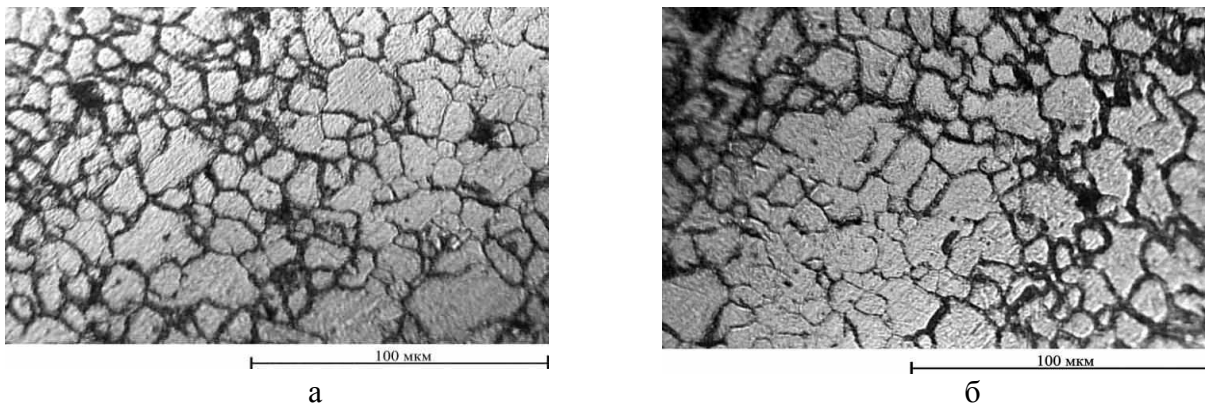


Рис. 3. Зеренная структура аустенита, х 500:
а – НМС 15X2Г2МНФБА; *б* – НМС 19X2Г2МНФБА

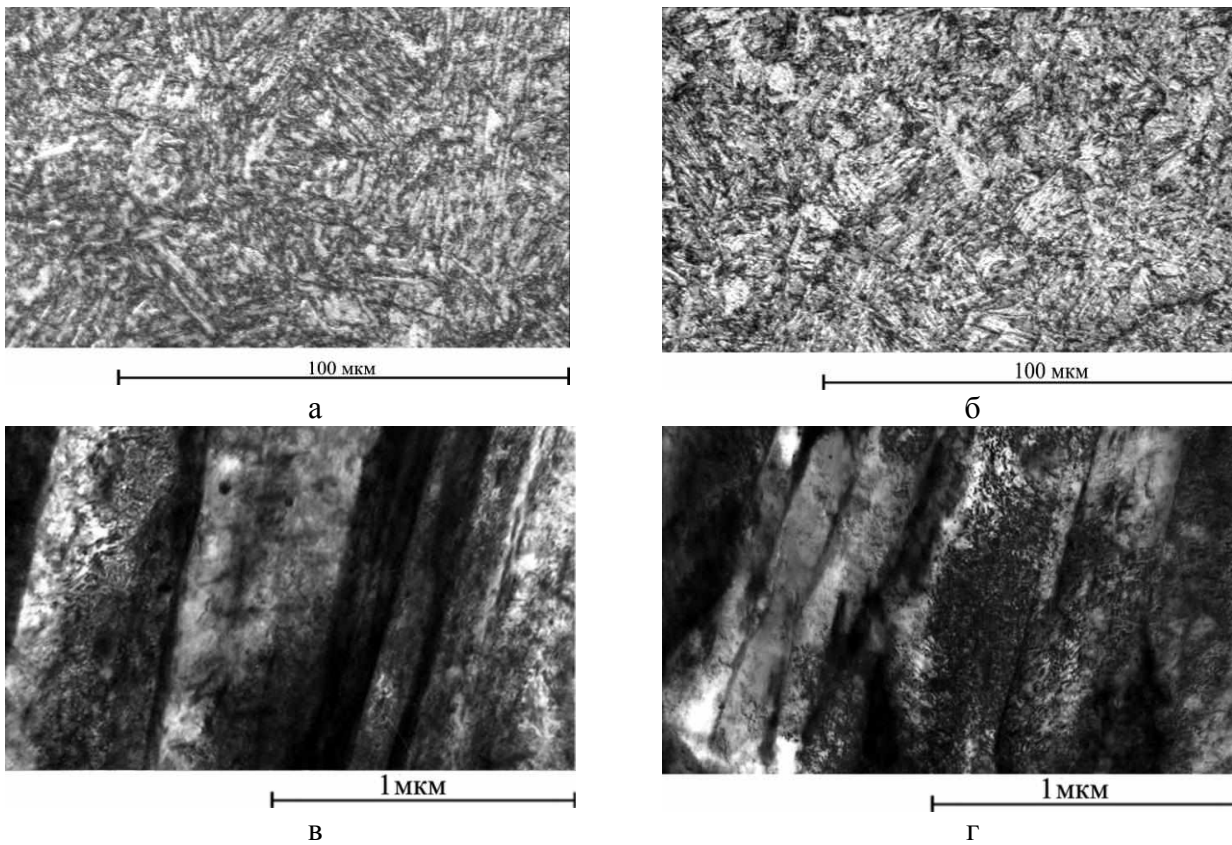


Рис. 4. Структура НМС:
а, б – микроструктура, х 500;
в, г – речная структура, х 30000;
а, в – НМС 15X2Г2МНФБА;
б, г – НМС 19X2Г2МНФБА
д – НМС 19X2Г2МНФБА,
 глобулярный мартенсит

Д

Структура обеих сталей – низкоуглеродистый пакетно-речный и/или речно-глобулярный мартенсит (рис. 4) с соответствующими такой структуре механическими свойствами (табл. 4). Количество глобулярной составляющей не превышало нескольких процентов и возросло при увеличении температуры закалки примерно до 5 %.

Ранее крупная, напоминающая по форме и размерам зерно высокотемпературная структурная составляющая была идентифицирована в низколегированных сталях с 0,3 % С и названа бесструктурным мартенситом [11].

Таблица 5

Характеристики деформационного упрочнения исследованных сталей

Обозначение стали	Равномерная деформация		Сосредоточенная деформация	
	K_L	n	a	b
15X2Г2НМФБА	1912	0,087	926	1362
19X2Г2НМФБА	2045	0,089	981	1504

Общий вид технических и истинных диаграмм "напряжение – деформация" для отпускоустойчивых НМС приведен на рис. 5.

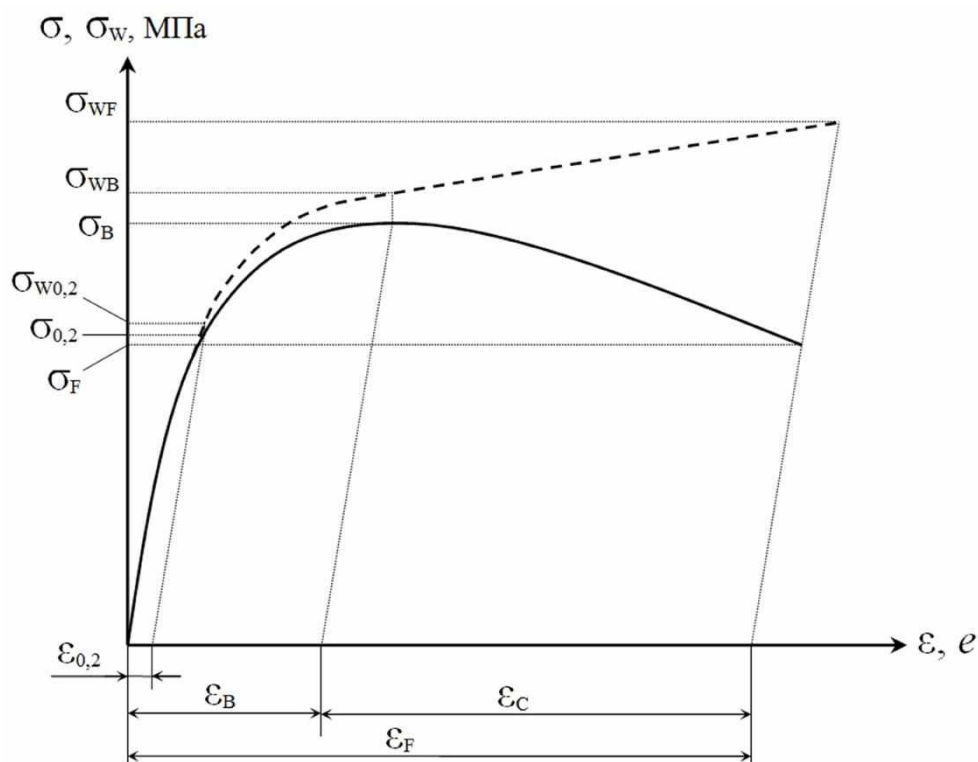


Рис. 5. Общий вид кривой растяжения отпускоустойчивых НМС:

$\varepsilon_{0,2}$ – деформация, соответствующая условному пределу текучести; ε_B – деформация, соответствующая условному пределу прочности; ε_C – величина сосредоточенной деформации; ε_F – полная деформация образца (предельная деформация до разрушения); $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести, МПа; σ_B – условный предел прочности, МПа; σ_F – условный предел прочности при разрушении, МПа; $\sigma_{w0,2}$ – истинная величина напряжений предела текучести, МПа; σ_{wB} – истинный предел прочности, МПа; σ_{wF} – истинное сопротивление разрушению, (истинный предел прочности при разрушении), МПа

Истинную диаграмму на стадии равномерной деформации (рис. 6) аппроксимировали уравнением (1) [4], а на стадии сосредоточенной деформации уравнением (2). Истинные значения напряжений и деформаций на стадии равномерной деформации находили из уравнений (3) и (4), а на участке сосредоточенной деформации – из выражений (5) и (6).

Показатели и коэффициенты, аппроксимирующих уравнений, полученных зависимостей приведены в табл. 5.

$$\sigma_W = \sigma(1 + \varepsilon) \quad (3) \quad e = \ln(1 + \varepsilon) \quad (4)$$

$$\sigma_W = \frac{\sigma}{1 - \psi} \quad (5) \quad e = \ln \frac{1}{(1 - \psi)} \quad (6)$$

где σ – технические напряжения, МПа; ε – техническая деформация; ψ – относительное сужение.

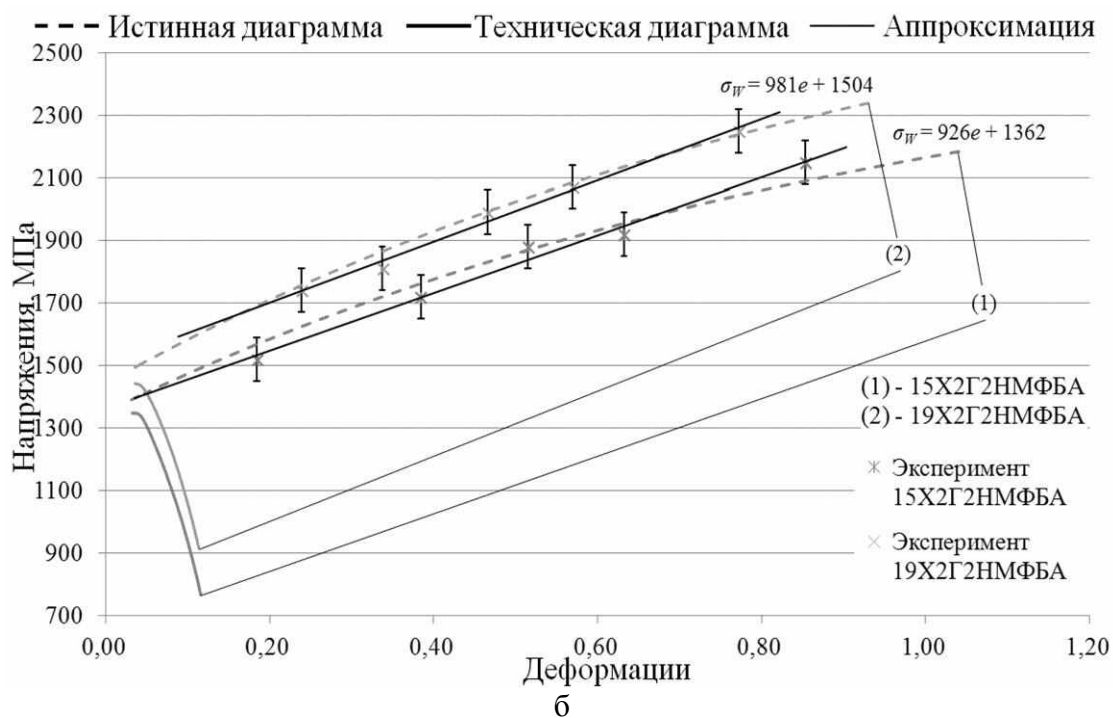
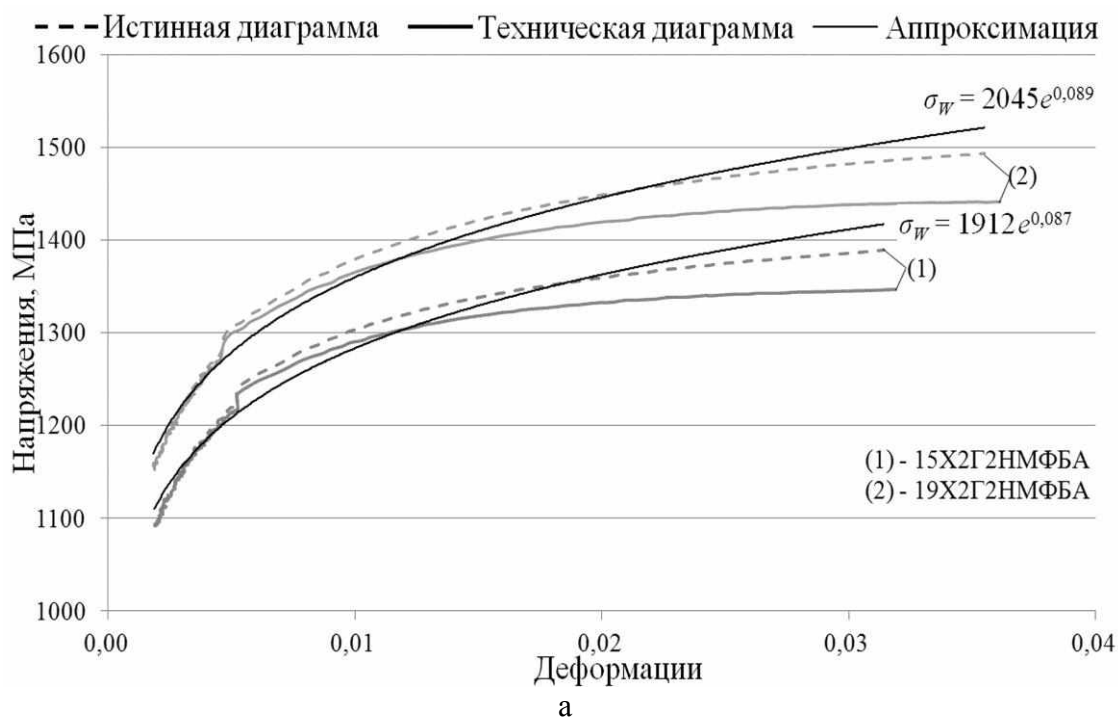


Рис. 6. Истинные диаграммы деформации сталей при растяжении:

а – равномерная деформация; *б* – сосредоточенная деформация

Для прогнозирования поведения исследованных сталей при нагружении были вычислены критерии энергоемкости при растяжении, определенные экспериментальным (7) и расчетным (8) методами, критерии зарождения (10) и распространения (11) трещины [14].

$$W_{CЭксп} = \frac{\sigma_{0,2} + \sigma_B}{2} \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right) \quad (7) \quad W_{CРасч} = \frac{\sigma_{0,2} + S_K}{2} \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right) \quad (8)$$

$$S_K = \frac{\sigma_{0,2}}{1-\psi} \quad (9)$$

$$K_{3,T} = \frac{W_C}{\sigma_{0,2}} \quad (10) \quad K_{P,T} = 0,75W_C\sigma_{0,2}, \quad (11)$$

где $W_{CЭксп}$, $W_{CРасч}$ – экспериментально определенные и вычисленные критерии энергоемкости при растяжении, МДж/м³; S_K – сопротивление разрушению; W_C – расчетные или экспериментально определенные значения энергоемкости при растяжении, МДж/м³; $K_{3,T}$, $K_{P,T}$ – критерии зарождения и распространения трещины при растяжении

Значения $W_{CЭксп}$, $W_{CРасч}$, $K_{3,T}$, $K_{P,T}$ сведены в табл. 6. Исходя из данных табл. 6 энергоемкость при растяжении НМС 15Х2Г2НМФБА несколько выше, по сравнению с 19Х2Г2НМФБА. Расчетные значения коэффициентов зарождения и распространения трещины во всех случаях выше у НМС 15Х2Г2НМФБА, экспериментальные значения коэффициента распространения трещины практически не отличались.

Таблица 6

Энергия деформирования и критерии зарождения и распространения трещины

Обозначение стали	W_C , МДж/м ³	$K_{3,T}$	$K_{P,T} \cdot 10^{-6}$
	Эксперимент (Расчет)		
15Х2Г2НМФБА	1280 (2211)	1,17(2,02)	1,05 (1,81)
19Х2Г2НМФБА	1221 (1933)	1,06 (1,68)	1,06 (1,67)

Таким образом, комплексные энергетические критерии дают новые представления о характере разрушения сталей: чем выше комплексные критерии, тем качественнее сталь, причем о ее работоспособности можно судить как с точки зрения зарождения трещин, так и их распространения: в технологиях обработки давлением важен критерий зарождения трещин, чем он выше, тем выше деформируемость; в эксплуатации изделий, чем выше критерий распространения трещин, тем выше износостойкость. Термическая обработка в зависимости от режима может изменять соотношение критериев между собой, что позволяет обоснованно назначать режим под решаемую задачу.

Сталь 15Х2Г2НМФБА по сравнению со сталью 19Х2Г2НМФБА имеет:

- более высокую энергоемкость (\approx на 5 %);
- более высокие значения критерия зарождения трещин, (\approx на 5 %);
- обе стали имеют примерно равные значения критериев распространения трещин;
- такие выводы о разрушении из сравнения механических свойств сделать невозможно, поскольку они характеризуют исходные дискретные свойства; физический смысл энергоемкости (W_C , МДж/м³) при растяжении качественно коррелирует с величинами ударной вязкости при ударном изгибе (KCU , KCV КСТ, МДж/м²), однако первая величина W_C отражает истинную работу разрушения структуры в объеме всего очага разрушения, тогда как величины KCU , KCV КСТ условны, так как отражают работу разрушения, условно отнесенную в площади 0,8 см² исходного образца, а не фактического очага разрушения; при этом не содержит размер глубины зоны пластической деформации при распространении трещины;
- значения критерия распространения трещин коррелируют со значениями твердости: поскольку твердость сталей одинакова и равна HRC 40-41 ед., то и значения $K_{P,T}$ равны.

Отсюда следует важный практический вывод: критерий зарождения трещин регламентируется предельной пластичностью – истинным сужением, а критерий распространения трещин – твердостью.

В табл. 7 приведены сравнительные характеристики механических свойств и критериев разрушения ряда конструкционных сталей для крепежных изделий, которые позволяют дать более полное обоснование выбора при их применении.

Таблица 7

Механические свойства и критерии синергетики у сталей (ГОСТ 10702-78)

Марка стали	Характеристики механических свойств и критерии синергетики						
	НВ	σ_B , МПа	σ_T , МПа	ψ , %	W_c , МДж/м ³	$K_{зт}$	$K_{р.т}$, (МДж/м ³) ² *10 ⁻⁶
10кп	114-143	300-320	250-260	60	409	1,6	0,78
20кп	132-163	360-380	270-280	50	286	1,04	0,58
20	132-163	340-440	270-350	50	322	1,04	0,75
12ХН	-	410-510	330-400	70	939	2,61	2,53
15ХГНМ	217	<490	<390	60	625	1,6	1,83
20Г2Р	187-197	480-510	380-400	65	727	1,84	2,15
30Г1Р	187-197	500-520	400-420	55	527	1,29	1,62
38ХА	187-207	<560	<450	60	722	1,6	2,43
38ХГНМ	169-235	560-620	450-500	50	494	1,04	1,76
40ХН2МА	269	<640	<510	50	530	1,04	2,02

На рис. 7, а, б [14] представлены обобщенные зависимости критериев разрушения для всех конструкционных сталей.

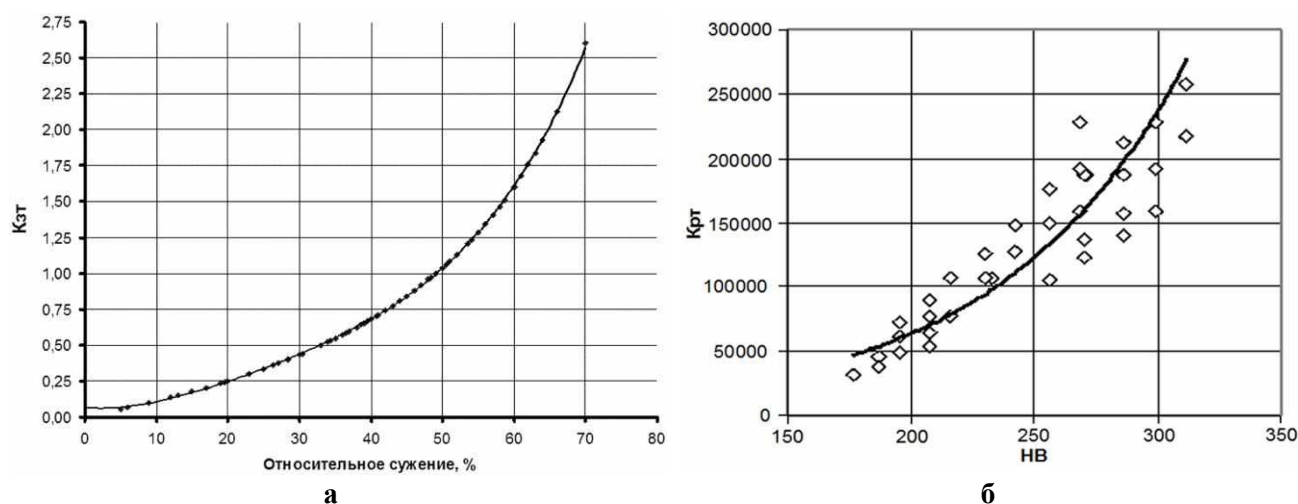


Рис. 7. Зависимость критерия зарождения трещин $K_{зт}$ от относительного сужения (а) и критерия распространения трещин $K_{р.т}$ от твердости (б)

Представленные критерии физически обоснованы и не противоречат принятым подходам к определению надежности материалов: безотказности, долговечности и др. При этом они адекватно и объективно описывают взаимодействие единого процесса «деформация – разрушение», идущего одновременно от момента приложения нагрузки до разрушения.

Выводы

1. Структура закаленных НМС, легированных сильными карбидообразующими элементами – речный мартенсит. Содержание остаточного аустенита менее 3 %, что соответствует чувствительности использованного дифрактометра.
2. Образование аустенита при нагреве НМС 15X2Г2НМФБА и 19X2Г2НМФБА включает две стадии. Превращение начинается сдвиговым путем и завершается диффузионным.
3. При охлаждении НМС со сравнительно высокой температуры аустенитизации в районе температуры 520 °С обнаружено появление высокотемпературной α -фазы – предположительно, глобулярного мартенсита – и расширение интервала мартенситного превращения.
4. Речная структура низкоуглеродистого мартенсита определяет низкие значения показателя деформационного упрочнения на стадии равномерной деформации и повышенную релаксационную способность НМС. Вычисленные значения характеристик упрочнения на стадии сосредоточенной деформации косвенно подтверждают высокую вязкость разрушения НМС системы Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb.
5. Рассчитанные и определенные экспериментально значения энергии деформирования, критериев зарождения и распространения трещин, которые позволяют комплексно оценить сложный процесс повреждаемости всех конструкционных сталей, на фоне которых показать достоинства новых закаленных низколегированных мартенситных сталей, имеющих высокие характеристики работоспособности изделий после операций отпуска.

Библиографический список

1. **Клейнер, Л. М.** Конструкционные высокопрочные низкоуглеродистые стали мартенситного класса / Л. М. Клейнер, А. А. Шацов. – Пермь : Изд-во Перм. гос. техн. ун-та, 2008. – 303 с.
2. **Югай, С. С.** Структурная наследственность в низкоуглеродистых мартенситных сталях / С. С. Югай, Л. М. Клейнер, А. А. Шацов, Н. Н. Митрохович // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 12. С. 24–29.
3. *Сталь на рубеже столетий* / под ред. Ю. С. Карабасова. – М. : Изд-во МИСиС, 2001. – 664 с.
4. *Статическая прочность и механика разрушения сталей* : сб. науч. тр. : [пер. с нем.] / под ред. В. Даля, В. М. Антона. – М. : Metallurgiya, 1986. – 566 с.
5. **Зуев, Л. Б.** Физика макролокализации пластического течения / Л. Б. Зуев, В. И. Данилов, С. А. Баранникова. – Новосибирск : Наука, 2008. – 327 с.
6. **Бочкарева, А. В.** Локализация пластической деформации и изменение скорости звука в материале с прерывистой текучестью : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / Бочкарева А.В. – Новокузнецк, 2009. – 18 с.
7. **Зуев, Л.Б., Данилов В.И.** Автоволновая модель деформации и разрушения // VI Российская научно-техническая конференция "Механика микронеоднородных материалов и разрушение". 24.05.2010 – 28.05.2010, г. Екатеринбург. – URL : <http://do.gendocs.ru/download/docs-147955/147955.doc>.
8. **Пшеничников, А. П.** Неустойчивость пластического течения в ГПУ сплавах циркония : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 01.04.07 / Пшеничников А.П. – Томск, 2010. – 18 с.
9. **Полетика, Т. М.** Закономерности потери устойчивости пластического течения в сплаве циркония / Т. М. Полетика, А. П. Пшеничников // Сб. ст. 15-й Зимней школы по механике сплошных сред. – Пермь, 2007. Т. 4. № 3. С. 97–100.
10. **Ooi, S. W.** Carbon enrichment in residual austenite during martensitic transformation / S. W. Ooi, Y. R. Cho, J. K. Oh, H. K. D. H. Bhadeshia // *Proceedings of International Conference on Martensitic Transformations (ICOMAT-2008)* ; ed. by G. B. Olson, D. S. Lieberman, A. Saxena. – TMS, Pennsylvania, USA, 2009. P. 179–185.
11. **Козлов, Э. В.** Эволюция фазового состава, дефектной структуры, внутренних напряжений и перераспределение углерода при отпуске литой конструкционной стали / Э. В. Козлов [и др.]. – Новокузнецк: Изд-во СибГИУ, 2007. – 177 с.
12. **Изотов, В. И.** Морфология и кристаллогеометрия речного мартенсита / В. И. Изотов // *Физика металлов и металловедение*. 1972. № 1. С. 123–132.

13. Структура и свойства перспективных металлических материалов / под ред. А. И. Потекаева. – Томск: Изд-во НТЛ, 2007. – 580 с.
14. **Скуднов, В. А.** Синергетика явлений и процессов в металловедении, упрочняющих технологиях и разрушении: учеб. пособие / В. А. Скуднов; НГТУ им. Р. Е. Алексеева. – Нижний Новгород, 2011. – 198 с.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2014*

S. K. Grebenkov¹, A.A. Shatsov², V.A. Skudnov¹, L.M. Kleiner³

**METAL SCIENCE, HEAT AND PLASTIC TREATMENT OF METALS
STRENGTHENING OF LOW CARBON
MARTENSITIC STEELS OF SYSTEM Cr-Mn-Ni-Mo-V-Nb**

Perm national research polytechnic university¹,
Nizhni Novgorod state technical university n.a. R.Y. Alexeev²,
ООО «Kross», Perm³

Investigated hardening of low-carbon martensitic steels are prone to structural heredity. Shown micro and fine structure of heat-treated steels, characteristics of strength and ductility. We construct the true curves of strain – stress diagram of experimental low carbon martensitic steels. Formation and decomposition of austenite were studied by differential scanning calorimetry (DSC). Built true "stress – strain" diagrams and models. Calculated numerical indicators for hardening stage uniform and concentrated deformation.

Key words: hardening, deformation, low-carbon martensitic steel structure component hardening, hardening coefficient, DSC-curves.

УДК 669.13:519.873

К.В. Макаренко

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕРНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ГРАФИТОВОЙ ФАЗЫ С ЦЕЛЬЮ ПОВЫШЕНИЯ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЧУГУНОВ

Брянский государственный технический университет

Представлена методика оптимизации структуры графитизированных чугунов с целью обеспечения в изделиях высокого уровня механических и эксплуатационных свойств. Методика основана на компьютерном моделировании структуры чугуна, при котором сочетание графитовой фазы и металлической матрицы рассматривается с позиции механики композиционных материалов. В статье представлены результаты использования методики для решения задачи повышения уровня прочностных свойств изделий из чугунов с шаровидным графитом.

Ключевые слова: чугун, графит, структура, моделирование, разрушение, механические свойства, прочность.

Введение

За рубежом последнее время широкое развитие получают методы компьютерного материаловедения, которые связывают в единую систему состав сплава, структуру, свойства и технологию [1, 2]. Наименее изученным в этой цепочке является звено структура → свойства, т.к. большинство предлагаемых компьютерных моделей строения материалов являются в значительной степени идеализированными, что часто приводит к неадекватным результатам сравнительной оценки экспериментальных и расчетных данных.

В отечественной металлографии применяется метод, в соответствии с которым структура конструкционных сплавов рассматривается с позиции строения композиционных материалов [3]. При таком подходе отдельные фазы и структурные составляющие, формирующие структуру сплава, обладают индивидуальными физико-механическими свойствами и размерно-топологическими характеристиками. Использование современных методов анализа микроструктуры материалов позволяет определить размерно-топологические характеристики отдельных фаз и составляющих структуры, а присваивание им соответствующих свойств и атрибутов позволяет, получить довольно точную компьютерную модель структуры сплава.

Размерно-топологические параметры структуры чугуна, такие как размер, форма, количество и распределение, характеризующие графитовую фазу, оказывают значительное влияние на свойства материала. Однако определение этих параметров в соответствии с методикой, представленной в ГОСТ 3443-87, в значительной степени зависит от человеческого фактора. Использование результатов такого анализа не позволяет создавать адекватные математические модели для оценки взаимосвязей структура – свойства. Широкое внедрение современных систем для компьютерного анализа структур материалов диктует новые требования к способам математического описания строения чугуна.

Большое разнообразие фаз и структурных составляющих металлической основы чугунов позволяет получать структуры с различной морфологией, обеспечивающей широкий диапазон механических и эксплуатационных характеристик. Наиболее высокими прочностными свойствами в настоящее время обладают чугуны с шаровидным графитом и аусферритной металлической матрицей [4].

Теоретический анализ

Изменение структуры чугуна в ходе реализации различных технологических операций происходят за счет протекания фазовых переходов. Оказывать воздействие на развитие процессов структурообразования можно за счет нескольких основных управляющих факторов, таких как легирование, модифицирование и скорость охлаждения.

С позиции теории систем процесс структурообразования чугуна можно рассматривать как динамическую систему, которая под воздействием управляющих факторов совершает движение из одного структурного состояния в другое. Структура определяет конечные свойства изделий из чугуна.

С позиции оценки внутренних процессов, протекающих в системе, они характеризуют изменение структуры под воздействием различных факторов и описываются фазовым составом $\sum R_s$, а также размерно-топологическими параметрами структуры чугуна D_l :

$$P(\tau) = f \left[\sum R_s(D_l), \tau \right], \quad (1)$$

где τ - время; $P(\tau)$ - функция, которая описывает внутреннее состояние системы в определенный момент времени. Функция $P(\tau)$ определяет закономерность происходящих событий при структурообразовании чугуна. Под событием подразумевается всякое структурное изменение состояния системы «чугун».

Изменения, происходящие в системе, можно оценить путем сравнения векторов, характеризующих развитие структурных превращений в различные моменты времени (в начальный τ и последующие $\tau + \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$)).

Фазовый состав $\sum R_s$ представлен синтезом различных фаз, которые присутствуют в определенный момент в чугуне. Размерно-топологический фактор D_l [3] определяется следующими характеристиками: характером взаимопроникновения фаз; относительным объемом; формой фаз; степенью их дисперсности; взаимной кристаллографической ориентацией фазовых выделений.

С позиции разработки эффективной стратегии управления процессами структурообразования необходимо, чтобы каждое последующее движение приближало систему к оптимальной заданной конечной структуре $Y(\tau_k)$:

$$\lim_{\tau \rightarrow \tau_k} P(\tau) = Y(\tau_k), \quad (2)$$

где τ_k – время, характеризующее конечную структуру чугуна, определяющую заданный уровень свойств чугуна в изделии.

Оптимизация конечной структуры $Y(\tau_k)$, с учетом выражения (2), в момент ввода изделия в эксплуатацию производится в соответствии с определенными критериями по схеме

$$Y(\tau_k) \rightarrow \max \sigma_i, \quad (3)$$

где σ_i – критерий оптимизации, характеризующий определенное свойство.

В случае многокритериальной оптимизации выражение (3) примет вид

$$Y(\tau_k) \rightarrow \max \sigma_i, \min \varphi_j, \dots \quad (4)$$

Помимо классической схемы оптимизации структуры чугуна, в рамках предлагаемого подхода могут быть реализованы и другие способы. Во-первых, при использовании стохастических методов оптимизации могут быть определены размерно-топологические параметры структурных составляющих нового типа чугуна, которые при оптимальном сочетании обеспечивают требуемый уровень свойств. Такой способ оптимизации может быть использован при разработке новых материалов, обладающих уникальными сочетаниями свойств. Во-вторых, с помощью процесса моделирования можно выявить наиболее слабые участки или элементы в структуре чугуна, которые оказывают негативное влияние на его свойства.

Экспериментальная часть

Проведем моделирование и оптимизацию структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом с целью обеспечения максимально возможного уровня прочностных свойств в изделиях.

Процесс оптимизации реализуется путем выявления ослабленных участков микроструктуры при моделировании испытаний для определения механических свойств материала. Теоретической основой оптимизации является компьютерный анализ изображения

микроструктуры в плоском напряженном состоянии с начальными условиями статического испытания упругопластического материала. Общая последовательность этапов моделирования структуры представлена в работе [5].

Первоначально обрабатываются фотографии микроструктуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом, который на данный момент характеризуются наиболее высокими прочностными свойствами в классе графитизированных чугунов. Анализ производится с целью определения влияния графитовых включений на прочностные характеристики чугуна. Для этого используем реальную микроструктуру высокопрочного чугуна (рис. 1, а). Далее, в соответствии с разработанным алгоритмом оптимизации, проводится идентификация графитовой фазы на изображении микроструктуры.

С учетом разупрочняющего воздействия, которое оказывают графитовые включения на механические свойства чугуна, являясь концентраторами напряжений в металлической матрице, получаем компьютерную модель микроструктуры, в которой графитовая фаза замещается перфорацией по форме, соответствующей конфигурации графитовых включений. После обработки изображения программными средствами металлическая матрица заменяется сеткой конечных элементов, при этом ей присваиваются свойства и атрибуты армо-железа, которые характерны для ферритной структуры чугуна (рис. 2, б). Полученная 2D-модель структуры чугуна подвергается моделированию испытаний на растяжение. В результате таких виртуальных испытаний микроструктуры чугуна получаем изображение, демонстрирующее распределение полей напряжений в плоском напряженном состоянии (рис. 2, в).

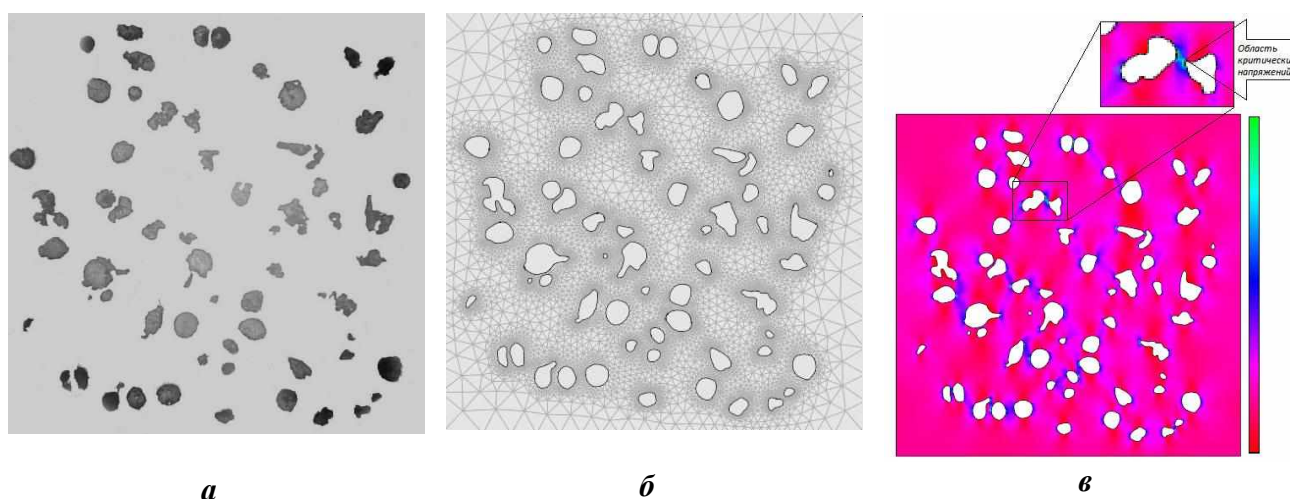


Рис. 1. Этапы моделирования структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом:
 а – исходная микроструктура (не травлено), $\times 100$; б – компьютерная модель исходной структуры;
 в – напряженное состояние модели исходной структуры

Для анализа оптимизации прочностных характеристик традиционно используется критерий главного критического напряжения, который позволяет оценить склонность материала к разрушению при одноосном растяжении:

$$\sigma_1 = \sigma_T, \quad (5)$$

где σ_1 – максимальное главное напряжение; σ_T – предел текучести матрицы.

В соответствии с этим критерием, разрушение материала происходит при достижении главным напряжением критического значения, равного пределу текучести при одноосном растяжении. Для более сложных испытаний и различных типов строения материалов могут быть использованы другие критерии, например, максимальной деформации, фон Мизеса, Цая-Хилла, Галилея-Ренкина, Кулона, Мора и др. [6].

Для оценки предела прочности группы сплавов, в которых деформация реализуется преимущественно путем сдвига, используем критерий фон Мизеса. С учетом того, что ис-

следует 2D-модель структуры, критерий определяется следующим уравнением:

$$\sigma_1^2 + \sigma_2^2 - \sigma_1 \sigma_2 = \sigma_T^2 \quad (6)$$

где σ_1, σ_2 – критические напряжения в двух взаимно перпендикулярных направлениях.

Динамическое состояние структуры материала $P(\tau)$ в общем случае может быть представлено уравнением (1).

С учетом представления структуры чугуна как композиционного материала, состоящего из графитовой фазы ($Гр$) и металлической матрицы ($М.м.$), уравнение (1) можно представить в следующем виде:

$$P(\tau_k) = f \left[Гр(D_\beta, A_{gp}, S_{gp}, \Lambda), М.м.(D_{М.м.}), \tau \right], \quad (7)$$

где параметры графитовой фазы: D_β – средняя фрактальная размерность, которая характеризует форму включений; A_{gp} – средняя площадь включения, геометрический аналог его размера; S_{gp} – площадь, занимаемая графитовой фазой на изображении, используется для определения количества графита в чугуне; Λ – лакунарность, которая характеризует неоднородность заполнения бинарного изображения микроструктуры чугуна пикселями, относящимися к графитовой фазе, используется для описания распределения; $D_{М.м.}$ – размерно-топологические параметры металлической матрицы. Более подробно с методикой расчета соответствующих параметров, характеризующих размерно-топологические характеристики графитовой фазы в чугунах, можно ознакомиться в работе [7].

К размерно-топологическим параметрам металлической матрицы относятся следующие характеристики: количество фаз; характер их взаимопроникновения; форма включений; степень дисперсности; относительный объем; взаимная кристаллографическая ориентация фазовых выделений и т.п. В первом приближении, матрицу чугуна можно представить как однородную фазу, при этом ее параметры сводятся к объему, который, при анализе плоского изображения микроструктуры, может быть определен как остаточная площадь:

$$S_{М.м.} = 1 - S_{gp}. \quad (8)$$

С точки зрения разработки эффективной стратегии управления процессами структурообразования, в чугунах необходимо, чтобы технологические факторы, дополнительно включаемые в существующий технологический процесс, приближали чугун к оптимальной структуре $Y(\tau_k)$:

$$\lim_{\tau \rightarrow \tau_k} P(\tau) = Y(\tau_k). \quad (9)$$

Исходя из критерия оптимизация (6), максимальные прочностные свойства в чугуне при оптимизированных параметрах графитовой фазы будут определяться физико-механическими характеристиками металлической матрицы, в частности значениями σ_T .

С учетом основной цели моделирования – повышения прочностных характеристик изделия из графитизированного чугуна перед вводом его в эксплуатацию $P(\tau_k)$ – процесс оптимизации структуры может быть представлен в виде следующего уравнения:

$$f \left[Гр(D_\beta, A_{gp}, S_{gp}, \Lambda), М.м., \tau_k \right] = \max(\sigma_T). \quad (10)$$

При оптимизации структуры материала данным способом используется принцип оптимальности Р. Беллмана [8], в соответствии с которым оптимальная технологическая стратегия обладает следующим свойством: каково бы ни было начальное состояние структуры чугуна $P(\tau_1)$ и первоначальная технология его производства, последующая стратегия должна изменять модель структуры чугуна таким образом, чтобы обеспечивать повышение его прочности. Достижение максимума прочностных характеристик при моделировании структуры чугуна соответствует оптимальному соотношению параметров графитовой фазы и получению $Y(\tau_k)$.

Анализ изображения плоского напряженного состояния позволил выявить части структуры материала, в которых, в соответствии с критерием (6), может произойти разрушение металлической матрицы (рис. 1, в).

Причины ослабления матрицы следующие: образование цепочек, состоящих из графитовых включений, отклонение их от идеальной сферической формы и значительные различия в размерах соседних включений. При этом размерный фактор оказывает наиболее существенное влияние. Графитовые включения, имеющие преобладающие размеры в сплаве, являются наиболее опасными концентраторами напряжений. Неравномерное распределение графитовой фазы, которое привело к образованию цепочек включений, связано с первичной кристаллизацией дендритов аустенита в доэвтектическом чугуна. В этом случае эвтектический графит, кристаллизующийся в последнюю очередь, располагается между дендритами, образуя кластерные цепочки, состоящие из нескольких включений. Анормальность формы графитовых включений в высокопрочном чугуна объясняется пониженным содержанием остаточной концентрации Mg после сфероидизирующего модифицирования.

Таким образом, оптимальная структура чугуна, которая обеспечивает изделиям высокие прочностные свойства, должна быть представлена включениями графитовой фазы одинакового (минимального) размера, идеальной сферической формы и равномерно распределенными в объеме материала.

Для оптимизации структуры чугуна с целью устранения возможных причин, приводящие к ослаблению металлической матрицы, производится совершенствование технологии, обеспечивающей получение требуемой структуры. При этом руководствуемся данными взаимосвязи управляющих факторов технологического процесса с параметрами графитовой фазы [9]. Результаты системного анализа, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Взаимосвязь параметров графитовой фазы с технологическими факторами, оказывающими влияние на ее формирование при кристаллизации чугуна

Морфологический параметр графитовой фазы	Геометрическая характеристика, характеризующая параметр, условное обозначение	Технологические факторы, влияющие на формирование параметров графита при кристаллизации чугуна
1	2	3
Форма	Средняя фрактальная размерность включений, D_β	Остаточное содержание Mg, Ce, S, Ti и др. элементов в чугуна
		Продолжительность выдержки расплава после сфероидизирующего модифицирования
		Технология модифицирования
		Масса отливки
Размер	Средняя площадь включений, $A_{зр}$, пкс.	Качество шихтовых материалов
		Содержание C, Si, Cu в чугуна
		Технология получения отливки
		Технология инокулирующего модифицирования
		Качество шихтовых материалов
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования
		Масса отливки
Количество	Содержание графитовой фазы на изображении, $S_{зр}$, %	Требуемая металлическая матрица
		Содержание углерода в чугуна
		Технология инокулирующего модифицирования
		Степень эвтектичности расплава
		Качество исходных шихтовых материалов
		Перегрев расплава в печи
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования

Окончание табл. 1

1	2	3
		Технологии энергетического воздействия на расплав: вибрация, ультразвук, эл. ток
Распределение	Лакунарность изображения, Λ	Степень эвтектичности расплава
		Технология инокулирующего модифицирования
		Величина переохлаждения и скорость охлаждения в период графитообразования
		Конфигурация и масса отливки
		Технологии энергетического воздействия на расплав: вибрация, ультразвук, эл. ток

Результаты

В усовершенствованном технологическом процессе для обеспечения оптимальных параметров структуры использовали чугун эвтектического состава. Для получения мелкодисперсной равномерно распределенной графитовой фазы в образцах из высокопрочного чугуна использовали технологию «синергетического» модифицирования [10]. Для устранения «наследственных» свойств чугунов производили перегрев расплава в сочетании с низкотемпературным двухступенчатым модифицированием, включающим сфероидизирующую и вторичную инокулирующую обработку расплава.

Результаты моделирования при плоском напряженном состоянии изображения микроструктуры высокопрочного чугуна с мелкодисперсной графитной фазой представлены на рис. 2. Химический состав исследованного чугуна с мелкодисперсным графитом, в % мас.: 3,2 C; 3,5 Si; 0,25 Mn; 0,5 Cu; 0,028 P; 0,013 S; 0,04 Mg.

Графитовая фаза в металлической матрице чугуна распределена равномерно, несмотря на то, что в отдельных областях наблюдаются цепочки, представленные кластерами графитовых включений (рис. 2, а). Особенно четко они проявляются в системе распределения линий пластической деформации. При изменении направления приложения нагрузки (рис. 2, в) возникают участки критических напряжений, которые в совокупности с цепочками графитовых включений образуют линии, по которым образуется трещина.

В структуре чугуна преобладают графитовые включения шаровидной и компактной формы, которые в меньшей степени, чем пластинчатый или вермикулярный графит, разупрочняют металлическую матрицу. Отдельные крупные включения шаровидной формы, встречающиеся в матрице чугуна, оказывают существенное влияние на процессы возникновения критических полей напряжений. В том случае, если направление приложения нагрузки к модели ориентировано по отношению к близлежащим мелким включениям графита, крупное включение способствует развитию критических напряжений в матрице чугуна (см. левый верхний угол рис. 2, б). Если в направлении приложения нагрузки около крупного графитового сфероида отсутствуют мелкие включения, его влияние на генерацию пиковых напряжений снижается.

При моделировании структуры графитизированного чугуна, полученной по технологии «синергетического» модифицирования, отмечается образование «сетки» полей напряжений, которые равномерно перераспределяют в структуре матрицы чугуна напряжения, которые возникают при растяжении (рис. 2, б, в).

Такое строение чугуна далеко от идеального, несмотря на то, что обеспечивает большую прочность материалу. В структуре такого чугуна также образуются цепочки, состоящие из графитовых включений, и возникают пиковые напряжения, что особенно четко проявляется при горизонтальном растяжении (рис. 2, в). Повышенная прочность чугуна с таким распределением графитовых включений обеспечивается большим многообразием путей вероятного образования трещины и перераспределением напряжений по всей матрице.

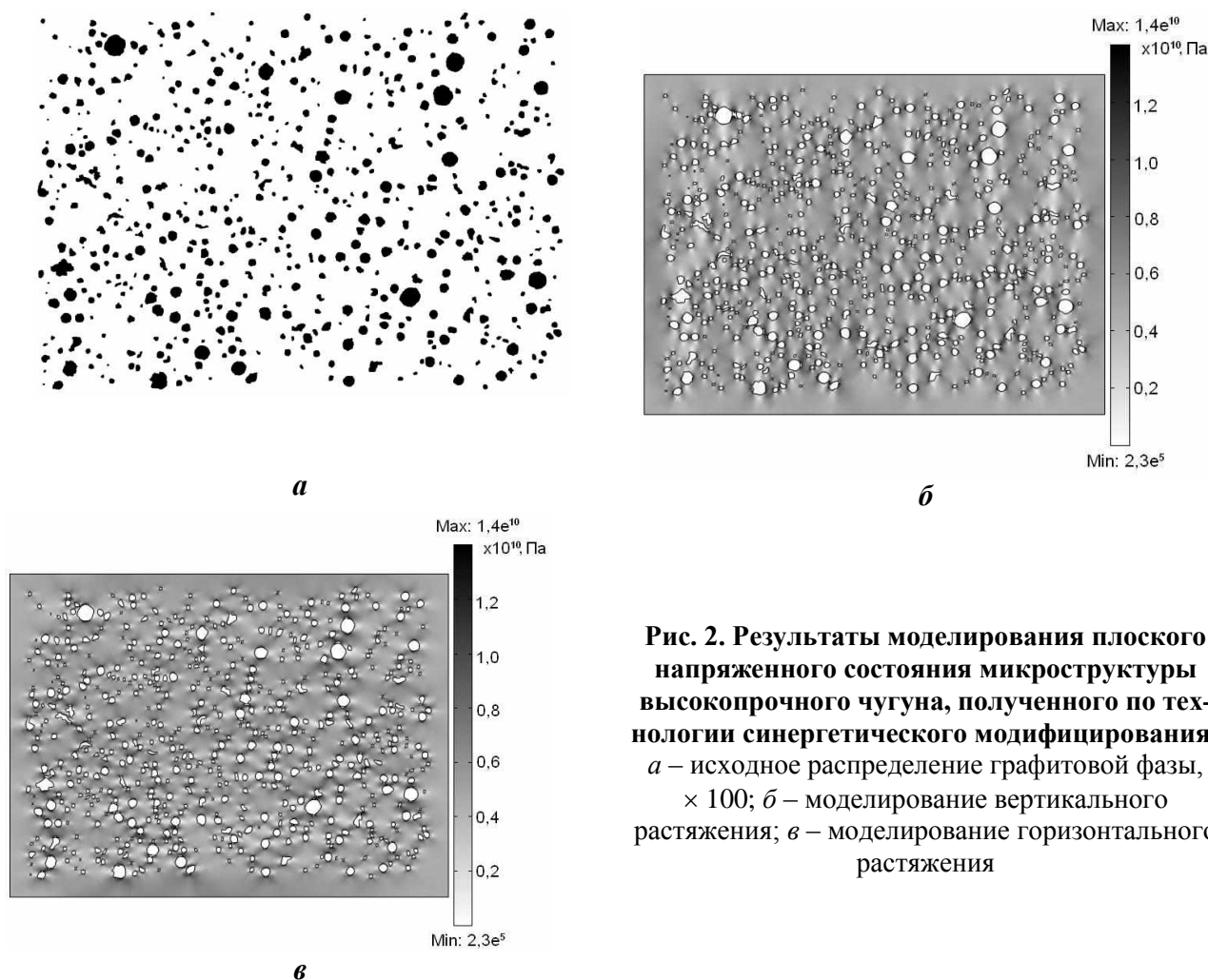


Рис. 2. Результаты моделирования плоского напряженного состояния микроструктуры высокопрочного чугуна, полученного по технологии синергетического модифицирования:
а – исходное распределение графитовой фазы, $\times 100$; *б* – моделирование вертикального растяжения; *в* – моделирование горизонтального растяжения

На данный момент из перечня металлических матриц, получаемых в высокопрочном чугуне, максимальный предел текучести соответствует структуре нижнего бейнита с минимальным содержанием остаточного аустенита ($\approx 20\%$), $\sigma_T = 1240$ МПа [11]. Такая структура может быть получена в результате изотермической закалки чугуна по следующему режиму: $T_{\text{аус}} = 900 - 950$ °С; $T_{\text{из.зак}} = 260 - 300$ °С.

Образцы чугуна, термически обработанные по представленному режиму, обладали следующими свойствами: $\sigma_B = 1500 - 1620$ МПа; $\sigma_{0,2} = 1220 - 1300$ МПа; 45 – 50 HRC; $\delta \approx 1 - 2,5\%$. Таким образом, используя методы компьютерного моделирования структуры чугуна и ее оптимизации, удалось повысить прочностные свойства изделий, путем направленного усовершенствования технологического процесса при обеспечении наиболее рациональных параметров графитовой фазы.

Выводы

1. Разработана методика оптимизации процессов структурообразования, протекающих в графитизированных чугунах. Использование данной методики позволяет целенаправленно управлять процессами структурообразования для обеспечения заданного уровня свойств в изделиях из графитизированных чугунов.

2. Разработаны компьютерные модели структуры графитизированных чугунов. Исследование разработанных моделей позволяет выявить и в последующем устранить слабые участки структуры материала.

3. Была определена взаимосвязь между размерно-топологическими характеристиками графитовой фазы технологическими факторами, оказывающими влияние на ее формирова-

ние при кристаллизации чугуна. С использованием разработанных технологий модифицирования были устранены ослабляющие участки в структуре графитизированных чугунов, что позволило обеспечить высокий уровень прочностных свойств в изделиях.

4. Использование разработанных методов позволило обеспечить в изделиях из высокопрочного чугуна более равномерного распределения графитовых включений и улучшить их геометрические параметры. Для точного описания размерно-топологических характеристик использовали методы, основанные на фрактальной геометрии.

Библиографический список

1. Advanced Computational Materials Modeling / Edited by Miguel Vaz Júnior, Eduardo A. de Souza Neto, and Pablo A. Munoz-Rojas. – Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2011. – 432 p.
2. Janssens, K.G. F. Computational Materials Engineering. An Introduction to Microstructure Evolution / K.G.F. Janssens, D. Raabe, E. Kozeschnik, M.A. Miodownik, B. Nestler. – Amsterdam, Boston, Heidelberg, London: Elsevier, 2007. – 344 p.
3. Прохоров, Н.Н. Физические процессы в металлах при сварке. Т. II. Внутренние напряжения, деформации и фазовые превращения / Н.Н. Прохоров. – М.: Металлургия, 1976. – 600 с.
4. Косников, Г.А. Аустемпированные чугуны с шаровидным графитом / Г.А. Косников, Л.М. Морозова // Литейное производство. 2013. № 12. С. 8 – 12.
5. Макаренко, К.В. Компьютерное моделирование и оптимизация структуры высокопрочного чугуна с шаровидным графитом // Вестник машиностроения. 2011. № 9. С. 69 – 73.
6. Мэттьюз, Ф. Композитные материалы. Механика и технология / Ф. Мэттьюз, Р. Ролингс. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
7. Макаренко, К.В. Фрактальный анализ структурообразования чугуна / К.В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 91 с.
8. Зайченко, Ю.П. Исследование операций / Ю.П. Зайченко. – Киев: Вища школа, 1975. – 320 с.
9. Макаренко, К.В. Системный анализ технологии производства отливок из чугуна / К.В. Макаренко. – Брянск: БГТУ, 2013. – 164 с.
10. Макаренко, К.В. Синергетический подход в разработке процесса измельчения графитных включений в высокопрочном чугуне // Литейное производство. 2008. № 6. С. 7 – 8.
11. Чугун: справочник / под ред. А.Д. Шермана, А.А. Жукова. – М.: Металлургия, 1991. – 576 с.

Дата поступления
в редакцию 01.03.2014

K.V. Makarenko

OPTIMIZATION DIMENSION-TOPOLOGICAL PARAMETERS OF GRAPHITE PHASE IN ORDER TO INCREASE MECHANICAL PROPERTIES OF CAST IRON

Bryansk State Technical University

Purpose: Develop a methodology for optimizing the dimension- topological parameters of graphite phase to improve the mechanical properties of the products of nodular cast iron.

Design/methodology/approach: The technique is based on the representation of the structure of cast iron as a composite material where the metal matrix and graphite phases have their own parameters. Modeling the structure of materials reveals weak points in the structure. By using the process, control factors can eliminate the defects of the structure material. To determine the dimension of topological parameters of graphite phase method using fractal image analysis of the microstructure of cast iron.

Findings: When using techniques developed with technological control parameters can be obtained from the product of cast iron with a given level of mechanical and performance properties.

Research limitations/implications: The technique can be used to optimize the structure of the various construction materials.

Originality/value: Approach in which the structure of the material is presented as a composite matrix borrowed from structural mechanics. Use it in conjunction with computer modeling opens up broad prospects for the development of new materials and technologies.

Key words: cast iron, graphite, structure, modeling, destruction, mechanical properties, strength.

УДК 539.4.013.3:669

В.В. Мыльников, М.В. Мыльникова, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, Е.С. Беляев

**АНАЛИЗ ИЗМЕНЕНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ
СТАЛЕЙ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ, ПРОТЕКАЮЩИХ НА ИХ ПОВЕРХНОСТИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрено влияние частоты изменяющихся циклов нагружения на структуру, прочность и долговечность конструкционных материалов в зависимости от физических процессов протекающих на их поверхности. Показано, что торможение дислокаций у препятствий в плоскостях скольжения осуществляется тем эффективнее, чем ниже энергия дефекта упаковки, следовательно, тем больше материал способен к деформационному упрочнению и сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации становится выше. Приведён сравнительный анализ изменения показателей сопротивления усталости сталей и титановых сплавов. Установлено, что у сталей увеличение частоты циклов нагружения приводит к заметному уменьшению наклона левой ветви кривой усталости, т.е. к улучшению сопротивления усталости в отличие от титановых сплавов, показывающих обратную зависимость.

Ключевые слова: частота циклов нагружения, сопротивление усталости, повреждаемость поверхности, пластическая деформация, энергия дефекта упаковки.

Многочисленные исследования по усталости металлов и сплавов не дают достаточной информации о природе и кинетике развития усталостного разрешения. В настоящее время не удается предвидеть всех сложных физических явлений, происходящих в материале деталей машин и конструкций. На прочность и долговечность металлов влияет большое количество факторов, одним из которых является частота циклического нагружения (ω). Существенным является изучение вопроса изменения прочности и долговечности металлов под влиянием фактора частоты циклов нагружения. Влияние частоты циклов нагружения (ω) неразрывно связано с поверхностными эффектами, происходящими в образцах (деталях), связь которых с показателями сопротивления усталости материалов является сложной.

Анализ опубликованных в научной литературе исследований как российских, так и зарубежных авторов, о влиянии частоты циклического нагружения на прочность и долговечность деталей машин и конструкций не дает исчерпывающей информации. Существует мнение, что изменение частоты не оказывает значительного влияния на сопротивление усталости материалов, хотя признается некоторая тенденция к увеличению сопротивления усталости материалов при увеличении частоты нагружения [1-3]. Недостаточность фундаментальных знаний о факторе частоты циклов объясняется в первую очередь сложностью физических процессов [3-5], происходящих в поверхностном слое металлов, и длительностью эксперимента.

Представляет интерес выявление закономерностей влияния частоты циклического нагружения на прочность и долговечность конструкционных материалов в зависимости от физических процессов протекающих на их поверхности.

В связи с этим, требуется более детальное изучение этого вопроса, поскольку при циклическом нагружении речь идёт о пластической деформации в поверхностных слоях.

Достаточно сложные явления, протекающие в поверхностных слоях образцов (деталей) при изменении частоты циклического нагружения, можно соотнести с представлением о суммарной деформации ϵ_{ω} , которая накапливается при усталостных испытаниях в поверхностных слоях. Она связывается с количеством циклов N и определяется углом наклона левой ветви кривой усталости α_{ω} . Эта связь в первом приближении может быть представлена как изменение суммарного накопления усталостных дефектов или повреждений решётки dZ :

$$dZ = dZ_1 - dZ_2, \quad (1)$$

где dZ_1 – увеличение плотности (количества) дефектов вследствие накопления суммарной деформации ε_ω ; dZ_2 – уменьшение плотности дефектов вследствие релаксации.

При этом вносится определённое допущение, связанное с тем, что релаксация напряжений не всегда связана с уменьшением концентрации дефектов. Например, в случае повторяющихся актов поперечного скольжения, возникающие в полосах скольжения интрузии приводит к увеличению вероятности разрушения тем в большей степени, чем больше энергия дефекта упаковки (γ) [6].

Конечное выражение этой зависимости представляется в виде соотношения

$$Z = Z^* (\varepsilon_\omega / \varepsilon_\omega^*)^{\beta - \alpha / \omega}, \quad (2)$$

связывающего суммарное повреждение Z с величиной суммарной деформации ε_ω и частотой циклов (ω), где $Z^* = Z$, а $\varepsilon_\omega^* = \varepsilon_\omega$ для одного цикла напряжения; β – зависит от рода вещества; α – видимо, должна возрастать с температурой, но уменьшаться с увеличением энергии дефекта упаковки.

Если считать, что между ε_ω и числом циклов до разрушения существует прямая пропорциональность, то, когда для достаточно низких гомологических температур (θ) отношение α/ω стремится к нулю, продолжительность испытаний определяется числом циклов. Напротив, при достаточно высоких θ величина Z обуславливается как ε_ω (или N), так и частотой ω , то есть с увеличением температуры величина накопленных напряжений, а следовательно, и продолжительность испытаний всё больше определяется не числом циклов, а временем, причём Z оказывается тем больше (время до разрушения тем меньше), чем больше частота циклов. Из уравнения (2) следует, что

$$\lg \varepsilon_\omega = \frac{\lg \frac{z}{z^*} + \left(\beta - \frac{\alpha}{\omega} \right) \lg \varepsilon_\omega^*}{\beta - \frac{\alpha}{\omega}}, \quad (3)$$

то есть увеличение частоты приводит в общем к снижению ε_ω (или N).

Однако при исследовании вопроса о влиянии частоты циклов на повреждаемость поверхности следует учитывать еще ряд обстоятельств. На «чистое» влияние ω , накладывается влияние ряда других факторов, например: природы материала, температуры и т.д. Следует рассматривать способность материала накапливать суммарную пластическую деформацию с увеличением числа циклов в зависимости от ряда обстоятельств [7]. Если материал неспособен накапливать достаточно большую суммарную деформацию ε_ω по причине своей природы, или из-за условий деформирования, или по той и другой причине одновременно, то даже при большой частоте ω , когда сопротивление деформации должно быть большим и упругие должны превалировать над разупрочнением, мы можем получить обратный эффект.

За характеристику материала можно принять энергию дефекта упаковки (γ). Энергия дефекта упаковки γ определяет сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации. Торможение дислокаций у препятствий в плоскостях скольжения осуществляется тем эффективнее, чем ниже энергия γ . Чем ниже γ , тем больше материал способен к деформационному упрочнению, сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации становится выше. Узкая дислокация имеет более высокую энергию дефекта упаковки – γ и движется в плоскости скольжения свободней, чем широкая дислокация с низкой γ . Узкая дислокация также более свободно совершает поперечное скольжение.

Следовательно, чем выше энергия дефекта упаковки, тем более превалируют эффекты разупрочнения над эффектами упрочнения и тем меньшее сопротивление оказывает среда прохождению физического процесса пластической деформации, путем скольжения расщепленных дислокации.

Таким образом, величина энергии дефекта упаковки определяет интенсивность поперечного скольжения, которое приводит к накоплению усталостных повреждений в полосах скольжения. Затем при остаточном разрыхлении полосы и при её соприкосновении с границей зерна в границе образуется надрыв, как следствие сдвига; и чем больше полос, тем больше надрывов и тем интенсивнее развитие трещины по границе. Последнее обстоятельство снижает параметры сопротивления усталости материала в виде увеличения наклона кривой усталости, приводящего к уменьшению количества циклов до разрушения.

В работе [6] параметр, определяющий сопротивление среды прохождению физического процесса пластической деформации, параметр упрочнения материала при скольжении расщепленных дислокации обозначен как K_{Ay} . Таким образом, $K_{Ay\gamma_1} > K_{Ay\gamma_2}$ при $\gamma_1 < \gamma_2$.

В условиях эксплуатации оборудования поверхностные слои материала деталей машин и элементов конструкций подвергнуты влиянию ряда факторов. Эти факторы влияют на параметр K_{Ay} . Помимо влияния энергии дефекта упаковки как характеристики природы материала, на параметр K_{Ay} оказывает влияние фактор частоты циклического нагружения. Изменение частоты циклов приводит к изменению скорости деформации поверхностных слоев, а это, как известно, приводит к изменению сопротивления деформации материала, т.е. оказывает прямое влияние на параметр K_{Ay} [8]. Поэтому скоростной эффект выражается при условии $\omega_2 > \omega_1$, когда напряжение σ_{ω_2} , всегда больше σ_{ω_1} , за исключением случаев, относящихся к деформационному старению. Причём скоростной эффект выражен тем сильнее, чем выше гомологическая температура испытания (θ).

Из всего изложенного следует, что частота циклов (ω) влияет на физические процессы, происходящие в поверхностном слое с аномальными свойствами конструкционных материалов и на показатели сопротивления усталости неоднозначно.

За показатели сопротивления усталости приняты: наклон левой ветви кривой усталости в координатах $\lg \sigma - \lg N$ ($\text{tg} \alpha_w$) и повреждаемость поверхности (Φ) [9-13].

Наклон $\text{tg} \alpha_w$ чутко реагирует на интенсивность процесса усталости, проходящего в конструкционном материале. В то же время параметр $\text{tg} \alpha_w$ коррелирует с образованием полос скольжения, возникающих на поверхности Φ материала при циклических нагрузках.

Воздействие нагрузки приводит к изменению структуры поверхностного слоя, что выражается в появлении так называемых полос скольжения, как уже упоминалось, по их количеству и форме, количеству зерен микроструктуры, поврежденных или затронутых полосами скольжения, ряду других количественных характеристик структуры материала можно судить о развитии физических процессов усталости в конструкционном материале. Характеристика Φ позволяет использовать её в качестве критерия для оценок прочности и долговечности материалов с момента изготовления детали.

Уравнения кривых усталости и характеристики высокопрочных сплавов полученные в работе [14] показаны в табл. 1. Сталь 30ХГСН2А показывает увеличение сопротивления усталости с ростом частоты циклов (ω) приложения нагрузки [15]. В табл. 1 при одинаковых пределах прочности это хорошо заметно. При самой высокой частоте ($\omega=50$ Гц) получается очень низкий наклон кривой усталости ($\text{tg} \alpha_w = 0,08723$) (табл.1), предел прочности при этом тоже выше, чем в предыдущих случаях. Однако следует иметь в виду, однозначной связи между пределом прочности и сопротивлением усталости нет.

Сталь Х15Н5Д2Т (ВНС-2) показывает результаты, аналогичные результатам стали 30ХГСН2А (табл.1).

Сплавы ОТ-4 и ОТ-4-1 показывают обратную картину, в сравнении с Х15Н5Д2Т и 30ХГСН2А, то есть с увеличением частоты циклического нагружения сопротивление усталости ухудшается, наклон, $\text{tg} \alpha_w$ растёт (табл. 1).

Анализ экспериментальных данных позволил получить численные значения различных параметров, связанных с изменением частоты циклов нагружения. Эти данные представ-

лены в табл. 2. Величины напряжений $\sigma_{N=10^6}$ в некоторых случаях условные, т.е. они получены путем продолжения левой ветви кривой усталости до пересечения с ординатой долговечности $N=10^6$ циклов. Есть такие случаи, когда излом кривой усталости соответствует долговечности $N < 10^6$ циклов, в этом случае показано два числа (табл. 2, №8).

Таблица 1

Уравнение кривых усталости и характеристики сплавов

Сплав	Уравнение кривых усталости	Температура испытаний, °С	Частота циклов, Гц	Предел прочности, МПа
30ХГСН2А	$\lg \sigma = 4,0779 - 0,3010 \lg N$	20	0,17	1800
	$\lg \sigma = 3,9821 - 0,3010 \lg N$		0,17	1280
	$\lg \sigma = 3,9239 - 0,2552 \lg N$		40,00	1800
	$\lg \sigma = 3,7682 - 0,2466 \lg N$		40,00	1280
	$\lg \sigma = 3,3432 - 0,08723 \lg N$		50,00	1500
Х15Н5Д2Т (ВНС-2)	$\lg \sigma = 3,8171 - 0,2430 \lg N$	20	25,0	1250
	$\lg \sigma = 3,4353 - 0,1358 \lg N$		46,7	1250
ОТ-4	$\lg \sigma = 3,8699 - 0,2684 \lg N$	20	25,0	792
	$\lg \sigma = 3,5154 - 0,2041 \lg N$		4,7	792
ОТ-4-1	$\lg \sigma = 3,5866 - 0,2219 \lg N$	20	37,0	722
	$\lg \sigma = 3,2607 - 0,1461 \lg N$		1,00	722

Таблица 2

Параметры сопротивления усталости в связи с изменением частоты циклического нагружения и пределом прочности материала

№ п/п	Материал	Частота циклов, ω , Гц	Показатель сопротивления усталости, $\text{tg} \alpha_w$	Напряжение, соответствующее долговечности $N = 10^6$ циклов, МПа	Предел прочности, σ_b , МПа	Отношение $\chi = \frac{\sigma_{N=10^6}}{\sigma_b}$
1	2	3	4	5	6	7
1	Сталь 30ХГСН2А	0,17	0,3010	275	1800	0,153
2	Сталь 30ХГСН2А	0,17	0,3010	235	1280	0,180
3	Сталь 30ХГСН2А	40,0	0,2552	265	1800	0,147
4	Сталь 30ХГСН2А	40,0	0,2466	200	1280	0,156
5	Сталь 30ХГСН2А	50,0	0,08723	635	1500	0,420
6	Сталь Х15Н5Д2Т	0,2	0,3521	115	1400	0,082

Окончание табл. 2

7	Сталь X15H5Д2Т	25,0	0,2430	230	1400	0,164
8	Сталь X15H5Д2Т	46,7	0,1358	400	1400	0,286
				435*)		0,310*)
9	ОТ-4	25,0	0,2684	280	792	0,350
10	ОТ-4	4,7	0,2041	295	792	0,370
11	ОТ-4-1	37,0	0,2219	240	722	0,230
12	ОТ-4-1	1,0	0,1461	240	722	0,230

Примечание: * число в знаменателе получено путем условного пересечения левой ветви кривой усталости с ординатой долговечности $N = 10^6$ циклов.

Таким образом, в ряде случаев частота циклов нагружения (ω) оказывает существенное влияние на физические процессы, происходящие в поверхностном слое и на показатели сопротивления усталости. Установлено, что у сталей увеличение частоты циклов нагружения и, в дополнение к этому, смягчение схемы напряженного состояния приводит к заметному уменьшению параметра $\text{tg } \alpha_w$, т.е. к улучшению сопротивления усталости (а стало быть, и на предел усталости) в отличие от титановых сплавов (табл. 2). Улучшение параметра сопротивления усталости связано с повышением упрочняемости материалов поверхностных слоев образцов (деталей), что снижает усталостную повреждаемость собственно поверхности. Титановые сплавы (табл. 2) с увеличением частоты циклического нагружения показывают противоположную картину, т.е. разупрочняются. Однако следует иметь в виду, что параметр $\text{tg } \alpha_w$ напрямую связан с повреждаемостью поверхности (Φ) и в обеих группах металлических сплавов рост показателя (Φ) приводит к увеличению $\text{tg } \alpha_w$ (рис. 1).

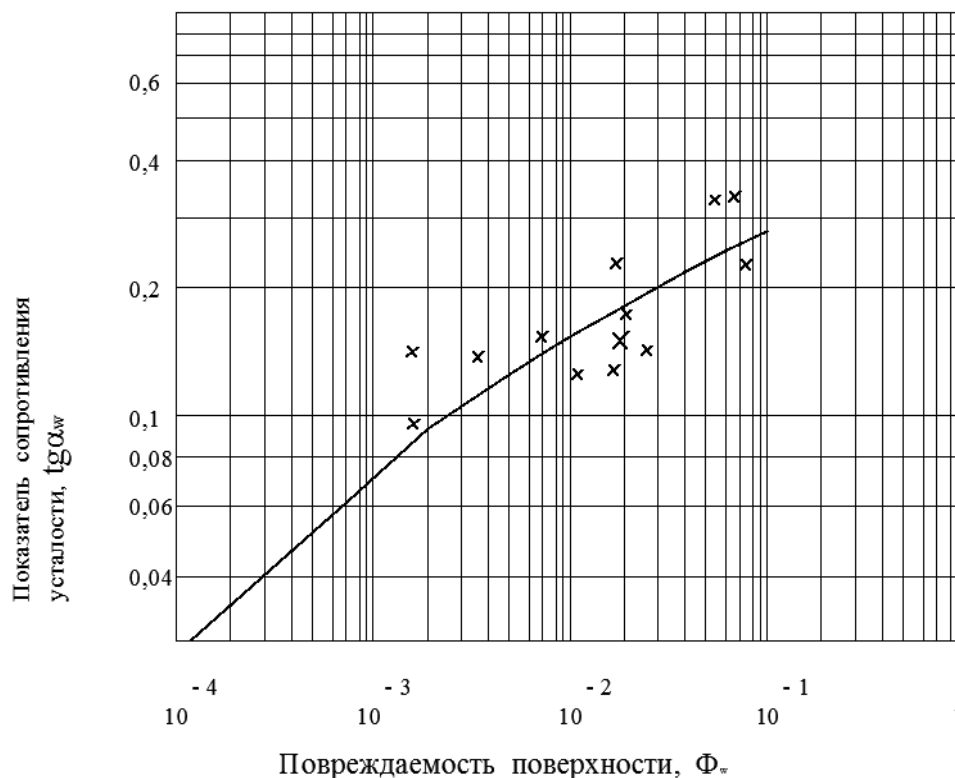


Рис. 1. Зависимость показателя сопротивления усталости ($\text{tg } \alpha_w$) от повреждаемости поверхности (Φ) ряда конструкционных материалов

Библиографический список

1. Механика разрушения и прочность материалов: справ. пособ. / под ред. В.В. Панасюка. Усталость и циклическая трещиностойкость конструкционных материалов / О.Н. Романив [и др.]. – Киев: Наукова думка, 1990. Т. 4.
2. R.W.K. Honeycombe. The Plastic Deformation of Metals. London: Edward Arnold Ltd., 1984.
3. **Трошенко, В.Т.** Прочность металлов при переменных нагрузках / В.Т. Трошенко. – Киев: Наук. думка, 1978. – 176 с.
4. **Готтштайн, Г.** Физико-химические основы материаловедения: [пер. с англ.] / Г. Готтштайн; под ред. В.П. Зломанова. – М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2011. – 400 с.
5. **Владимиров, В.И.** Физическая природа разрушения металлов / В.И. Владимиров. – М.: Металлургия, 1984. – 280 с.
6. **Мыльников, В. В.** Исследование повреждаемости поверхности чистых металлов с учетом частоты циклического нагружения / В. В. Мыльников, Д. И. Шетулов, Е. А. Чернышов // Известия вузов. Цветная металлургия. 2013. №2. С. 55-60.
7. **Мыльников, В.В.** Анализ влияния частоты циклов нагружения на суммарную пластическую деформацию металлических материалов / В.В. Мыльников, И.И. Рожков, А.И. Пронин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 228–229.
8. **Мыльников, В.В.** Температурно-скоростные зависимости сопротивления деформации некоторых чистых металлов / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов // Литейные процессы. 2012. № 11. С. 124–132.
9. **Шетулов, Д.И.** Усталостная повреждаемость высокопрочных сталей / Д.И. Шетулов, В.В. Мыльников // Металлы. 2014. № 2. С. 81-86.
10. **Шетулов, Д.И.** Связь сопротивления циклической нагрузке с повреждаемостью поверхности металлов // Изв. Академии Наук. Металлы. 1991. № 5. С. 160.
11. Mylnikov V.V., Shetulov D.I., Chernyshov E.A. Variation in factors of fatigue resistance for some pure metals as a function of the frequency of loading cycles // Russian Journal of Non-Ferrous Metals. 2010. Т. 51. № 3. С. 237-242.
12. **Мыльников, В.В.** Зависимость сопротивления усталости конструкционных материалов от частоты циклического нагружения / В.В. Мыльников, Д.И. Шетулов, Е.А. Чернышов, А.И. Пронин // Технология металлов. 2013. № 9. С. 30–37.
13. **Мыльников, В.В.** О корреляции показателей сопротивления усталости стали 6ХС / В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов, А.И. Пронин // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2013. № 10-2. С. 227-228.
14. **Мыльников, В.В.** Влияние частоты циклического нагружения на сопротивление усталости высокопрочных конструкционных материалов / В.В. Мыльников, Е.А. Чернышов, Д.И. Шетулов // Заготовительные производства в машиностроении. 2009. №2. С. 33–36.
15. **Мыльников, В.В.** Связь параметра сопротивления усталости с повреждаемостью поверхности стали 30ХГСН2А // Сборник научных трудов Sworld. 2012. Т. 10. № 3. С. 56–61.

*Дата поступления
в редакцию 10.06.2014*

V.V. Mylnikov, M. V. Mylnikova, E.A.Chernyshov, D.I. Shetulov, E.S. Belyaev

**THE ANALYSIS OF CHANGE OF INDICATORS OF FATIGUE RESISTANCE
OF STEELS AND TITANIUM ALLOYS, DEPENDING ON PHYSICAL PROCESSES
OCCURRING ON THE SURFACE**

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

The influence of frequency-changing cycles of loading on the structure, strength and durability of structural materials, depending on physical processes on their surface. It is shown that the inhibition of dislocations at obstacles in the slip planes is the better, the lower the stacking fault energy, therefore, the more material is able to deformation hardening and environment resistance to the passage of the physical process of plastic deformation becomes higher. The comparative analysis of the changes in the indices of fatigue resistance of steels and titanium alloys. It was established that steels the increase in the frequency of loading cycles leads to a noticeable decrease in the slope of the left branches of the curve, i.e. to improve the fatigue resistance unlike titanium alloys, showing an inverse relationship.

Key words: frequency of loading cycles, fatigue resistance, surface damaging, plastic deformation, stacking fault energy.

УДК:669.620.14.0.18.44

В.А. Скуднов¹, С.В. Харитонов²**СТРУКТУРА И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЭЛИНВАРНОГО СПЛАВА 44НХТЮ И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ЦЕЛЬНОГО ГИРОСКОПА ИЗ ОДНОЙ ЗАГОТОВКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ОАО «Арзамасское научно-производственное предприятие «ТЕМП-АВИА»»

Содержит результаты исследования структуры (фазового состава, величины зерна, физико-механических свойств (упругих модулей, плотности, показателей прочности, пластичности, элинварного сплава 44НХТЮ, релаксационной способности и др.) после 12 режимов комплексной термической (закалки, старения-основного, стабилизирующего, для снятия напряжений), электроэрозионной обработки чувствительного элемента в цельном корпусе гироскопа, выполненного из одной заготовки. Результаты получены микроструктурным, электронноскопическим, рентгеноструктурным, ультразвуковым резонансным, механическими методами испытаний при температурах от +100⁰ до – 60⁰ С на образцах и натуральных перемычках, подтвердивших требуемую работоспособность изделия на промышленных стендах предприятия.

Ключевые слова: сплав 44НХТЮ, термообработка, структура, механические свойства, , цельный корпус, технология, гироскоп.

Актуальность проблемы. Гироскопы предназначены для высокоточного наведения управляемых объектов при удержании неизменного положения собственной оси вращения относительно инерциального пространства путем противостояния действиям вредных моментов от различных энергий (механической, вибрационной, ударной, тепловой, электромагнитной) при эксплуатации в жестких условиях: (широкополосная случайная вибрация (ШСВ) со среднеквадратичным ускорением $\varepsilon = 13g$ при частотах $\Delta f = 20 - 20000$ Гц; при ударах и виброударах с ускорениями до 80 g) Требуемая стабильность работы в течение 12-13 лет должна обеспечиваться сохранением элинварных свойств в диапазоне температур от -60⁰ до 85⁰С, при динамических нагрузках и др. Поэтому к надежности структуры, физико-механическим свойствам материала упругих элементов и всей конструкции в целом предъявляются высокие требования.

Сегодня основное требование состоит в том, чтобы перейти от сборных конструкций гироскопов к цельной, выполненной из одной заготовки. Решение такой сложной задачи потребовало создание новой комплексной технологии изготовления, включающей выбор элинварного материала, режимов термической обработки, создающих гарантированную структуру и соответствующие физико-механические свойства в диапазоне указанных температур и динамических скоростей нагружения, применения автоматизированной электроэрозионной обработки для выполнения тонких крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм с одинаковой шероховатостью их поверхностей, выполненных в цельном корпусе гироскопа, Применяемые ранее материалы бронза БрБ2, 36НКВХБТЮ-ВИ и др. и технологии их обработки имели ряд недостатков: высокие температурный коэффициент модуля упругости (ТКМУ), несовершенство процессов механической обработки, сборка с применением ручных операций, низкий процент выхода годных изделий, низкая производительность труда. Поэтому создание корпуса гироскопа с новым чувствительным элементом из элинварного сплава представляет сложную научно-техническую задачу, при решении которой металлургические аспекты оказались первичными, поскольку структура сплава дисциплинирует работу конструкторов, технологов, производство и надежность изделия в целом.

Материал и методика исследований. Для изготовления новой конструкции гироскопов типа РВГ-МХ, РВГ-7 выбран высокотехнологичный элинварный дисперсионно-

твердеющий железоникелевый сплав 44НХТЮ аустенитного класса, сохраняющий температурную стабильность модуля упругости во всем эксплуатационном интервале температур. Гироскопы данного типа являются гироскопами с внутренним кардановым подвесом, в качестве рабочих элементов которого используются упругие торсионы. Для минимизации «вредных» моментов, создаваемых упругими силами подвеса, необходимо уменьшать толщину его элементов, но без снижения прочности материала. Поэтому достижение баланса прочности, структуры, эливарности свойств, размеров в новой технологии изготовления чувствительного элемента гироскопа явилось актуальной задачей для обеспечения его надежности.

Цель работы: разработка оптимального структурно-энергетического состояния эливарного сплава 44НХТЮ и создание новой комплексной технологии изготовления чувствительных упругих элементов в цельной конструкции гироскопов типов РВГ-1МХ, РВГ-7 с использованием технологий термической, пластической, механической, электроэрозионной и контрольных обработок, отвечающих требованиям ТУ к изделию.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выбор современных методов исследования: оптическую и растровую микроскопию, фрактографию изломов, рентгеновские, релаксационные, акустические, механические и другие для изучения структуры (величины и однородности зерен, интерметаллических включений), фазового состава сплава 44НХТЮ после каждой стадии обработки для установления оптимального состояния.

2. Исследование и изучение:

- влияния термической (режимов закалки, старения, отпуска), пластической, электроэрозионной обработок на структуру, механические, акустические свойства, микропластичность, фазовый состав, плотность сплава 44НХТЮ в последовательности выбранного маршрута изготовления упругого элемента в виде крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм, шириной 0,12 мм в цельной заготовке.
- влияния толщины перемычек, низких температур, динамических нагрузок на предельные механические характеристики, работу характер разрушения, фрактографии изломов сплава;
- релаксационных свойства сплава в различных структурных состояниях в последовательности прохождения операций термической и пластических обработок, влияющих на временную стабильность структуры при разных нагрузках, отвечающих условиям эксплуатации гироскопа.
- характера разрушения крестообразных перемычек, являющихся упругими элементами натуральных гироскопов при специальном разрыве их конструкции.

3. Разработка и освоение на предприятии новой технологии получения оптимального структурно-энергетического состояния и контроля физико-механических свойств сплава 44НХТЮ, организации серийного производства качественных чувствительных элементов гироскопов новой конструкции из одной заготовки, работоспособность которых подтверждена на промышленных стендах предприятия, а также при эксплуатации изделия.

Методы и объекты исследования: статические и динамические механические испытания на растяжение при температурах от 20⁰ до -60 С по ГОСТ 1497 цилиндрических образцов, (тип 3, $d = 6$ мм) растяжение специальных плоских образцов с соотношением ширины и толщины от 1 до 100 на машине УМЭ-10ТМ, фрактография изломов специальных плоских образцов, а также образцов по ГОСТ 1497 (тип 3, режим 4-2.); измерения твердости на приборе Бринелля; динамические испытания на растяжение цилиндрических образцов при низких температурах до -60⁰С на копке МК-30, оснащенной автономной охлаждающей камерой и специальным устройством для закрепления образцов в маятнике; оптическая (микроскопы МБС-10 (x100), МИМ-7(x200-360), растровая микроскопия (РЭМ SAMSUNG SEM15 (x600...1600) изломов образцов и натуральных чувствительных элементов; измерения релаксации напряжений на цилиндрических образцах $d = 6$ мм, $h = 3$ мм, на машине высокой жесткости (релаксометре) с шагом нагружения 20 Мпа и временем релаксации 120 с с записью

диаграмм на программном комплексе АУР 1; рентгеновский фазовый анализ на установке ДРОН-2 (материал анода – Fe; напряжение $U = 25$ кВ; сила тока $I = 0,5$ мА; используемые щели 1 мм и 2 мм), измерение упругих модулей акустическими волнами резонансной частоты на специальной установке «Астрон» (образцы $d = 15$ мм, $h = 6$ мм, взятых после всех режимов термической обработки); электроэрозионная выборка окон упругого элемента и поверхностей крестообразных перемычек на специальном станке; испытания в условиях широкополосной случайной вибрации (ШСВ) со среднеквадратичным ускорением $\varepsilon = 13$ g при частоте $\Delta f = 20 - 20000$ Гц в течение $t = 300$ с; также в условиях ШСВ при $\varepsilon = 30$ g при частоте $\Delta f = 20 - 20\ 000$ Гц в течение $t = 3$ с; при ударе с ускорением 80 g с частотой 6 циклов в течение $t = 2-6$ мс, а также при виброударе при 80 g с частотой 6 циклов в течение $t = 20 - 200$ мс для проверки достаточности механической прочности изделия на специальных стендах.

Результаты исследования

Значения ТКЧ сплава приведены в табл.1, Видно, что его изменения в диапазоне рабочих температур у 44НХТЮ составляют - 0,142 %; Бр.В2: -1,661 %. Сплав 36НКВХБТЮ-ВИ:-0,08 не подходит по магнитным характеристикам. Пробная технология изготовления чувствительных элементов цельной конструкции нового гироскопа из одной заготовки заключается в последовательности операций: контроль закупленного материала на соответствие сертификату); токарная (изготовление цилиндров для изделия и образцов свидетелей для ТО), промывка, первичная ТО (закалка); вторичная ТО (старение двух ступенчатое); контроль твердости; расточки отверстий; слесарные зачистки заусенцев; маркировки; промывки, доводки размеров; окончательная ТО (старение); контроль твердости поверхностей «подвеса»; автоматизированная ЭЭО перемычек; контроль размеров перемычек; промывка; стабилизация структуры при 60⁰С; контроль; промывка; консервация в спец тару; новая технология сборки; проверка работоспособности изделия на стендах предприятия.

Таблица 1

Значения ТКЧ эливарных сплавов при разных температурах

Рабочая температура, °С	-60	-40	-20	0	20	40	60
44НХТЮ: ТКЧ (%)	0,1	0,01	-0,01	0	0,02	0,05	0,07
Бр.В2: ТКЧ (%)	1,15	0,80	0,55	0,27	0,02	-0,20	-0,55
36НКВХБТЮ-ВИ	-0,05	0	-0,01	0	- 0, 02	-0,05	0,1

В табл. 2 приведены режимы первичной, промежуточных и окончательной ТО.

Таблица 2

Режимы термической обработки образцов из сплава 44НХТЮ

№ режима, № рис.	Режимы термообработки
1	2
	<i>Режимы первичной термообработки</i>
1. Рис .1,а	Закалка образцов при температуре 940-960 ⁰ С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 50.образцов
1-2	Закалка образцов при температуре 850-900 ⁰ С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 5 образцов
1-3	Закалка образцов при температуре 950-1000 ⁰ С, выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, 5 образцов
	Режимы 1-й промежуточной термообработки

Окончание табл. 2

1	2
2	Закалка образцов при температуре 940-960 ⁰ С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при температуре 680-700 ⁰ С 3-3,5 ч, охлаждение до температуры 150 ⁰ С, далее на воздухе, 40 образцов
2-2. Рис .1, б	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 ⁰ С 1-1,5 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов
2-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 ⁰ С 2-2.5-ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов,
	Режимы 2-й промежуточной термообработки
3	Закалка образцов при температуре 940-960 ⁰ С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при 680-700 ⁰ С 3-3,5 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 ⁰ С (в вакууме) в течение 6-8 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 30 образцов
3-2. Рис .1, в	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 ⁰ С, 3-3,5 ч, охлаждение до температуры 150 ⁰ С, далее на воздухе. Стабилизирующее старение при температуре 340-360 ⁰ С (в вакууме) в течение 2-3 ч охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов
3-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 ⁰ С 3-3.5-ч, охлаждение до температуры 150 ⁰ С, далее на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 ⁰ С в течение 4-5 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов
	Режимы окончательной термообработки
4	Закалка образцов при температуре 940-960 ⁰ С выдержка 30 мин с последующим охлаждением в воде, выдержка при 680-700 ⁰ С 3-3,5 ч, охлаждение до 150 ⁰ С на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 ⁰ С в течение 6-8 ч. отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 ⁰ С 6-8 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 20 образцов
4-2 Рис .1, г	Закалка та же + стабилизирующее старение при температуре 340-360 ⁰ С течение 6-8 ч охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе. Отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 ⁰ С в течение 2-4 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов
4-3	Закалка та же + выдержка при температуре 680-700 ⁰ С 2-2.5-ч, охлаждение до 150 ⁰ С на воздухе, стабилизирующее старение при 340-360 ⁰ С в течение 4-6 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе отпуск для снятия внутренних напряжений при 160-170 ⁰ С в течение 4-6 ч, охлаждение до 150 ⁰ С, далее на воздухе, 5 образцов

Примечания: 1. ТО всех образцов- свидетелей производилась вместе с заготовками для изготовления гирькопа в одной печи. 2. Режимы 2, 2-2, 2-3 и 3,3-2,3.2 и 4,4-2,.4-3 осуществлялись после обработки по оптимальному режиму закалки. 3. Образцы-свидетели служили для изучения структур и физико-механических свойств. 4. В промежутках между режимами термообработки заготовки подвергались технологическим операциям до конечного изделия: механической обработке, контролю качества поверхности, промывке, контролю геометрии, твердости, работоспособности на промышленных стендах

Микроструктура сплава (рис. 1, а) и значения твёрдости (табл. 3) при изменении температуры закалки от 850 до 950⁰С (см. режимы 1, 1-2, 1-3, рис. 2, а, б, в) существенного не изменились, твёрдость повысилась на 12 единиц, тогда как повышение температуры закалки до 1000⁰С привело к огрублению структуры и увеличению твёрдости на 227 ед.; оптимальная температура закалки 950⁰С по режиму 1 обеспечила однородную структуру (рис. 1, а).

Оптимальным временем выдержки при температуре 1-й промежуточной термообработке 680-700⁰С (старение) оказалось 1-1,5 ч (режим 2-2, см. рис. 2, д), который обеспечил благоприятную однородность размеров зёрен по всему шлифу при обеспечении твёрдости

3520 НВ; увеличение времени выдержки при температуре 680-700 °С до 2-2,5 ч, а также до 3,5 ч (режим 2-3, рис. 1, *е* режим 2, рис. 2, *з*) привело к разнотерности микроструктуры (далее режим исключен); увеличение времени 2-й промежуточной термообработки (стабилизирующее старении) от 2-3 до 6-8 при 340-360 °С (режим 3, рис. 2, *ж*) сохраняет все отрицательные признаки предыдущих структур, которые получены при режимах 2, 2-3, (далее режим исключен); увеличение времени старения от 2-3 до 6-8 ч при окончательной термообработке (отпуске) при 160 °С также сохраняет все признаки предыдущих структур, которые получены при режимах 2, 2-3.

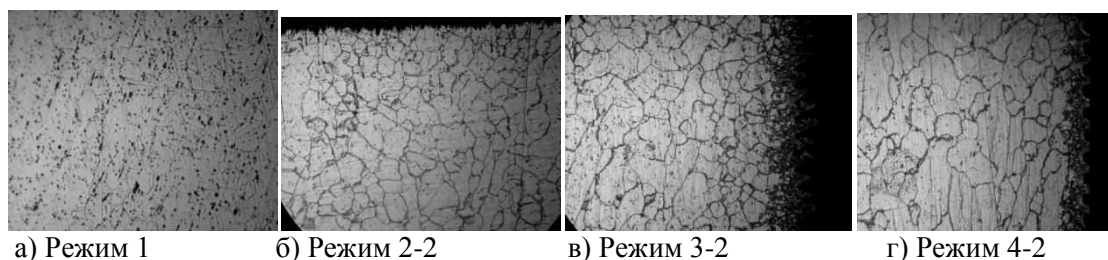


Рис. 1. Микроструктура сплава 44НХТЮ после оптимальных режимов термообработки (x160)

Таблица 3

Значения твердости по Бринеллю НВ, предела микропластичности σ_0 , физического предела текучести при сжатии $\sigma_{Т.сж}$ после различных режимов термообработки сплава 44НХТЮ

Режим ТО	1	1-2	1-3	2	2-2	2-3	3	3-2	3-3	4	4-2	4-3
НВ, МПА	1458	1470	1658	3520	3520 max	3430	3254	3520 max	3430	3430	3620 max	3570
σ_0 , МПа	50	55	45	355	575	540	520	590	-	575	530	-
$\sigma_{Т.сж}$; МПа	220	210	220	880	900	870	870	820	-	920	880	-

Наибольшая твердость (табл. 3) после первичной ТО получена после режима 2-2, который обеспечил наибольшую однородность микроструктуры (зёрненной структуры), она наследуется в режимах 3-2 и 4-2. В дальнейшем структуры после режимов 3-3 и 4-3 были исключены из анализа как неоптимальные.

Диаграммы деформации и характер разрушения сплава (режим 4-2, табл. 2) показали следующее:

а) значения механических свойств составили: $\delta_p = 0,21$, $\psi_p = 0,17$; $\sigma_T = 695$ МПа, $\sigma_B = 1150$ МПа, сопротивление разрушению $S_K = 1375$ МПа, энергоемкость $W_c = 315$ МДж/м³ критерии зарождения трещин $K_{3T} = 0,454$, распространения трещин $K_{PT}, \times 10^5 = 10,9$ (МДж/м³)²;

б) диаграмма деформации при растяжении «усилие – удлинение» состоит из упругой области, области равномерного упрочнения до точки разрыва без сосредоточенного сужения; шейки фактически отсутствует, соблюдается закон постоянства деформируемого объема $(1 + \delta_p)(1 - \psi_p) = 1$;

в) отсутствие шейки указывает на высокое упрочнение сплава, относительно низкую релаксационную способность структуры, при этом фрактография излома в шейке образца имеет квазихрупкий характер, включает участки вязкого (ямочного) и хрупкого излома с наличием микротрещин в межзёрненных участках;

г) уменьшение толщины образцов до толщины перемычек в пределах t_0 , мм = 5,80; 1,0; 0,28; 0,20; 0,12; 0,06 после заключительной термообработки по режиму 4-2 укорачивает диа-

грамму деформации, при этом снижаются: равномерное удлинение δ_r до 6% (в 2,5 раза), показатели прочности σ_T , σ_b , S_K – в 5 раз, причем до толщины перемычки 0,2 мм снижение идет медленнее, а затем более интенсивно, МПа; энергоёмкость снизилась в 26 раз, критерий K_{3T} в 7,5 раз критерия $K_{рТ}$ в 49 раз; снизился от 10,9 до $0,22 \cdot 10^5$ (МДж/м³)², критерий $K_{хр}$ в 127 раз;

д) при статических нагрузках значения всех механических характеристик сплава, энергоёмкости и комплексных критериев разрушения остаются достаточно высокими, что обеспечивается значительной долей вязкой составляющей (ямок) в квазихрупком изломе перемычек;

е) при динамическом растяжении при низких температурах работа разрушения сплава в общем снижается не более, чем на 30 % (при 20⁰ С составляет 87.9- 93.4), при -60⁰ С 62-67 кгс м/см²), обеспечивая надежную работоспособность сплава, что подтверждено на стендах предприятия при приемочном контроле гироскопа.

При температурах закалки в диапазоне от 850 до 950⁰С (см. режимы 1, 1-2, 1-3) фазовый состав сплава практически не изменился, тогда как при 1000⁰С появляются участки упорядочения, уширение линий рентгенограмм, признаки расслоения карбидных фаз; при углах разориентировки Вульфа-Брегга $\theta^0 = 0,2; 1,0; ; 0,3; 0,3; 0,1; ; 0,1; 0,3; 0,1$ имеют место фазы: Ni₃Ti; Fe₂Ti; γ ; Fe₂Ti; Ni₃Ti; Cr₂Ti; γ ; Cr₂Ti; Cr₂Ti; Cr₂₃C₆:

а) температура старения 680-700⁰С и при оптимальном времени выдержки 1-1,5 ч, (режим 2-2) получена однородность размеров зёрен по всему сечению шлифа, при максимальном значении твёрдости 3520 НВ; минимальная степень упорядочения наблюдается в режиме 2-2 при выдержке 1,5 ч; в данном режиме обеспечивается наилучшая однородность матричного раствора, происходит уменьшение содержания γ' фазы; увеличение времени выдержки от 2-4 ч (сравни режимы 2, 2-3) привело к увеличению степени упорядочения и появлению интерметаллидных фаз, особенно при выдержке 3-3,5 ч (режим 2);

б) при стабилизирующем старении 340-360⁰С увеличение времени от 2-3 до 6-8 ч привело к возрастанию однородности структуры (особенно при режиме 3-2), при этом плотность частиц второй фазы увеличилась;

в) при стабилизирующем старении 160⁰С увеличение времени от 2-3 до 6-8 ч привело к уширению спектральных линий за счет измельчения блоков, особенно при режиме 4; здесь уже наблюдаются неомогенное состояние твёрдого раствора; при увеличении времени старения от 2-3 до 6-8 ч сплав также сохраняет все положительные признаки структур, полученных ранее при режимах 2, 2-3.

Однородная мелкозернистая структура и границ зёрен, сформировавшихся по всему объёму при оптимальном режиме закалки 950±10⁰С, при последующем упрочняющем старении как бы «декорируется» выделениями частиц упорядочивающей фазы, которые отчетливо видны при микроструктурном и рентгеноструктурном анализе:

а) на ранних стадиях старения по режимам 2-2 и 3-2 появляются: частицы γ' (аустенит, легированный Ni и Ti, имеющий сверхструктуру) – это фаза глобулярной формы, относительно низкой плотности; частицы карбидов Cr₂₃ C₆, - выделения по границам зёрен, обеспечивающие дисперсионное твердение; частицы Ni₃Ti на ранних стадиях старения имеют ГЦК - решетку (упрочняющую), окончательную форму – ГПУ-решетку (разупрочняющую); частицы Fe₂Ti (кубовидной формы) и Cr₂Ti также обеспечивают дисперсионное твердение;

б) при старении по режиму 4-2 выделяются частицы η - Ni₃Ti (ГПУ –решетка) и кубовидные частицы Cr₂Ti; при температуре 160-170⁰С интерметаллиды развиваются на наноровне, создавая ячеистую внутри- зёрненную субструктуру;

в) упрочняющее старение при режимах 2-2, 3-2 и стабилизирующее старение по режиму 4-2 и температура отпуска внутренних напряжений 160-170⁰С позволили получить надежную зёрненную структуру. при этом плотность сплава составляла 8440- 8420 кг/м³.

Таким образом, маршрут режимов ТО сплава в последовательности 2-2, 3-2, 4-2, за счет деформационного и дисперсионного упрочнения обеспечил оптимальные высокие зна-

чения прочности, твердости, энергоемкости и работоспособности структуры. Маршрут положен в основу новой комплексной технологии изготовления гироскопа (рис. 4).

Релаксационных характеристик сплава при микроскопической деформации при нагрузках до предела текучести показали следующее о стабильности структуры:

а) максимальные значения предела микропластичности ($\sigma_0 = 575$ МПа) получены в сплаве по маршруту термообработки от режима 2-2 до 4-2;

б) результаты измерения упругих модулей акустическими волнами резонансной частоты на специальной установке «Астрон» по соотношению скоростей поперечных и продольных волн показали, что значения упругих модулей сплава при всех режимах изменяются мало.

Значения безразмерного акустического параметр, $D = C_1/C_2 = C_{\text{поп.}}/C_{\text{прод.}}$, где $C_1 = C_{\text{поп.}}$ – скорость сдвиговой (поперечной) волны; $C_2 = C_{\text{прод.}}$ – скорость продольной волны, служащего практическим критерием контроля стабильности (качества) структуры, показали:

а) изменение показателя D коррелирует с изменением доли прерывистого превращения в сплаве после различных режимов термообработки;

б) начало распада при старении происходит при режиме 2-2, что обеспечивает значительную долю непрерывного превращения и соответствует уменьшению критерию D ; - минимум величины D соответствует оптимальному режиму 3-2; стабилизация критерия D соответствует оптимальному режиму 4-2;

в) в процессе старения происходит изменение относительного количества γ' -, и - η -фаз, что влияет на модуль упругости сплава;

г) в условиях развития прерывистой реакции старения при скачкообразном изменении состава матрицы наблюдается сильное изменение эливарных свойств сплава; в то же время непрерывный распад, охватывающий весь объем зерна и идущий с плавным изменением состава матричного твердого раствора, обеспечивает наилучший эффект дисперсионного твердения;

д) оптимальное сочетание прочностных и термоупругих свойств эливары достигается путем преимущественного усиления непрерывного выделения и ограничения доли прерывистого распада, что и обеспечивается предложенным маршрутом термообработки.

Анализ фрактографий изломов разорванных цилиндрических образцов №1 - №5 (рис. 2) и натуральных перемычек (рис. 3 $b/t = 30 - 50-100$ показал, что:

а) излом образцов (рис. 2) имеет характерный квазихрупкий излом, близкий к вязкому (ямочному) разрушению: помимо нормальных напряжений, отвечающих за хрупкое разрушение путем отрыва, присутствуют касательные напряжения, отвечающие за пластическую деформацию скольжением;

б) вид фрактографий изломов перемычек (рис. 3) смешанный, состоит из нескольких участков: плоских, в которых преобладает разрушение от нормальных напряжений, наклонных под углом меньше, либо равном 45° , в которых преобладает разрушение от касательных напряжений; увеличение соотношения ширины и толщины приводит к некоторому увеличению хрупкой составляющей от отрыва;

в) при снижении температуры до -65°C и динамической скорости разрыва фрактографии изломов содержат преимущественно вязкие ямки и хрупкие плоские участки, что указывает на сохранение сплавом достаточной пластичности, прочности, энергоемкости и достаточных значений критериев зарождения, распространения трещин, критериев хрупкости, т.е. надежности;

г) фрактографии изломов крестообразных натуральных перемычек при комнатной температуре (рис. 3) показывают участки преимущественно вязкого и частично квазихрупкого излома.

Все приведенные результаты в целом позволили сформировать оптимальный маршрут термообработки с оптимальной структурой и доказать требуемую технологичность сплава.

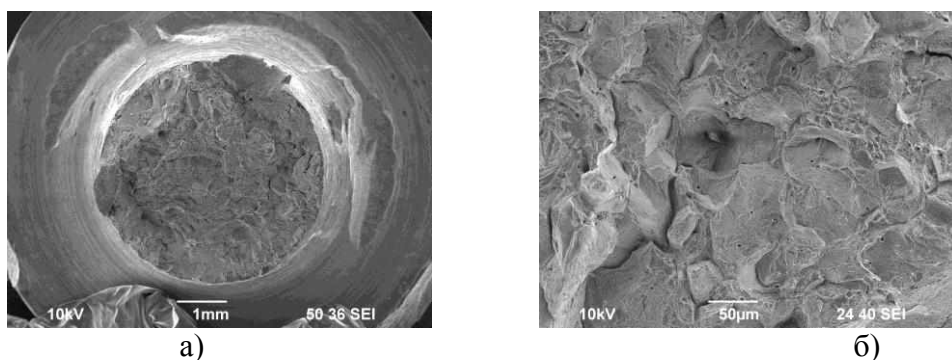


Рис. 2. Фрактография изломов сплава после термообработки (режим 4.2):

a – общий вид излома образца, испытанного на растяжение, (x15);

б – центральной части излома образца (x300)

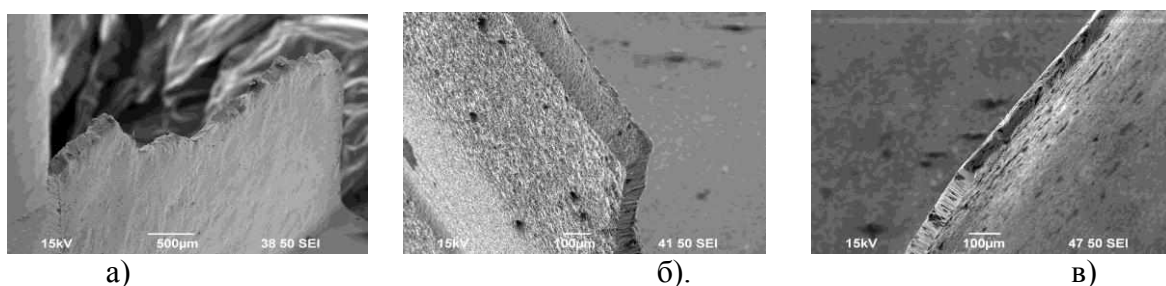


Рис. 3. Фрактографии изломов натуральных перемычек:

a – обр.№3, (b/t = 30),(x33); *б* – обр. №2, (b/t = 50) , (x100); *в* – обр.№1, (b/t = 100),(x110)

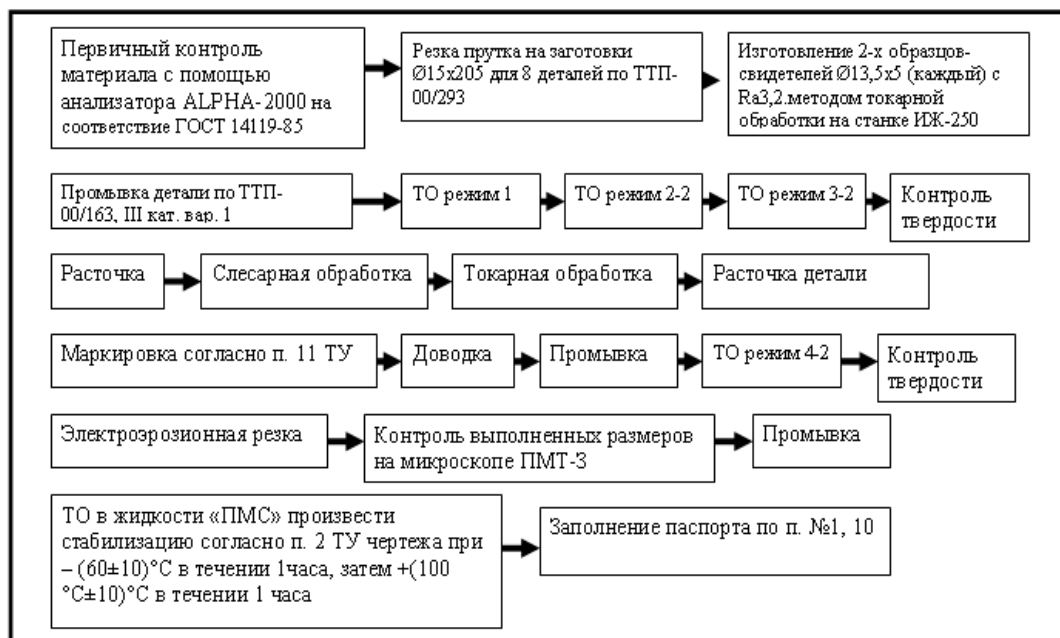


Рис. 4. Схема комплексной технологии изготовления корпуса гироскопа

На рис. 4 представлена схема новой комплексной технологии изготовления корпуса нового гироскопа РВГ-1МХ оптимальной конструкции, выполненного из цельной заготовки. Перемычки выполнялись путем образования геометрии окон с учетом допусков на размеры и шероховатость (согласно чертежа) автоматизированной электроэрозионной обработкой на станке –SEIDU M500S при стандартном режиме (температура среды 20⁰С, температура ис-

кры 2000⁰С, время действия 2 мкс, глубина проникновения 6-8 мкм) при настройке станка Die SF CUT за 6 проходов (табл. 4) инструментом (проволочный латунный электрода Ø = 0,25 мм марки MATTEX WIRE Kraft Union) в ванне с деионизированной водой, получаемой при прохождении дистиллированной воды через ионообменную смолу (NPK-ION-EXCHANGE –RESIN).

Отделка поверхности от помутнения проводилась путем опускания изделия в моющую жидкость IONEX на 5 с до восстановления первоначального цвета. Применение оптимального режима ЭЭО устранило конусность упругих элементов, снизило шероховатость поверхностей от 1,6 до 0,4 Ra, обеспечило равенство толщины всех перемычек, в общем сформировать заключительную стадию комплексной технологии изготовления изделия из одной заготовки, Макет конструкции корпуса гироскопа с наличием крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм, шириной 0,12 мм в масштабе 5:1 представлен на рис. 5.

В комплексной технологии изготовления операций 5, 6, 7, 15 термической обработки и операций 1, 8, 16,18,19 контроля поверхностей и других параметров обеспечили возможность контрольной проверки гироскопа на эксплуатационных режимах на стендах предприятия в условиях широкополосной случайной вибрации. По итогам контроля в новой конструкции устранены отмеченные недостатки: большая несимметричность шеек относительно оси вращения в РВГ, большие изменения модуля упругости при изменении температур от – 60⁰ до + 60⁰С (у бронзы БрБ2 составляют 1,661%, несовершенство технологии химического травления при изготовлении шеек, сборка чувствительного элемента не за один прием; устранены автоматические ограничения угловых перемещений (в упор) при механической установке подвеса РВГ в магнитопровод; полное исключение рихтовки упругих элементов: в 1,5 раза увеличен диаметра вала (до Ø 1,5 мм) и изменен тип резьбы до М 1,4, крепление катушек к двигателю выполнено винтами, что позволяет при съемной катушке более точно выставлять катушку относительно магнита).



Рис. 5. Макет конструкции корпуса и крестообразных перемычек толщиной 0,065 мм чувствительного упругого элемента гироскопа, выполненные из цельной заготовки (масштаб 5:1)

Выводы

Решена актуальная научно-техническая задача по разработке комплексной технология изготовления чувствительного элемента в корпусе гироскопа с требуемыми геометрическими размерами и структурой из одной заготовки, основанная на оптимизации режимов предварительной, промежуточной и окончательной термической, пластической, электроэрозивной обработок сплава 44НХТЮ, а также исследований микроструктур, фрактографий изломов, физико-механических свойств (плотности, упругих, релаксационных характери-

стик, шероховатости поверхности перемычек и др.) при рабочих температурах, статических и динамических скоростях эксплуатации.

В результате применения новой технологии в новой конструкции гироскопа:

а) исключены механическая обработка, конусность упругих элементов, несимметричность шеек относительно оси вращения (уменьшена в семь раз) снижена отрицательная роль текстуры, обеспечена низкая степень шероховатости поверхностей;

б) обеспечено снижение изменения модуля упругости при изменении температур от -60° до $+60^{\circ}$ С до величины 0,140–0,145% (у бронзы БрБ2 изменения составляют 1,661%);

в) за счет выполнения травления шеек за один прием (вместо 2-6) обеспечены требуемая жесткость упругого элемент, частота динамической настройки, сборка чувствительного элемента на вал двигателя за один прием, автоматические ограничения угловых перемещений (в упор) при механической установке подвеса РВГ в магнитопровод;

г) полностью исключена операция рихтовки упругих элементов, что обеспечило повышения точности новой конструкции гироскопа;

д) увеличен диаметр вала в 1,5 раза, что исключило возможность его изгиба, а также изменён тип резьбы, повышающих его надёжность;

е) конструкция позволила при съёмной катушке более точно выставлять катушку относительно магнита и более надёжно крепить ее к двигателю винтами (вместо заливки и клейки).

Ротор и упругий вращающийся карданов подвес, будучи выполнены из одной заготовки, имеют равенство $TK_{LP} \text{ ротор} = TK_{LP} \text{ диска} = TK_{LP44НХТЮ}$, поэтому обладают самой высокой стабильностью из всех возможных. Такой динамически настроенный гироскоп (ДНГ) содержит наименьшее число сочленяемых деталей (резьбовых, посадок, сварных, клеевых), вносящих нестабильность и точность количественных характеристик ротора и его упругого подвеса. Разработанная новая технология изготовления гироскопа новой конструкции принята на предприятии для серийного производства гироскопов нового типа. Новизна отдельных решений защищена патентом. Ожидаемый экономический эффект составляет 6,5 млн руб.

Библиографический список

1. Харитонов, С.В. Исследование структуры и особенностей фазовых превращений в элинварном сплаве после различных режимов термообработки / В.А. Скуднов [и др.] // Физика металлов и металловедение. 2011. Т. 112. №3. С. 1–7.
2. Харитонов С.В. Влияние вида закалки на микроструктуру сплава 44НХТЮ/ Н.В. Редькина, С.В. Харитонов, В.А.Скуднов. // Известия вузов. Черная металлургия. 2012. №7. С. 53–55.
3. Скуднов, В.А. Деформация и разрушение элинварного сплава 44НХТЮ / В.А. Скуднов, С.В., Харитонов, М.К. Чегуров // Деформация и разрушение: сб. материалов IV Междунар. конф., 25-28 окт. 2011. М., ИМЕТ РАН 2011. С. 390.
4. Skudnov, V.A. Structure and Phase Transformations in an Elinvar Alloy after Various Regimes of Heat Treatment / V.A. Skudnov, S.V. Kharitonov, L.A. Osurina // The Physics of Metals and Metallography 2011. №3. P. 283–289.
5. Харитонов, С.В. Влияние закалки и старения на структуру и фазовый состав элинварного сплав 44НХТЮ /С.В.. Харитонов, Л.А.Ошурина, Н.В. Редькина //Р адиопромышленность. 2013. № 1. С. 138–150
6. Харитонов, С.В. Термоциклическая обработка элинварного сплава 44НХТЮ. для гироскопов / С.В. Харитонов, Н.В. Редькина // Радиопромышленность. 2013. № 1. С. 150–157.
7. Харитонов, С.В. Влияние режимов термической обработки на структуру сплава 44НХТЮ, применяемого для изготовления гироскопов / С.В Харитонов, М.К. Чегуров // Радиопромышленность. 2013. № 1. С. 157–162.

8. **Харитонов, С.В.** Деформация и разрушение элинварного сплава 44НХТЮ/ С.В.Харитонов, В.А.Скуднов, М.К. Чегуров //Вестник научно-технического развития/ 2012. №3. С. 47–53.
9. Пат. № 2492422. Способ изготовления упругого подвеса динамически настраиваемого гироскопа. от 13.09.2013 / С.В. Харитонов, В.Т. Лещев, В.А. Скуднов, В.В. Палавин., М.К. Чегуров.

*Дата поступления
в редакцию 29.05.2014*

V.A. Skudnov¹, S.V. Kharitonov²

STRUCTURE AND PHYSICS – MECHANICAL PROPERTIES OF 44НХТЮ ELINVAR ALLOY AND TECHNIQUES OF MANUFACTURING THE ELASTIC ELEMENT OF ONE-PIECE GYROSCOP (OF РВГ-МХ - AND РВГ-7-TYPE) FROM ONE BLANK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeev¹,
JSC "Arzamas research and production enterprise " TEMP-AVIA " ²

This paper contains the results of examining the Structure (phase composition, grain size, Physics – Mechanical Properties), modules of elasticity, density, strength and plasticity values of 44НХТЮ Elinvar alloy after 12 modes of integral heat treatment (hardening, ageing- main and stabilizing to relieve the stresses), electroerosive treatment of the sensitive element in the gyroscope one-piece body made from one blank. These have been obtained by microstructural, electronic microscope, x-ray-structural, ultrasound resonance, mechanical and other testing methods under temperature from +100 to -60⁰C on prototypes as well as on manufactured elastic elements which have proved the required serviceability of the product at the industrial test stands of the enterprise.

Key words: 44НХТЮ alloy, heat treatment, structure, mechanical properties, one-piece body, technique, gyroscope.

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

УДК 330.341.2

М.Д. Крохоняткин

СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ БИЗНЕСА: ВОЗМОЖНЫЙ МЕХАНИЗМ РЕАЛИЗАЦИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены проблемы взаимодействия бизнеса (в лице отдельно взятого работодателя) и общества в форме адресного оказания социальных услуг. Цель – разработать некоторые подходы к одному из вариантов механизма взаимодействия бизнеса и общества в социальной сфере. Предложен алгоритм взаимодействия бизнеса и общества, включающий 4 уровня и 17 элементов. Сформулированы основные меры по стимулированию социальной направленности бизнеса со стороны гражданского общества и органов государственной власти. Рассмотрены вопросы социального аудита, методики определения издержек проведения социальных мероприятий, проблемы организации социальной отчетности и внедрения в РФ полномасштабных социальных карт.

Ключевые слова: социальная ответственность, социализация бизнеса, корпоративное волонтерство, корпоративная социальная ответственность, социальное партнерство, социальный отчет, социальный аудит, бизнес-сообщество, социальная карта.

В период обострения экономической ситуации (экономические кризисы, предкризисное состояние и т.д.) возрастает внимание общества к проблеме социальной ответственности бизнеса. Вот и сегодня ведущие политики, экономисты, аналитики вновь говорят об угрозе второй волны кризиса в мировой экономике, о возможном повторении самого неблагоприятного сценария 2008-2009 гг.

В декабре прошлого года Минэкономразвития РФ прогнозировало рост ВВП в 2014 г. около 2,5%. Но уже через месяц эту цифру определили в размере 1,1% в так называемом «базовом сценарии» (предполагающем модификацию бюджетного правила). Уже в апреле этого года прогноз снизился до 0,5%, не исключая возможность приближения к нулевой отметке. Причин тому несколько. Продолжаются риски снижения цен на нефть: цена, которая балансировала бюджет в прошлом году и составляла \$113 за баррель, в этом году тоже колеблется около этой величины.

Другая негативная тенденция – отток капитала из страны. Сохраняющийся отток капитала снижает возможности для роста инвестиций в экономику и создает риски несбалансированности бюджетов. Основной причиной оттока капитала является неопределенность развития геополитической ситуации. Из \$63 млрд оттока капитала в первом квартале текущего года \$20 млрд пришлось на рост объемов наличной иностранной валюты на руках у населения. С учетом перевода рублей в иностранную валюту организациями отток капитала составил \$50 млрд, то есть большая часть так называемого оттока, которая учитывалась по платежному балансу, – это неопределенности геополитической ситуации, риски, которые видели население и инвесторы и, собственно, перекладывались из рублей в валюту. Нельзя сбрасывать со счетов резкое обострение политической ситуации в мире, связанной прежде всего с событиями в Украине, угрозами экономических санкций по отношению к России [6].

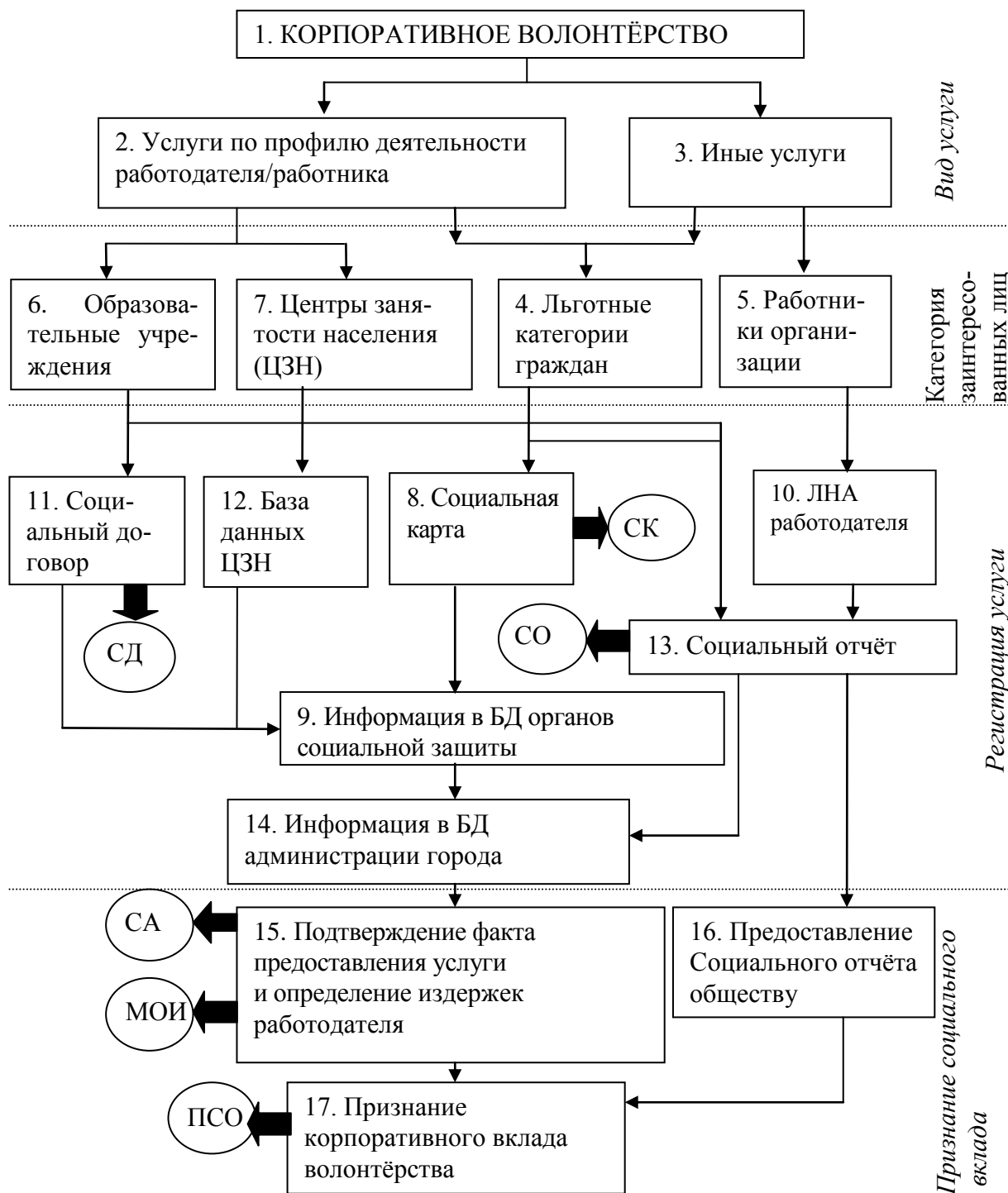


Рис. 1. Алгоритм взаимодействия бизнеса и общества:

СК – Социальная карта; СД – Социальный договор; СО – Социальный отчет;
 СА – социальный аудит; МОИ – Методика определения издержек;
 ПСО – Преимущества социальной ответственности

Повторение кризисной ситуации предполагает не только спад производства, финансовые проблемы, но и не может не сказаться на состоянии социально-трудовых отношений (тогда нарастают проблемы: безработица, задержки с выплатой заработной платы, неполная занятость и т.д.).

В настоящее время среди европейских социал-демократов популярен термин «социально-ориентированная рыночная экономика». Двести лет прошло с того времени, когда жил и творил французский ученый, мыслитель Ш. Фурье. Одна из его идей стала сегодня особенно актуальна: на смену рыночному анархическому хозяйству неминуемо придет «строй социального гарантирования», или «строй социального гарантизма» [1].

Социализация бизнеса является одной из главных тенденций современного социально-экономического развития. Международная конференция по устойчивому развитию, состоявшаяся в 1992 г. в Рио-де-Жанейро, стала поворотным пунктом, зафиксировавшим новые требования со стороны мирового сообщества к корпорациям по повышению их социальной ответственности [2]. Рост внимания к развитию социальных функций предпринимательского сообщества привел к пересмотру традиционных взглядов на управление социально-трудовой сферой и на роль субъектов рынка труда в ее рамках. В частности, уже сегодня в политической и научной среде сформировалось мнение о том, что бизнес должен стать равноправным участником социального развития.

Существует мнение, согласно которому организация – это нечто большее, чем экономическая целостность. Современная организация взаимодействует со сложной системой окружения, включающей множество составляющих, от которых зависит ее существование. К таким составляющим, в частности, относятся потребители, поставщики, средства информации, общественные объединения, работники организации и держатели акций – все, кого называют заинтересованными лицами. Эта многослойная среда может сильно влиять на достижение организацией ее целей, поэтому организации приходится уравнивать свои чисто экономические цели с экономическими и социальными интересами заинтересованных лиц. Другими словами, организации несут ответственность перед обществом, в котором функционируют, и должны, поэтому, направлять часть своих ресурсов и усилий по социальным каналам на благо и совершенствование этого общества.

Сегодня, согласно классическому определению Еврокомиссии, корпоративная социальная ответственность является философией поведения, которая отражает добровольное решение компаний придерживаться общепринятых этических норм в практике ведения дел и участвовать в формировании гражданского общества через партнерские программы и проекты развития местного сообщества. Некоторые страны уже превратили корпоративную социальную ответственность в открытый и весьма эффективный инструмент государственной политики: соответствующее законодательство уже существует в Дании, Швеции, Норвегии, Голландии, Франции, Великобритании, работу в этом направлении ведёт правительство Канады [2].

Каким может быть механизм взаимодействия бизнеса и общества в социальной сфере, в каком направлении может развиваться социальное партнерство? Рассмотрим один из возможных вариантов. Определим деятельность работодателя по оказанию социальных услуг как корпоративно-е волонтерство. Рассмотрим основные виды услуг, категории заинтересованных лиц (то есть общества) и алгоритм взаимодействия с помощью блок-схемы (рис. 1).

1 – корпоративное волонтерство (услуги) может осуществляться по профилю деятельности работодателя/работника (2) и в иных сферах (3);

2 – услуги по профилю деятельности работодателя (или работника конкретной организации) могут осуществляться в виде предоставления рабочего времени своих работников. Работники компании в свое рабочее время обучают студентов, которые проходят практику в компании, демонстрируют характерные черты профессии. В результате студенты приобретают профессиональный опыт и, возможно, станут в будущем кандидатами в работники. Работодатель готовит потенциального кандидата, при этом сэкономив на подборе персонала через рекрутинговое агентство. Как видно, польза обоюдная;

3 – иные услуги предполагают работу, не связанную с профессиональной

деятельностью работников компаний. Это может быть программа перевода на работу в учреждения социального обслуживания (в том числе помощь на дому). Данный вид услуг может осуществляться в сфере рекреации – воспроизводства физических, интеллектуальных и эмоциональных сил человека. Услуги могут оказываться нескольким категориям заинтересованных лиц;

4 – льготные категории граждан подразумевают под собой граждан, которым присвоен статус малоимущих. Они могут получать от работодателя как профильные услуги 2, так и иные 3. Процедура присвоения гражданам статуса «малоимущие» определена государством и закреплена законодательно;

5 – работники организации - внутренние заинтересованные лица, которые пользуются услугами своего работодателя в сфере рекреации: обучение, социальные мероприятия корпоративной культуры, помощь на дому в период временной нетрудоспособности работника или члена его семьи.

Иные заинтересованные лица включают образовательные учреждения 6 от средней образовательной школы до вуза и Центры занятости населения 7, которые потребляют услуги в сфере деятельности работодателей /работников 2.

Следующим шагом в исследуемом процессе должна стать регистрация услуги, оказанной работодателем заинтересованным лицам.

8 – услуга, оказываемая малоимущим гражданам, регистрируется на Социальной карте. Действия с Социальной картой – отдельный процесс (СК);

9 – далее информация с социальной карты передается в базу данных (БД) органов социальной защиты;

10 – услуги, оказываемые работникам организации, регистрируются в локальных нормативных актах работодателя – это может быть Кодекс этики или Положение о присвоении звания «Лучший по профессии»;

11 – взаимодействие работодателя и образовательных учреждений может быть определено посредством Социального договора (тоже отдельно взятый процесс (СД));

12 – регистрация услуг, предоставляемых Центру занятости населения (ЦЗН), происходит в базе данных ЦЗН;

13 – регистрация всех перечисленных выше услуг, предоставленных работодателем различным категориям заинтересованных лиц, может производиться и в социальном отчете;

14 – далее информация о деятельности работодателя в социальной сфере из всех перечисленных выше источников 8-13 фиксируется в базе данных соответствующего подразделения администрации города.

В краткосрочном периоде деятельность, связанная с социальной ответственностью бизнеса означает дополнительные издержки. Отсюда следует один из важных выводов: для распространения в предпринимательской среде социально ответственного поведения оно должно стимулироваться как государством, так и гражданским обществом. Со стороны государства стимулирование, как правило, должно принимать форму налоговых льгот.

Для того чтобы не допустить возможность дезинформации со стороны работодателя по поводу предоставления социальных услуг и обоснованности льготного налогообложения, необходима некая проверка данного факта со стороны администрации города (с определением издержек работодателя на услугу);

15 – Подтверждение факта социально-значимого партнерства бизнеса и общества можно получить с помощью проведения социального аудита (процесс СА).

Стимулирование бизнеса со стороны гражданского общества формируется в виде предпочтений значительной части населения покупки товаров, инвестирования денежных средств и связывания трудовой карьеры с социально ответственными компаниями. Для де-

кларации своей социальной направленности компаниям необходимо представить информацию (социальный отчет) обществу;

16 – существуют разные формы распространения социального отчета: размещение его на web-сайте компании, рассылка всем бизнес-партнерам, публикация в СМИ, издание в виде буклета и т.д.

17 – признание социальной ответственности бизнеса может приобретать различные формы (возможно несколько вариантов, которые можно рассмотреть как процесс ПСО). Важно, что при этом в выигрыше остается и бизнес, и общество.

Для эффективного функционирования механизма корпоративного волонтерства необходима согласованная деятельность всех его звеньев. На блок-схеме (рис. 1) представлены шесть дополнительных процессов (СК, СД, СО, СА, МОИ, ПСО). Остановимся на них более подробно.

1. Социальная карта (СК) – уникальный по своим потребительским качествам инструмент, с внедрением которого решаются задачи сквозного персонального учета, разгрузки служб работы с населением, достижения социального эффекта за счет сокращения процедуры получения государственных информационных услуг. В настоящее время в ряде регионов России (в т.ч. и в Нижегородской области) на разных стадиях внедрения находятся проекты по использованию социальных карт. Опыт ряда региональных проектов показывает, что, как правило, функция таких социальных карт ограничивается предоставлением возможности получения пенсий и (или) социальных денежных компенсаций в банкомате. Хотя специалистами в области информационных технологий констатируется возможность создания и использования многофункциональной смарт-карты, которая способна обеспечивать хранение дополнительных (текстовых) файлов для записи самой разнообразной информации и обеспечить формирование эффективного механизма управления социально-экономической сферой. Небанковские проекты смарт-карт носят отраслевую направленность, основное приложение на карте – идентификационное, информационное или учётное. К таким реализованным проектам можно отнести проект по внедрению пластиковых карт в г. Туле и проект Московского метрополитена по внедрению проездных бесконтактных карт для льготных категорий граждан г. Москвы [5].

В рамках Федеральной целевой программы «Электронная Россия» на территории Нижегородской области в течение уже почти восемь лет (с 2006 г.) реализуется проект по созданию автоматизированной системы «Социальная карта жителя Нижегородской области», однако серьезного результата пока не удалось достичь.

Однако возникает ряд вопросов по разделению сфер ответственности в процессе создания социальных карт, внедрения их в деятельность субъектов региона, которые в целях взаимной социально-полезной деятельности необходимо, а главное – возможно решить.

2. Отдельно о взаимодействии работодателя и образовательных учреждений. Документ, который регламентирует услугу работодателя, назовем социальный договор (СД), или договор о корпоративном волонтерстве. Процедура заключения таких договоров, форма, возможные участники, курирующий орган администрации города и прочие атрибуты данного процесса требуют согласованной проработки (например, целевой рабочей группой из представителей власти, работодателей и образовательных учреждений) и утверждения на муниципальном уровне.

3. Одним из способов информирования общества и государственных органов о реализации принципов социальной ответственности в деятельности компании может стать подготовка и представление социального отчета (СО).

Существует точка зрения, что социальный отчет (СО) – это эффективный инструмент информирования, в первую очередь, инвесторов, потребителей, местного сообщества и органов власти о том, как компания реализует заложенные в своей миссии или стратегических

планах цели экономической устойчивости, социального благополучия и экологической стабильности. Иная точка зрения относит социальную отчетность к инструменту менеджмента и стратегического планирования, который помогает правильно оценить нефинансовые риски и построить более эффективную социальную политику корпорации [3]. Отчёт о вкладе компании в общественное развитие объективно производит большой публичный эффект, так как нацелен на значительные общественные группы и институты.

Согласно исследованию аудиторской компании KPMG, в 2005 г. из 250 крупнейших мировых корпораций более половины (52 %) составили и предъявили обществу свои социальные отчеты. В РФ пока всё значительно скромнее: в 2002 г. свою социальную отчетность представили всего две компании, в 2003 г. – 5, в 2005 г. – 25, в 2012 г. РСП и Агентство социальной информации насчитали уже более 200 таких компаний. Кстати, Российский союз промышленников и предпринимателей с 2006 г. стал ежегодно публиковать аналитический обзор социальных отчетов компаний, работающих в РФ и создал Национальный реестр корпоративных нефинансовых отчетов [2].

Выбор формы социальной отчетности до сих пор остается предметом обсуждений. Свой подход к этому предложила Торгово-промышленная палата РФ. Она разработала документ «Пять шагов на пути к социальной устойчивости компании. Рекомендации по оценке деятельности и подготовке нефинансовой отчетности» (он подготовлен с учётом базовых принципов международных стандартов корпоративной социальной отчетности AA1000 и GRI).

Тем не менее, в настоящий момент система подготовки социальных отчетов пока недостаточно распространена в РФ не только в силу небольшого интереса бизнеса к проблемам социальной отчетности, но также из-за элементарной нехватки опыта и специалистов. Необходимо растить профессионалов в данной сфере, разрабатывать специальные образовательные программы по социальной ответственности бизнеса. В настоящее время принят Международный стандарт ИСО 26000:2010 «Руководство по социальной ответственности», который дает одинаковое видение социальной ответственности для всех типов организаций и уже широко используется во многих странах [7].

4. Поскольку институт аудита является неотъемлемой частью рыночных отношений, решение социальных вопросов тесно увязываются с осуществлением эффективного социального аудита (СА).

История социального аудита началась в США в 1940-е гг., когда социальные рейтинги компаний стали регулярными. Эти рейтинги оценивали отношения с персоналом и профсоюзами, местными сообществами, благотворительность, волонтерство и т.д.

Причем использование социального аудита в нашей стране в значительной степени облегчается наличием достаточно проработанной правовой базы социального партнерства и способствует эффективному взаимодействию социальных партнеров.

5. На настоящий момент существующие методики социального аудита несколько расплывчаты и не дают количественных оценок ни выгоды работодателя, ни его издержек на социально-ориентированную деятельность. Для подсчета социальных мероприятий необходима согласованная методика определения издержек (МОИ).

За рубежом уже существуют подобные методики, некоторые из них основаны на оценке стратегического и финансового эффекта операционной практики компаний (методика SmithO'Brien), некоторые – на оценке «скрытой стоимости» социально безответственного поведения компаний (методика CRA), некоторые – на подсчёте индекса экономического эффекта.

В качестве некоторой отправной точки для функционирования данного механизма можно предложить в самом общем виде определять издержки работодателя, привязывая их к «стоимости» работников, участвующих в корпоративном волонтерстве, а также к возможным затратам на программное, аппаратное и административное обслуживание процесса.

6. Для эффективного взаимодействия бизнеса и общества необходимо, чтобы организации были заинтересованы в социально-ответственном бизнесе, видели в нем инструмент управления инвестиционной политикой и залог своего стабильного развития. Важно, какие положительные последствия оказания социальных услуг, преимущества социальной ответственности (ПСО) могут быть предложены работодателю.

Налоговые льготы по уплате налога на прибыль организаций в местный бюджет (например, в виде уменьшения налогооблагаемой базы на величину «социальных» издержек) стали бы одним из ощутимых преимуществ социальной ответственности. Но такие льготы должны быть взаимоувязаны с теми расчетами издержек, которые будут произведены в соответствии с МОИ.

Кроме того, любые усилия компаний по распространению социальной отчетности должны иметь общественный резонанс. Неплохим подспорьем для имиджа социально-ориентированного работодателя могли бы стать публикации рейтингов в областной прессе или выпуск отдельных сборников, репортажи с лидерами таких компаний по телевидению, городские конкурсы на звание лучшего социально-ответственного работодателя (т.е. целенаправленная, грамотная PR - поддержка). Подобные мероприятия уже существуют в масштабах страны, например, конкурс на соискание Российской премии года «За лучший социальный отчет в области устойчивого развития», но ни разу не приходилось видеть знака отличия «социально ответственного» производителя на российской продукции. Почему бы не известить таким образом общество о достижениях того или иного работодателя?

Приверженность и следование принципам социальной ответственности на практике, безусловно, повышают жизнеспособность и эффективность предпринимательской системы. При умелом ведении бизнеса решение социальных проблем может стать источником прибыли, в связи с чем бизнес начинает реагировать на призывы инвесторов, правительств и общества прояснить степень воздействия своего основного производства на окружающий мир. Уже подсчитано, что увеличение социальной ценности компании на один пункт ведет к улучшению репутации на 0,55 пункта, в то время как увеличение экономической ценности на тот же пункт повышает репутацию только на 0,32 пункта [4].

Таким образом, социальные показатели по сравнению с экономическими, оказывают почти вдвое большее воздействие на репутацию фирмы. Компании, вовремя не оценившие подобную ситуацию, упускают возможность в бизнесе, теряют конкурентные преимущества и отстают в управлении.

В нашей стране социальные возможности бизнеса используются пока неэффективно, так как законодательные основы социальной деятельности компаний находятся в фазе своего становления, поскольку в настоящее время государство не может в полном объеме обеспечить финансирование социальной сферы, то бизнес-сообщество призвано продемонстрировать новый уровень взаимоотношений с государством в области социальной ответственности.

Библиографический список

1. **Дзарасов, С.С.** Судьба политической экономии и ее советского классика / С.С. Дзарасов, С.М.Меньшиков, Г.Х. Попов. – М.: Издательство «Альпина Бизнес Букс», 2004. – 454 с.
2. Корпоративная социальная ответственность: управленческий аспект: монография / под ред. И.Ю. Беляевой и М.А. Эскиндарова. – М.: КНОРУС, 2012. – 367 с.
3. **Мескон, М.** Основы менеджмента: [пер. с англ.] / М. Мескон, М. Альберт, Ф. Хедоури; под ред. Л.И. Евенко. – М.: Издательство «Дело», 2012. – 720 с.
4. **Туркин, С.** Зачем бизнесу социальная ответственность // Управление компанией. 2012. № 7. С. 50–53.

5. Социальная карта – смарт-технологии в социально-экономической сфере. Проблемы, решения, перспективы / А.А. Федин [и др.]. – М.: АйТи, 2013. – 312 с.
6. <http://www.interfax.ru/business/>
7. <http://nkozakon.ru/>

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

M.D. Krokhonyatkin

**SOCIAL RESPONSIBILITY OF BUSINESS:
THE POSSIBLE MECHANISM OF IMPLEMENTATION**

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

The article considers the problems of interaction of business (in the "face" of individual employer) and the company in the form of targeted social services. The objective was to develop some approaches to one of the variants of the mechanism of interaction of business and society in the social sphere. The algorithm of interaction of business and society, which includes 4 levels and 17 items. The main measures to promote the social orientation of business on the part of civil society and public authorities. Considered are the issues of social audit, methods of determining the costs of social activities, problems of organization of social reporting and implementation in the Russian Federation "full-scale" social cards.

Key words: social responsibility, socialization business, corporate volunteering, corporate social responsibility, social partnership, social report, social audit, business community, social card.

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

УДК 64.01+364.12+365

А.В. Крылова

ПРОБЛЕМЫ ГАЗИФИКАЦИИ ТЕРРИТОРИЙ КОТТЕДЖНЫХ ЗАСТРОЕК В ГОРОДСКОЙ ЧЕРТЕ И ПРИГОРОДНОЙ ЗОНЕ: СОЦИАЛЬНЫЙ АСПЕКТ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Анализируется ряд проблем владельцев участков ИЖС, связанных с установкой систем автономной газификации, а также проведением государственных газопроводов к частным домам, расположенным в городе либо в непосредственной близости от него.

Ключевые слова: индивидуальное жилищное строительство (ИЖС), коттеджный поселок (КП), товарищество индивидуальных застройщиков (ТИЗ), газификация, Газпром, государственные и муниципальные органы власти, федеральные целевые программы (ФЦП), государственно-частное партнерство (ГЧП).

Эффективное развитие региона возможно в первую очередь при создании благоприятных условий для прогрессивного развития его социально-демографического потенциала – населения. Индикаторами качества популяции региона выступают: общая численность населения, численность городского и сельского населения, миграционные потоки, уровень жизни. Особое значение при этом имеют такие индивидуальные критерии, как установка людей на создание семьи, здоровый образ жизни. Эти субъективные показатели зависят от множества факторов: уровня жизни в стране в целом и регионе, социально-экономических перспектив территории и т.д. [1].

Современная российская банковская система (несмотря на периодические финансовые кризисы) способна предложить кредитные продукты, которые делают вполне реальным улучшение жилищных условий не только для бизнес-элиты, но и для представителей формирующегося «среднего класса».

Однако возведение коттеджа как собственными силами, так и посредством строительных компаний – процесс длительный и трудоемкий, таящий в себе множество «подводных камней». Не останавливаясь подробно на каждом аспекте, сосредоточим внимание на той проблеме, решение которой делает возможным сам факт круглогодичного проживания в доме, – на его отоплении.

Проведенный в интернет-форуме опрос жителей одно из «бюджетных» (с относительно невысокой стоимостью земельных участков) коттеджных поселков (территории для индивидуального жилищного строительства), расположенного де-юре в Н. Новгороде, де-факто – в непосредственной близости к городской черте, показал следующую картину (табл. 1).

Из табл. 1 видно, что большинство владельцев коттеджей (48 %) отдает предпочтение газу, часть из них видит его как один из возможных вариантов отопления [2].

Однако, то, что воспринимается как само собой разумеющееся в городе, сопряжено с некоторыми сложностями у его пределов.

Главная проблема, с которой обычно сталкиваются, – это небольшая численность жителей развивающейся территории коттеджной застройки, что делает ее мало привлекательной для газовых служб в плане устройства газопровода.

Таблица 1

Каким видом топлива Вы собираетесь (сразу после переезда) или уже отапливаете дом?

Вид топлива	Кол-во владельцев, %
Электроэнергия	16
Природный газ	44
Сжиженный газ	4
Твердое топливо (дрова, уголь, брикеты)	16
Жидкое топливо (мазут, солярка, масло)	4
Тепловая энергия от холодной среды к более теплой (тепловой насос)	4
Солнечная энергия	0
Ветровая энергия	0
Комбинация выше перечисленных видов топлива	12

Наиболее простым решением здесь кажется автономная газификация (рис. 1). В Нижегородской области достаточно много фирм, которые оказывают эту услугу. Безусловно, полная независимость от «коммунальщиков» – это весомый плюс. Однако цена вопроса, несмотря на заверения о быстрой окупаемости, многих останавливает. Стоимость оборудования (газгольдера) объемом 7000 л составляет примерно 300 000 руб. Дополнительно оплачивается запорная арматура, доставка (более 30 км от города), монтаж, пусконаладочные и земляные работы, заправка газгольдера сжиженным газом (пропаном-бутаном) два-три раза в год.

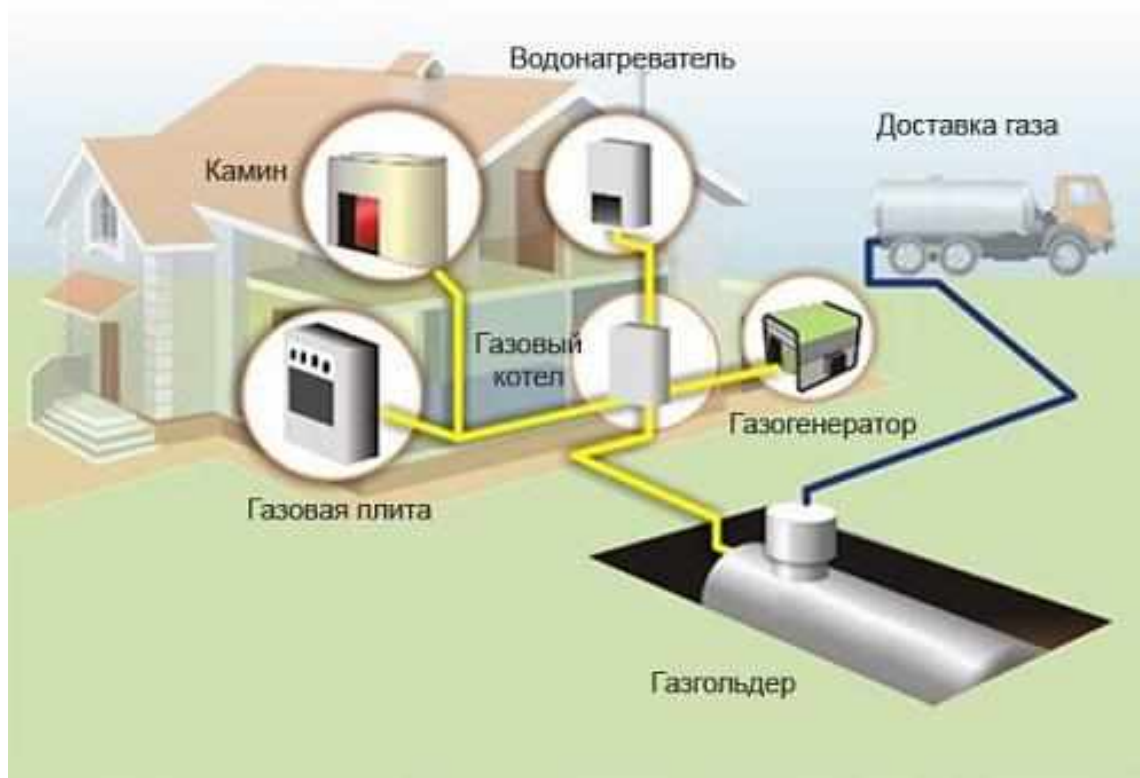


Рис. 1. Условная схема системы автономной газификации дома

Посчитав расходы, многие владельцы домов «бюджетных» коттеджных поселков предпочитают все же ждать газификации от государства. Следует отметить, что надежды таковых не так уж несбыточны. В настоящий момент принят ряд федеральных целевых программ (ФЦП), направленных на решение проблем газификации.

Так, ФЦП «Социальное развитие села до 2013 года» содержит раздел, направленный

на развитие газификации в сельской местности [4]. Программа предусматривает следующие мероприятия:

- осуществление строительства и реконструкции распределительных газовых сетей;
- повышение уровня газификации жилого фонда;
- внедрение экономичных энергосберегающих технологий строительства и эксплуатации газовых сетей, высокоэффективного и экологически безопасного оборудования для использования газового топлива;
- повышение эффективности использования сетевого газа.

Расходы на реализацию ФЦП «Село» в 2013 г. составили 20,7 млрд руб. (2,6 % общей суммы финансирования ФЦП) [5].

Однако пригородные коттеджные поселки и деревни, находящиеся в городской черте, просто не подпадают под эту программу.

На реализацию другой ФЦП, подразумевающей аналогичный комплекс мероприятий - «Развитие регионов», потрачено в 2013 г. 13,4 млрд руб. (1,7 %). В 2014 г. запланировано незначительное увеличение этой суммы.

Однако программа в первую очередь затрагивает районы областей [5].

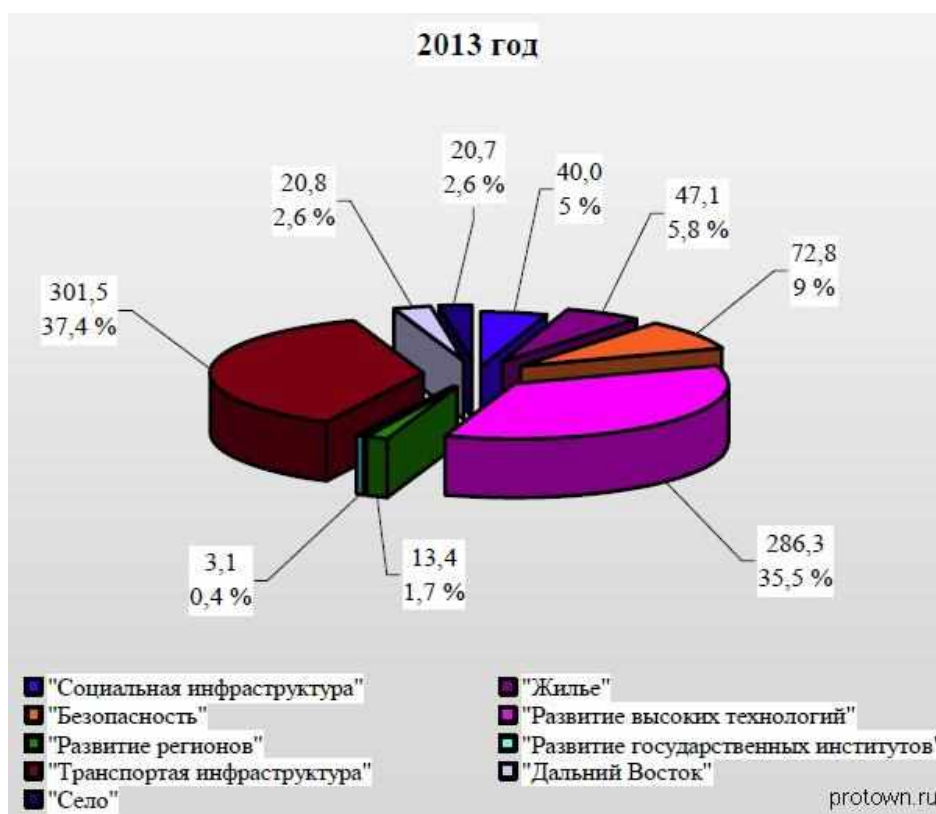


Рис. 2. Структура бюджетных ассигнований, предусмотренных на реализацию ФЦП по направлениям

Особо следует отметить, по сути, национальный проект – Программу газификации российских регионов. В 2001 г. ОАО «Газпром» с привлечением ООО «Газпром межрегионгаз» организовали работу по формированию ежегодных программ газификации по субъектам РФ на основе системного подхода к выбору объектов для строительства.

Наиболее последовательно программа газификации стала реализовываться с 2005 г. Согласно программе, Газпром выделяет значительные инвестиции на строительство межпоселковых газопроводов, подающих газ в города и поселки.

За подготовку потребителей к приему газа, подведение его к каждому дому и кварти-

ре отвечают региональные власти за счет привлечения средств бюджетов всех уровней и других источников финансирования [7].

Газпром совместно с администрациями регионов ежегодно подписывают планы-графики синхронизации выполнения программ газификации. В планах-графиках по каждому населенному пункту, к которому подводится межпоселковый трубопровод, указывается планируемое количество потребителей, в том числе домовладений и котельных, которые подлежат газификации, с четкими сроками завершения работ.

Однако в утвержденной председателем правления ОАО "Газпром" Алексеем Миллером Программе на 2014 г. планируется направить на газификацию на 18,6% меньше, чем в 2013 г.

Основные причины сокращения инвестиций - неудовлетворительное выполнение некоторыми регионами своих обязательств по подготовке потребителей к приему газа в рамках подписанных графиков синхронизации и крайне низкая платежная дисциплина. Наибольшее отставание наблюдается в Волгоградской, Архангельской и Тверской областях [8].

В определенный период Нижегородской области также не удалось в намеченный срок в полном объеме выполнить свои обязательства. Так, процент готовности объектов в 2009 г. составил 25–64%, показатели 2010 г. еще ниже. Губернатор объяснял срыв планов-графиков синхронизации финансовым кризисом и отсутствием средств у муниципалитетов [9].

Сторонам удалось договориться и финансирование продолжилось. Администрация Н. Новгорода планировала к концу 2013 г. завершить газификацию населенных пунктов, находящихся в черте города (об этом заявлял глава администрации Нижнего Новгорода Олег Кондрашов). Источниками финансирования должны были стать средства федерального, областного и городского бюджетов, а также ОАО "Нижегородоблгаз" [10].

Действительно, сделано было много. Уровень газификации области (75,87%), на данный момент, выше среднероссийского, который составляет 63% [11].

В 2014 г. в регионе должны построить около 500 км новых газопроводов, что позволит газифицировать еще порядка 13 тысяч домовладений [11].

Однако основной акцент планируется сделать на северные районы области. А из этого следует, что владельцы частных домов в городской черте Н. Новгорода и пригородной зоне должны будут вновь изыскивать способы обогреть свое жилье.

Как вариант решения проблемы часть домовладельцев планирует взять на себя обязанности региональных властей: осуществить присоединение через посредников, оплатив проведение ветки от центрального газопровода по территории своего поселка и далее к дому.

Но и при таком подходе есть нюансы. Даже если потребители готовы заплатить от 150 до 250 тыс. руб. за прокладку трубы, не исключено, что придется отдельно платить соседям, ранее уже осуществившим эту операцию, за использование «их» участка (ветки) (для сравнения: в Московской области с 1 марта 2014 г. аналогичная операция стоит от 20 до 50 тыс. руб.) [12].

Более того, если владельцем газопровода является не Горгаз, то от соседей, по территории которых проходит труба, предстоит получать письменное разрешение. Однако это обстоятельство зачастую приводит к судебным разбирательствам.

Кроме того, особой проблемой в России всегда была бюрократия.

Необходимость сбора большого количества документов для газификации коттеджа вполне оправдана требованиями техники безопасности. Перечень необходимых документов:

- заявление;
- технические условия на газификацию и электрохимзащиту (при подземном проведении газопровода);
- технический паспорт БТИ на дом;
- топографическая съемка участка с «посаженным» газифицируемым объектом;
- акт обследования дымоходов пожарной службой;
- разрешение архитектурно-планировочного управления;

- проектная документация;
- документы на газовое оборудование;
- документы о согласовании в различных инстанциях;
- исполнительно-техническая документация (после монтажа газопровода);
- акты приемки, договора и т.д.

Если необходимость сбора объемного комплекта документов у домовладельцев находит понимание, то с элементами коррупции, волокиты и прочими «издержками» мириться сложнее.

В связи с этим, следует заметить, что требуется больше внимание со стороны государства к проблемам газификации территорий коттеджных застроек в городской черте и пригородной зоне.

Кроме того, следует признать, что общий объем ассигнований на реализацию ФЦП в 2014 г. уменьшится на 12,8 %, что связано как с окончанием срока реализации ряда программ, так и с неполным использованием выделенных бюджетных средств (при том, что программно-целевое бюджетирование и так недостаточно) [6].

Для недопущения увеличения проблем газификации территорий коттеджных застроек необходим поиск альтернативных способов финансирования, государственно-частное партнерство (ГЧП). Без него невозможно проведение грамотной региональной политики в указанной сфере, так как она требует участия всех заинтересованных сторон: государственных и муниципальных органов, частных компаний - подрядчиков, владельцев индивидуальных домов.

Итак, очевидно, что требуется специально ориентированная на этот сегмент проблемы программа развития газификации, обеспеченная финансовой поддержкой. Наиболее эффективным механизмом здесь представляется концессия. Эта форма ГЧП в достаточной мере институционализована (обеспечена законодательной базой), однако до сих пор в недостаточной степени задействована в экономике. Некоторые шаги в этом направлении уже предпринимались. Так, в 2011 г. обсуждались предложения по созданию условий для реализации ГЧП по энергоэффективности в бюджетной сфере посредством заключения энергосервисных договоров [13].

Дальнейшее совершенствование законодательной базы, научная разработка проблемы, подготовка квалифицированных специалистов-экономистов в области ГЧП, повышение социальной активности застройщиков территорий для ИЖС дает основания надеяться, что в городских и пригородных ТИЗах появятся объекты газовой инфраструктуры и владельцы частных домов наравне с жителями многоэтажек смогут в полном объеме пользоваться коммунальными услугами.

Таким образом, будет поэтапно достигаться стратегическая цель социально-экономической политики: наращивание экономического потенциала государства, устойчивое социальное развитие регионов и повышение качества жизни населения [14].

Библиографический список

1. **Аргунова, В.Н.** Человеческий потенциал современного российского региона: жизненные стратегии и инновационные ресурсы (на примере Ивановской области / В.Н. Аргунова // Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 1. С. 30.
2. ТИЗ «Надежда». – Режим доступа: <http://vk.com/tiznadezhda>.
3. Условная схема системы автономной газификации. – Режим доступа: <http://strmnt.ru/wp-content/uploads/2013/05/Propan5.jpg>.
4. ФЦП «Социальное развитие села до 2013 г// Система «ГАРАНТ». – Режим доступа: <http://base.garant.ru/2159191/#ixzz2yYpDUvs6>.
5. Федеральные целевые программы и Федеральная адресная инвестиционная программа. Инвестиционный фонд Российской Федерации. – Режим доступа: http://www.ach.gov.ru/userfiles/tree/08-tree_files-fl-364.pdf.

6. Анализ бюджетных расходов на федеральные целевые программы в 2011-2013 гг. // Федеральный портал Protown.Ru. – Режим доступа: <http://www.protown.ru/information/hide/6385.html>.
7. Неисполнение обязательств регионов по подготовке потребителей к приему газа и огромные долги вынуждают "Газпром" сокращать инвестиции в газификацию. – Режим доступа: <http://oilgasfield.ru/news/88657.html>.
8. Неисполнение обязательств регионов по подготовке потребителей к приему газа и огромные долги вынуждают "Газпром" сокращать инвестиции в газификацию. – Режим доступа: <http://oilgasfield.ru/news/88657.html>.
9. Районы не газуют. – Режим доступа: <http://www.r52.ru/index.phtml?rid=10&fid=117&sid=11&nid=37315>, свободный.
10. Режим доступа: <http://www.innov.ru/news/2011/2/21/2/>.
11. Газификация Нижегородской области продолжается. – Режим доступа: http://kapital-rus.ru/uznai/news/gazifikaciia_nijegorodskoj_oblasti_prodljaetsia.
12. Газификация в Московской области. – Режим доступа: <http://energovopros.ru/novosti/gaz/35543/>.
13. **Чернова, С.В.** Государственно-частное партнерство как альтернативный способ финансирования целевых программ: проблемы и перспективы развития / С.В. Чернова, А.С. Каратаев // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 3. - Режим доступа: <http://www.science-education.ru/103-6330>.
14. **Аргунова, В.Н.** Человеческий потенциал современного российского региона: жизненные стратегии и инновационные ресурсы (на примере Ивановской области // Вестник НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2013. № 1. С. 35.

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2014*

A.V. Krylova

THE PROBLEMS OF GASIFICATION OF THE TERRITORIES VILLA COMMUNITIES IN URBAN AND SUBURBAN AREAS: THE SOCIAL ASPECT

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

Purpose: To study the socio-economic problems of gasification of the private sector in N. Novgorod

Methodology / approach: The author used a systematic approach to the problem. The author used the comparative, typological and the survey research methods.

Research limitations/implications: The research results can be applied by public authorities when implementing regional policies aimed at improving living standards of the population

Originality/value: The article was first set the problem of gasification of area for individual housing construction in N. Novgorod and to the suburban area. The author analyzed the reasons of failures of the Federal program in this sphere. The researcher suggested that current ways of solving problems using PPP.

Key words: personal housing construction, cottage village, the association of individual builders, gasification, Gazprom, state and municipal authorities, federal target program, public-private partnership.

УДК 140.08

Н.С. Шиловская

ОТ ГУМАНИЗМА К АНТРОПОЦЕНТРИЗМУ И ОБРАТНО

Нижегородский государственный педагогический университет им. Козьмы Минина

Статья посвящена разграничению гуманизма и антропоцентризма, основанием которого является соотношение человека и бытия. Выявляется генетическая связь гуманизма и антропоцентризма и их исторический разрыв.

Ключевые слова: гуманизм, антропоцентризм, человек, бытие, субъективизм.

Гуманизм всегда граничит с антропоцентризмом, последний неизбежно потенциально присутствует в гуманизме, свернут в нем и соответственно вырастает из него, а затем может отрываться от гуманизма, тогда между ними образуется пропасть. Основанием разрыва гуманизма и антропоцентризма является в корне различное отношение человека к миру и его же отношение к абсолютному.

Связь и разрыв гуманизма и антропоцентризма фиксируются при изначальном этимологическом анализе. Сближает гуманизм и антропоцентризм их этимологическая обращенность к человеку, а разводит разное «присутствие» человека. В гуманизме человек есть человечность, т.е. это и некоторая качественность (совокупность качеств, делающих человека как человеком и, соответственно, определяющих его сущность, так и человеческим, что, вызывает аксиологическую положительность), и человечность в отношении к другому. Именно это отношение к другому составляет человечность человека. Антропоцентризм этимологически есть просто человек, определенный топологически: его топосом является бытийный центр. Соответственно последнее подразумевает отношение человека как центра к периферии бытия.

Философский анализ укрепляет этимологическую догадку: оба суть концепции человеческого бытия, только гуманизм актуализирует ценность человеческого существования (как моего собственного существования, так и другого), достоинства и права, свободы каждого человека (опять же как меня, так и другого), а антропоцентризм констатирует позицию человека в мире центральной, определяет вездесущность человека в мире, а также акцентируют деятельностное начало в человеке. Первое: гуманизм и антропоцентризм стоят на пересечении бытия и человека: раскрывают бытие через человека, человека через бытие, с одной стороны, и бытие человека, отношение человека к собственному бытию – с другой.

Поскольку гуманизм всегда (что неизбежно) граничит с антропоцентризмом, последний неизбежно потенциально присутствует в гуманизме, свернут в нем и соответственно вырастает из него, то вполне очевидна ситуация, при которой антропоцентризм может отрываться от гуманизма, и тогда между ними образуется пропасть. Основанием разрыва гуманизма и антропоцентризма является в корне различное отношение человека к миру и к абсолютному.

В гуманизме мир нужен человеку, с одной стороны, с другой, – без человека мир был бы неполон, несовершенен и незавершен, следовательно, человек вплетен в мир, напрямую связан с миром, субъектом, центром, главой которого он себя ощущает, восхищаясь при этом его красотой и гармонией. По мере перерастания гуманизма в антропоцентризм, освобождения антропоцентризма от гуманистических идеалов человек начинает отрываться от мира, мир, который дан человеку, перестает быть необходимым ему. Пафос такого человека – «избавиться от всякой реальности, чтобы «хочу» законодательствовало вновь строящейся действительностью» [1, с. 44]. Здесь идет речь не о полном отказе от мира, а о неприятии мира таковым, каким тот существует и позволении ему существовать только в переделанном, устраивающем человеке виде.

Человек переделывает и тем самым преодолевает мир актом своей деятельности. Спо-

способность человека *действовать* – один из посылов ренессансного гуманизма: это собственный долг человека, его дар, выделенный ему всемогущим Богом [2, с. 73]. Но суть гуманистического акта действия состоит в том, чтобы человек *мог жить в мире, созданном ради него* [2, с. 74]. Антропоцентрический акт действия, напротив, может отрицать мир, преобразовывать его, изменяя его сущность, человек начинает стыдиться мира, его природного, натурального начала, которое ощущает и в себе.

Мир в гуманизме и мир в антропоцентризме также оказываются в корне различными. В гуманистическом мировоззрении мир есть бытие, мир не просто существует, он *бытийствует*, он раскрывает себя как бытие человеку. В антропоцентризме на смену гуманистической раскрытости мира человеку приходит замкнутость, он закрыт для человека, он является объектом творческой человеческой активности. Мир молчит, он молчит и больше не бытийствует, он только *существует*. Мир в антропоцентризме тем самым есть сущее.

Если в гуманизме человек есть «сосед бытия», «пастух бытия» – он ощущает бытие, мир, родственными по отношению к себе, он находит *свое* место в мире, то антропоцентрически мыслящий человек томится от чувства заброшенности, чуждости мироздания, его несоответствия высокому человеческому статусу, его величю. Здесь мир ограничивает человека уже не в том смысле, что человек живет в пределах бытия, а в том, что сковывает его потенциал, мешает ему. Поэтому человек стремится к полной переделке мира или выходу за его пределы. Эти черты антропоцентрического взаимоотношения человека с миром ярко проявились в мечтах русских космистов, где человек должен преодолеть оковы своего земного существования, атрибуты которого вызывали у него стыд (Н.Ф. Федоров) и ограничивали его (К.Э. Циолковский).

Другим вариантом антропоцентрического отказа от мира как бытия является идеализм (не только субъективный, но и объективный), в котором активность субъекта достигает наивысшей точки, и он сам творит мир (Я И. Фихте творит не-Я), отчуждая его от себя. В. Шеллинг трактует материально сущее как волю, которая бессознательна и потенциально скрывает в себе мысль: «В последней высшей инстанции нет иного бытия кроме воления. Воление есть прабытие» [3, с. 101]. Мыслить бытие как субъект, человека как сущее, как осуществление бытия – наследие гегелевской философской традиции: «об абсолютном можно сказать, что... оно есть действительное, субъект, или становление самим собою для себя» [4, с. 661]. У Г. Гегеля мир как объект познания не «вращается» вокруг субъекта (как у И. Канта), и не субъект «вращается» вокруг объекта познания (как до И. Канта), а субъект, согласно логике Г. Гегеля, и есть мир. Соответственно, если человек трактуется как бытие, то бытие как данное есть то, что противостоит человеку, как то, что человек отрицает, изменяет, преобразует: «живя в Мире природы как «посторонний», противостоя этому миру и его законам, он [человек] создает некий новый, соразмерный ему... Мир, в котором человек может претерпевать «обращение» и становиться радикально *другим*, чем он есть в качестве природного бытия» [4, с. 666]. В гуманизме, как уже отмечалось, нет такой степени субъективизма: гуманист «знает, чтобы хотеть, надо *быть*, быть реальностью и притом среди реальностей, на которые надо опираться: он глубоко реалистичен и твердо стоит на земле» [1, с. 44]. Хотя нельзя сказать, что гуманизм обязательно материалистичен, вернее, что идеализм всегда идет параллельно гуманизму, поскольку материалист, несмотря на то, что признает первичность материального, отношение к нему, к сущему может быть только как к средству, материалу, который он перерабатывает в своей деятельности.

Антропоцентрический человек, создавая новый, соразмерный ему мир, позволяет действительности существовать лишь тогда и поскольку наука *соблаговолит* ей существовать [1, с. 44]. Поэтому наука, научный эксперимент становятся своего рода посредниками между человеком и действительностью. Гуманизм, напротив, обходится без посредников между человеком и бытием: гуманистический человек сам «соседствует» с бытием. Экспе-

риментальная наука разделяет человека и мир-сущее, человек познает не бытие и, по сути, не сущее как реальное, а сущее, воспроизведенное искусственно, что впервые мы находим в апофатическом богословии Н. Кузанского.

Апофатическое богословие, как полагает А.В. Ахутин, разрушает конечный Космос античности и средневековья, но при этом не только раскрывает позднеренессансную идею бесконечной Вселенной, но и открывает новую идею мира, которая включает иную логику его постижения – научное, т.е. объективирующее, экспериментирующее познание, набрасывает проект гипотетико-дедуктивного метода, характерного для научного познания Нового времени.

«Предположения, – говорит Н. Кузанский, – должно быть, происходят из нашего ума, как действительный мир – из бесконечного божественного основания (*ratione*). Так как человеческий ум – благородное подобие бога, участвует, насколько может в плодородии творящей природы, то он из себя как образа как образа всемогущей формы *развертывает творения рассудка* (*rationalia*) *наподобие действительных вещей* (курсив мой – Н.Ш.)» [5, с. 189]. Как мы видим, теоретический рассудок, человеческий разум развертывает свой гипотетический мир, творит действительность в теории, познавая эту реальность, а потом творит и опыт, создает эксперимент, который бы проверил и верифицировал гипотетически сотворенную и гипотетически существующую реальность. В итоге человек, оказывается, связан не с тем сущим, которое реально, и которое он «не знает», а с сущим, известным им, но по сути виртуальным. Со временем сущее разъедается мыслительным скепсисом (идолы Ф. Бэкона, скептицизм Р. Декарта и Д. Юма), и бытие человека развертывается в бытии его мысли (картезианство). Человек отстраняет от бытия-реальности – оно ноуменально (ему еще не отказывают в праве существования, но неподвластно его разуму), и «живет» в бытии своего сознания, т.е. бытии-схеме, бытии-копии, создаваемой разумом (кантианство), или во множестве виртуальных реальностей, в симулякрах, отказывая бытию в статусе действительности (постмодернизм).

Латентный антропоцентризм в рамках ренессансного гуманизма появляется и в живописи этой эпохи. Как известно, художники Возрождения ушли от плоскостной средневековой живописи и перешли к писанию, в основе которого лежит принцип перспективы. По мнению П. Флоренского, перспективность есть прием, вытекающий из мировоззрения, в котором истинною основою полуреальных вещей-представлений признается некая субъективность, сама лишенная реальности. Это направление как раз, включает П. Флоренский, называют гуманизмом [1, с. 77]. Здесь важным являются два момента:

1) бытие-реальность в ренессансной живописи, иллюзию реальности которого пытаются создать принцип перспективности, по сути, нереально, хотя бы постольку, поскольку либо излишне идеализировано (можно вспомнить пейзажи или интерьеры, на фоне которых изображены рафаэлевские Мадонны, горожанки Леонардо), либо аллегорически или сказочно условно (брейгелевские пейзажи, фантазмагорический мир И. Босха). Реальность этих картин есть реальность, воспринятая глазом художника-субъекта, здесь присутствует не само бытие, а бытие, увиденное субъектом с определенной точки зрения, позиции, хотя фрагменты этой субъективно возникшей реальности мы находим в реальности действительной (например, зимние пейзажи П. Брейгеля);

2) перспективное мышление напрямую связано с гуманизмом. Далее П. Флоренский поясняет, что он понимает под гуманизмом в ренессансной живописи: он (гуманизм) не считаясь с реальностью, замыкается в субъективности, перерезывая этим связь с человечеством и с человечностью [1, с. 313–314]. В этом случае с П. Флоренским можно не согласиться, поскольку то, что дефинируется в «Обратной перспективе» как гуманизм, скорее всего, есть голый антропоцентризм, освобождающий человека от мира-реальности, реальности другого, а в итоге от собственной реальности, от тела. В возрожденческой линейно-перспективной живописи присутствует антропоцентризм (человек центрирует мироздание и творит его своим оком и воображением), но не порывающий с гуманизмом, охраняемый пределами гума-

низма, поскольку гармоничная взаимосвязь человека и мира, диалог человека и бытия и человека с бытием другого очевидны. Мир не может быть увиден и познан без человеческого глаза и сознания, и в этом состоит гуманизм. Напротив, опасно исключать из мира человека, его позицию наблюдателя и творца реальности, и оставить только принцип голой математически выверенной перспективы, мы приходим в этом случае к миру негуманному, античеловечному. Это мы видим в ужасающей сюрреалистической живописи Дж. де Кирико, у К. Малевича в «Черном квадрате», знаменующем поминки по человеку, человеческому разуму. Вместо них даже не зияющая дыра, а просто квадрат, который по всем законам живописи должен быть зияющей черной пропастью, но на полотне К. Малевича почему-то такой не является.

С другой стороны, в линейной перспективе действительно таится будущее антропоцентрическое могущество, но это произойдет только тогда, когда возникнет дисбаланс между субъективным видением и видимым бытием, когда субъективность художника, занимающего определенную точку в пространстве, и объективность мира разорвутся, когда художник не будет неподвижно наблюдать за миром с какой-то одной точки, а сам сотворит реальность своим оком и кистью. Этот процесс начат импрессионистами, объявившими, что цвет не является характеристикой предмета, он есть результат восприятия человеком этого предмета. Хотя импрессионисты вроде бы оставили мир, но это мир, существующий только в субъективном восприятии конкретного человека (например, звездная ночь В. Ван Гога). А несколько позднее в фовизме исчез и сам предмет, остался только цвет, подменяющий реальность. Живопись становится беспредметной (абстракционизм В. Кандинского) или знаковой («Черный квадрат» К. Малевича).

Прежде чем говорить об отношении человека к абсолюту, необходимо заметить, что абсолют не значит Бог: Абсолют есть Бог только исторически (для человека средневеково-христианского и ренессансного, который не дерзнул мыслить по-фейербаховски или по-ницшеански). Абсолютность есть безусловное совершенство, трансцендентная идеальность, возвышающаяся над человеком, про-образ, эталон, которому стремится соответствовать человек, воплотив его в реальной жизни. В этом смысле абсолют может выступать космос (для античного язычника), долг (у И. Канта), абсолютная ценность (начиная с Платона).

Итак, начнем с ренессансного человека, который полностью не отрывается от Абсолюта-Бога: он связывает мир божественный и мир земной, и, в отличие от средневекового, обладает свободой, поскольку сам формирует себя, свою судьбу и все сущее, возрождая и давая новый смысл протагоровскому тезису «человек есть мера всех вещей». Именно это ощущение свободы есть ощущение гуманистическое, но, вместе с тем, антропоцентрическое. Гуманистически-антропоцентрический тандем свободы возможен только в том случае, пока свобода ограничена: Бог, например, у Мирандолы *позволил* человеку формировать себя. Здесь видится некая двойственность. С одной стороны, гуманизм, остающийся внутри религиозного мировидения, не вполне честен, поскольку неполноценен. С другой – сохранность божественного абсолюта исторически оказалась иммунитетом против отрыва антропоцентризма от гуманизма, поэтому антропоцентризм Ренессанса явно с гуманистической тематикой.

«Освобождение» свободы из-под божественной опеки происходит постепенно. Этот процесс связан с изменением места религии и церкви в жизни ренессансного человека. Реформаторы католичества устраняют церковную институцию как необходимого посредника между божественным и земным, человеческим. Кроме того, существует и позиция деизма. Бога нет в мире, Он ушел из мира – Бог еще существует, но мир от Него уже свободен. В результате религиозность, вера, христианские ценности если и остаются, то интериоризируются, они – не во вне человека, не в мире-сущем и не в мире, удвоенном на сверхъестественный и естественный: «Теперь человек познал, – говорит Г. Гегель, – что в духе человека должна находить себе место религия и в нем должен совершиться процесс спасения души, что его освящение является его собственным делом» [6, с. 109]. В «Лекциях» 1805 – 1806 гг. Г. Гегель снимает трансцендентность Бога, у него Бог становится земным человеком:

«...теперь Бог, потусторонняя абсолютная сущность, стал человеком, действительно сущим здесь на земле» [4, с. 713]. В конце XIX в. Ф. Ницше назовет христианина самым наивным и отсталым подвидом человечества [7, с. 99].

Освобожденный от Бога человек остается один на один с собой. Он вынужден сделать два решительных шага. Шаг первый: искать опору в себе. В этом случае он либо остается в рамках бытия, бытие, мир (вместо Бога) становится субстанциальным, либо возможен второй вариант, когда человек сам может стать еще субстанцией: не мир, а человек занимает место божественной субстанции. Первый путь – путь М. Хайдеггера. Вторым путем пошел в XVII в. Р. Декарт, дав сомневающемуся, рефлексизирующему человеку, обманутому Богом, островок уверенности – собственное *cogito*: «А раз он (Бог) обманывает, значит, я существую; ну и пусть обманывает меня, сколько сумеет, он все равно никогда не отнимет у меня бытие, пока я буду считать, что я – нечто». Таким образом, после более чем тщательного взвешивания всех «за» и «против» я должен в конце концов выдвинуть следующую посылку: всякий раз, когда я произношу слово «Я есмь», я существую» [8, с. 145]. Во втором пути видится опасность: человек в бытии глубоко реалистичен, бытийствует в реальности, опирается на реальность земную. В случае Р. Декарта скепсис в отношении божественного сущего ставит под сомнение и чувственно воспринимаемое сущее. Позднее этому одинокому человеку, человеку без Бога, человеку-сознанию, посвящена гегелевская «Феноменология духа».

Второй шаг: человеку, освобожденному от Бога, приходится отказаться от божественного дара, коим является его будущая вечность. Одним из смыслов субъектно-объектной парадигмы, складывающейся со времен античности, является духовно-телесная раздвоенность человека, что соответственно связано с проблемой человеческой смертности. Соматическая составляющая человека тленна, а духовная, как правило, бессмертна (индивидуально), по крайней мере, это составляет основу средневекового мировидения. Однако по мере отказа от Бога, человек вынужден отказаться и от своего бессмертия, признать окончательность смерти, принять смерть, и соответственно и страх перед Ничто. Первоначально проблема предполагаемого бессмертия просто замалчивается (например, это делает Т. Гоббс, оставляя тему смерти за пределами философского дискурса). Р. Декарт еще пытается отстоять постулат о бессмертии человеческой души в связке с доказательством существования Бога, о чем свидетельствует его основной труд, который в первой редакции назывался «Размышление о первой философии, в которой доказывается существование Бога и бессмертие человеческой души...». Но, как известно, Р. Декарт был вынужден изменить название, поскольку оно явно не соответствовало содержанию его работы.

Впервые радикальный отказ от божественного дара вечности, ставящий человека перед пропастью Ничто, совершает Г. Гегель. Он признает человека в качестве свободной личности только в единственном случае – в случае принятия необратимой собственной конечности: «проявление себя как чистой абстракции самосознания состоит в том, чтобы показать себя чистой негацией [далее Г. Гегель называет негацией смерть] своего предметного модуля, или показать себя несвязанным ни с каким определенным *наличным* бытием, ... не связанным с жизнью... и только риском жизнью подтверждается свобода, что для самосознания не *бытие*, не то, как оно *непосредственно* выступает, не его погруженность в простор жизни есть сущность, а то, что оно... есть только чистое *бытие-для-себя*» [9, с. 101-102]. Иначе человек зависим от божественного и будет не чистым бытием-для-себя, а зависимым бытием-для-Бога. Поэтому смысл атеизма (по крайней мере, первоначального, возникшего до сциентистских проектов продления жизни и ее возможного вечного продолжения) заключается не только в отказе от Бога, но и от вечной жизни. Эта мысль звучит у одного из героев О. Памука, который через отношение человека к смерти, находит ключ к пониманию различия между глубоко религиозной культурой Востока и светским атеистическим мышлением западного человека: «Нет, Восток от Запада отделяет не одежда, машины, дома, мебель, пророки и фабрики с правительствами. Это все следствие. Они отличаются от нас маленькой простой истиной: они узнали о существовании бездонного колодца, что зовется смертью, по-

знали Небытие, а мы ничего не знаем об этой ужасной правде» [10, с. 430]. Принятие смерти составляет суть человеческой человечности, ее отличие, как от божественности, так и от собственно животного: «...мертвые с годами становятся мудрее и добрее; они растут посмертно, укорененные в нашей душе; истинное кладбище, истинные погост – это мы сами. Они хотят покоиться в наших сердцах. За это они нам благодарны, и это отношение придает силы семьям и народам в их странствии через времена» [11, с. 115]. Сила принятия смерти, с другой стороны, бессильна. Личность, попавшая в тиски условий человеческого существования – только одна жизнь в одни руки, определенный срок, отпущенный каждому, – мучается тоской смерти: «...Господи! Как же тосклива смерть! Какой ужас – вечно лежать в могиле, в одном и том же месте, в одном и том же положении. Правда Сократ пытался утешить человечество, говоря, что есть всего лишь две вероятности. Либо душа бессмертна, либо после смерти также пусто, как и до рождения. Слабоватое утешение!» [12, с. 228].

Современным итогом безудержной антропоцентрической свободы стала единичная независимая думающая личность, но при этом гордая своим отчуждением, неприкосновенностью, способностью остаться безразличным к чему-либо, к страданиям ближних, к жизненному хаосу, к политике. Если, по К. Марксу, нельзя жить в обществе и быть от него свободным, то здесь безудержность свободы доходит и до свободы от общества, подчас до презрения к нему, основанного на презрении к другому. Сознание такого человека свободно от «верований и привязанностей. Космос? Этика? Все пустяки. Сознать себя как неповторимую личность – значит быть отрезанным от всего остального» [12, с. 226]. И дело не в потере Абсолюта-Бога (разрыв человека и мира и человека и Бога – это только исторически первый шаг по пути, в результате которого человеческое величие оборачивается безразличием), а в утрате абсолюта в целом: Космоса, бытия, человечества, другого, природы. Человек оказался наследником ницшеанских моральных заповедей (нельзя согласиться с защитой ницшеанского человека, якобы не отбрасывающего гуманности [13, с. 65]): долой ценность каждого, гуманность, терпение как неспособность сказать «да» или «нет», благородное негодование, защиту угнетенных и обездоленных, долой самоотречение, альтруизм, стойков долга – в этом лежит проклятие человека [7, с. 57, 62, 68, 78]. Но это и не по-ницшеански сильный человек. Это автономный индивид, которому чихать на все и вся.

Ценность гуманизма – в ценности человека в мире, в границах которого человек есть самое прекрасное существо либо просто некто другой. В этом случае гуманизм и антропоцентризм неразрывны: если гуманизм признает ценность человека, то антропоцентризм – центральность человека в силу его ценности. По сути, разрыв гуманизма и антропоцентризма – это разрыв искусственный. Если антропоцентризм лишается человечности, то остается только голая человеческая активность, не считающаяся ни с чем и покоряющая все и вся, активность вне человечности, активность при забытии человеком собственной сущности, активность, сопряженная с презрением к другому.

Библиографический список

1. **Флоренский, П.** У водоразделов мысли [Текст] / П. Флоренский // П. Флоренский. Имена. Сочинения. – М.: Эксмо, 2006. С. 5–323.
2. **Манетти, Дж.** О достоинстве и превосходстве человека [Текст] / Дж. Манетти // Антология мировой философии: Возрождение. – Мн.: Харвест; М.: АСТ, 2001. – С. 60–102.
3. **Шеллинг, В.** Соч.: В 2 т. [Текст] / В. Шеллинг. – М.: Мысль, 1989. Т. 2. – 641 с.
4. **Кожев, А.** Введение в чтение Гегеля / А. Кожев. – СПб.: Наука, 2003. – 792 с.
5. **Кузанский, Н.** О предположениях [Текст] / Н. Кузанский. – Соч. в 2 т. Т. 1. – М.: Мысль, 1979. С. 185–281.
6. **Гегель, Г.** Соч. Т. 11. [Текст] / Г. Гегель. – М.: СОЦЭКГИЗ, 1935. – 560 с.
7. **Ницше, Ф.** Воля к власти. Опыт переоценки всех ценностей [Текст] / Ф. Ницше. – М.: Культурная революция, 2005. – 880 с.
8. **Декарт, Р.** Размышления о первой философии [Текст] / Р. Декарт // Сочинения. – СПб.: Наука, 2006. – С. 132 – 186.

9. Гегель, Г. Феноменология духа [Текст] / Г. Гегель. – СПб.: Наука, 2006. – 444 с.
10. Памук, О. Дом тишины [Текст] / О. Памук. – СПб.: Амфора, 2007. – 479 с.
11. Юнгер, Э. Годы оккупации [Текст] / Э. Юнгер. – СПб.: Владимир Даль, 2007. – 368 с.
12. Беллоу, С. Подарок от Гумбольдта [Текст] / С. Беллоу. – М.: АСТ, Хранитель, 2006. – 527 с.
13. Хайдеггер, М. Что зовется мышлением? [Текст] / М. Хайдеггер. – М.: Территория будущего, 2006. – 320 с.

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2014*

N. S. Shilovskaya

FROM HUMANISM TO ANTHROPOCENTRISM AND BACK

Nizhny Novgorod state pedagogical university n.a. Kozma Minin

Purpose: Ideas of humanism and anthropocentrism are in many respects conformable each other, meanwhile aren't identical. Therefore it is necessary to reveal the bases of differentiation of humanistic and anthropocentric outlook. Genetic communication of humanism and anthropocentrism and their historical break comes to light.

Methodology: The analysis is based on a dialectic method with elements of comparative methodology.

Findings: Results of the research can be used in the educational sphere, having become the basis for reading special courses on humanistic problems.

Value: Besides, this research is important in the theoretical world outlook plan. The humanism and anthropocentrism are the fundamental values of the European culture which have worried, meanwhile, in the XX century serious crisis. Therefore conceptualization of concepts of humanism and anthropocentrism is today, certainly, demanded.

Key words: humanism, anthropocentrism, the person, being, subjectivity.

УДК 1/14

Г.А. Ширшин

**ФИЛОСОФСКО-МЕТОДОЛОГИЧЕСКИЕ ПРИНЦИПЫ
СОВМЕСТНОГО РАЗВИТИЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Обсуждаются наиболее общие принципы совместного функционирования и развития науки и практики. Один из них есть принцип специфического разграничения научной и практической деятельности. Другой - принцип опосредованной связи между ними. Третий – принцип системной детерминации научной и практической деятельности. Последовательное проведение первого принципа основано на демаркации практической и, в целом, научной деятельности, не исключая эмпирический уровень последней. Второй принцип предполагает опосредствующую связь практики не только с фундаментальной наукой, что бесспорно, но в той же мере, и прикладной. Обоснование третьего принципа исходит из отрицания тезиса о первичности практики и вторичности научного познания, равно как и тезиса об обратном. Противоречие между наукой и практикой, в частности, их спонтанностью и взаимообусловленностью, периодически разрешается эволюцией и качественным обновлением системы промежуточных звеньев между ними.

Ключевые слова: наука, практика, синкретическая/опосредственная связь практического и исследовательского отношения к миру, разделение труда, специфическое обособление обыденного опыта, науки и практики, теория совместного развития науки и практики, связь науки и практики, системная детерминация практики и научного познания.

Наука и практика в третьем тысячелетии занимают особое место в творческой жизни человечества. В ходе их совместного функционирования и развития люди осваивают композиционные материалы, увеличивают энергетические ресурсы, трансформируют социальные институты, создают эффективные технологии, выходят на новые горизонты человеческих возможностей ради удовлетворения своих потребностей и личностной самореализации. Эти успехи во многом определяются системным объединением науки и практики в единое целое. Однако стремительно развивающиеся наука и практика своими выдающимися результатами взламывают сложившуюся ранее целостность их совместного объединения и тогда приходится в чем-то начинать, что называется, с нуля, поскольку внешние и внутренние условия их взаимодействия, рано или поздно, существенно изменяются. Чем инновационней достижения, тем радикальней изменение условий. Этот своеобразный парадокс - горь от триумфальных достижений - создает новые трудности, требуя нетривиальных решений и рискованных мер. Именно данное обстоятельство послужило оправданием и мотивом для дальнейшего осмысления наиболее общих принципов развивающегося взаимодействия науки и практики. Вот один из них.

Принцип специфического разграничения науки и практики

Исследование, а также эффективное управление совместным функционированием и развитием науки и практики с необходимостью требует знания четко очерченной специфики последних. В противном случае можно угодить в ловушку формально-логических ошибок, натолкнуться на неизвестное препятствие или даже выработать ложное решение, искренне принимаемое за истинное, и с настойчивостью, достойной лучшего применения, добиваться его воплощения в реальность. Указанное вновь заставляет вернуться к вопросу о специфическом разграничении науки и практики. Попытки такого разграничения имеют глубокие корни в философской культуре.

Стремление специфического размежевания научной и практической деятельности, отнюдь не преследует цель отрицать их сходство, которое заключается прежде всего в том, что и то, и другое есть: во-первых, хотя и универсальные, но все-таки разновидности единой

общественно-исторической деятельности человечества, во-вторых, несмотря на противоположность каждая из них являет собой определенный способ отношения человеческого сознания к миру, в-третьих, имеют одинаковую совокупность целого ряда структурных элементов, таких, например, как объект, субъект, цель, средство, результат. Однако для правильного понимания всей полноты отношений между практической и научно-исследовательской деятельностью, а также в целях управления их системным объединением необходимо отметить их существенные различия по направленности, характеру и результатам решаемых задач.

Они заключаются в том, что: во-первых, в процессе научного познания человек изменяет содержание своего сознания в соответствии с объективными обстоятельствами, тогда как в ходе практики, наоборот, объективные обстоятельства изменяются в соответствии с содержанием человеческого сознания. Во-вторых, если в ходе научного исследования субъект выбирает в качестве объекта непознанный фрагмент бытия, то в ходе практики в качестве объекта он выбирает познанную его часть. Отметим попутно, что в конкретной ситуации этот объект практики в какой-то степени может включать непознанные элементы мира, на которые либо никто не обратил внимания, несмотря на то, что они стихийно «вползли» в деятельность людей, либо они представлены в гипотетической форме, либо ошибочное знание о них принято за истину. В-третьих, если результатом научного исследования становятся выраженные в знаково-символической форме новые знания, как аналог обстоятельств, то результатом практической деятельности является трансформированная в соответствии с потребностями, интересами, целями и знаниями человека реальность. При этом неважно, является данная реальность материальным или духовным артефактом.

Интересно, что практическое воздействие на умы людей по результату может напоминать вновь полученное в ходе научного исследования знание. Например, итог обучения, предвыборной агитации, политической пропаганды, распространения сведений через средства массовой информации. Что вполне корректно обозначается понятием «духовное производство». Однако научная деятельность вырабатывает знание о ранее неизвестном, ориентируясь на требования исторически сложившихся критериев истинности, тогда как духовная практика может намеренно транслировать, популяризировать, распространять и внедрять в сознание широких масс как истинные, так и ложные сведения, часто маскируя последние плодами научного исследования.

Решению задач управления системами познание-практика, наука-производство мало способствует взгляд, согласно которому понятия «научное познание», «теория», «наука», в сущности, синонимичны [1]. При всем сходстве, однако, научное познание, теория, наука – это разные понятия. Научное познание – это специализированная и постоянно совершенствуемая деятельность ученых по отражению мира в головах людей. Теория, в свою очередь, – это наиболее высокая по уровню абстрактности система объективных по содержанию знаний о мире, представляющая собой результат научно-познавательной деятельности. Понятие «наука» употребляется как в широком, так и в узком смысле слова. Понятие «наука» в узком смысле слова означает либо систему объективных по содержанию *знаний* о мире, либо специализированную по отраслям *деятельность* людей, сопряженную с выработкой указанных знаний, либо *социальный институт*, обеспечивающий устойчивость осуществления этой специализированной деятельности. В широком смысле слова наука есть социальное явление, включающее в себя системным образом и первое, и второе, и третье. В тексте данной статьи понятие «наука» используется преимущественно в узком смысле слова: как специализированная *деятельность*, поскольку она выполняет роль стержня, скрепляющего остальные составляющие науки.

Практику точно также можно рассматривать одновременно и как социальный *институт*, и как *деятельность* людей, направленную на преобразование существующего мира, неважно, духовного или материального, и как совокупность ее *результатов*, проходящих дистанцию от зарождения до завершения, после чего они могут, оставаться либо внутри практики, обретая статус средств, либо выходят за пределы материнского лона, трансформи-

руясь в элементы научной деятельности, а также модернизированного опыта. В данной работе практика рассматривается, преимущественно, в узком смысле слова, а именно как *деятельность*, поскольку она по отношению к остальным компонентам выполняет роль системообразующего стержня

Сторонники отождествления теории с научной деятельностью оправдывают свою позицию хотя бы уже тем, что теория вплетена в научную деятельность и как продукт, и как исходная предпосылка, и как инструмент. Если данный ход мысли признать правильным, то подобная аргументация, позволяет отождествить теорию не только с научной, но также и с практической деятельностью. Философская теория или «философия, - пишет, например, В.А. Канке, - вплетена в практическую деятельность человека, а это означает, что она – разновидность этой деятельности. Философия есть практическое отношение человека к миру...» [2, 21]. Продолжая мысль В.А. Канке, можно по аналогии заключить, что если философия вплетена в естественнонаучный поиск, то она является разновидностью естественнонаучной деятельности. Несомненно, как философская, так и специальная теория, «вплетаясь», становится составной частью и научной и практической деятельности, но отсюда вовсе не следует вывод о тождестве последних с философской или частно научной теорией. Что касается соотношения деятельности и ее результатов, то последние действительно рождаются в лоне первой. Однако по завершению практической и научной деятельности их результаты приобретают самостоятельное существование. Оставаясь внутри собственной деятельности, их породившей, или переходя в другую деятельность, результаты науки и практики качественно меняют свое место тем, что начинают выполнять уже иную роль: исходных посылок, инструментов, катализаторов, промежуточных звеньев и т.д. В качестве примера можно указать измерительные средства, экспериментальные установки, реактивы, планы, парадигмы, программы, стратегии, и другие конструкторы.

В другом месте своей книги В.А.Канке развивает такую аргументацию, которая нивелирует любые специфические различия между научной и практической деятельностью, тем самым устраняя саму проблему их взаимодействия, несмотря на то, что оно приобрело в наше время поистине глобальный масштаб и значимость. «Практикой, - пишет он, - является не только общественное производство, но и всякая человеческая деятельность. Например, процесс индивидуального мышления – это тоже практика» [2, 236]. Что касается индивидуального мышления, то оно, пронизывает как практическую так и научную деятельность в качестве их неотъемлемой части. Но если в качестве субъекта деятельности рассматривать сложно дифференцированные коллективы, вряд ли будет правильным редуцировать мышление ученых к мышлению практиков. В противном случае мышление и деятельность исследователей, открывших механизм высвобождения энергии атомного ядра, следует отождествить с мышлением и деятельностью летчиков, сбросивших атомные бомбы на Хиросиму и Нагасаки. В.А.Канке без остатка растворяет научную деятельность в практической, ибо для него «все, что выступает как деятельность человека, есть практика» [2, 233]. Думается, что такого рода панпраксиологическая позиция методологически мало способствует как изучению, так и управлению системой совместного развития научного познания и практики, в том числе «наука – производство». Если последовательно развивать данную мысль В.А.Канке, тогда и методологию науки придется считать частным случаем методологии практической деятельности, что, так же не соответствует действительности.

Другая трудность проведения специфического водораздела между практической и научно-исследовательской деятельностью возникает в связи со своеобразием теоретического и эмпирического уровней последней. Демаркация теоретико-познавательной и практической деятельности никогда не вызывала принципиальных трудностей, однако процесс теоретического исследования, при всей своей значимости, далеко не исчерпывает всей полноты научной деятельности. Для соотношения практической деятельности со всей научной деятельностью в целом, теоретическое познание, должно быть дополнено и органично сплавлено в единый монолит с процессом эмпирического познания.

По ходу решения приходится учитывать, что процесс теоретического познания и эмпирического исследования далеко неодинаковым образом связаны с практической деятельностью. Последовательное проведение принципа специфической демаркации между процессом эмпирического исследования и практикой оказалось делом также не простым. Некоторые исследователи относят процесс научно-эмпирического исследования к практической деятельности. Еще со времен И.Канта процесс эмпирического исследования в науке нередко называют «практическим познанием», содержанием которого является отражение мира посредством специально изготовленных материально-технических орудий. В библиографических источниках по истории, гносеологии и философии науки для обозначения эмпирического исследования достаточно часто используют понятие «практика научного исследования» [3, 65]. Корректно ли употребление понятия «практика научного исследования»? Что оно обозначает, практическую или научно-исследовательскую деятельность? Не страдает ли данное понятие двусмысленностью? Чтобы дать правильный ответ, следует конкретно подойти к каждому из видов эмпирического исследования.

Эмпирическое наблюдение как отражение объекта деятельности в его естественном состоянии посредством приборов представляет собой процесс научного познания. Эмпирическое измерение как отражение свойств объекта посредством искусственно созданных материально-технических средств, позволяющих сравнить измеряемую величину с эталоном, нередко оснащенным шкалой, также есть процесс научного познания, за исключением тех случаев, описанных в квантовой физике, где прибор оказывает влияние на свойства измеряемого объекта. Эксперимент в зависимости от выполняемых задач может быть отнесен либо к научной деятельности (например эксперимент Майкельсона-Морли), либо практической (например стендовые или полигонные испытания предельно допустимых характеристик готового изделия). В ходе научного эксперимента устанавливается факт и степень соответствия гипотетического знания существующей реальности. В ходе же практического эксперимента устанавливается факт и степень соответствия трансформированной человеком реальности его целям, желаниям, замыслам.

Принцип опосредованной связи между наукой и практикой

Смысл названия данного принципа означает отсутствие непосредственной связи между специфически обособленными друг от друга практической и научной деятельностью не только на данный момент, но и принципиальную невозможность прямого влияния научного познания на практику, как и, наоборот, прямого воздействия практики на развитие науки.

Когда-то в далеком прошлом существовала прямая непосредственная связь между практическим и исследовательским отношением человека к миру, получившая научное название «синкретическая». Синкретизм связи заключался в том, что практическое действие на предметы автоматически сопровождалось их познанием и, наоборот, познание предметов осуществлялось только путем практического воздействия на них. Фундаментальная основа такого синкретизма в том, что началом истории человеческого труда было совпадение во времени и пространстве и практического изменения, и исследовательского «осознания *ближайшей* чувственно воспринимаемой среды» [4, 31]. Можно отметить, что способ производства и способ познания совпадали как тождество различий.

Другой особенностью синкретического труда древних скотоводов, земледельцев и ремесленников было то, что материальная сторона труда, предполагающий освоение природных ресурсов, и духовная сторона труда, предполагающий освоение социальных ресурсов, входили в одну и ту же не расчлененную деятельность и соотносились как тождество различий. Так, вспашка земли, сев и уборка урожая обязательно включала обращение к соответствующим богам, музыкальные, танцевальные и песенные ритуалы, молитвы, просьбы, покаяния, жертвоприношения и т. д. Ближайшей предпосылкой специфического обособления практики и познания стало разделение между физическим (материальным) и умственным (духовным) трудом. «Разделение труда становится действительным разделением труда

лишь с того момента, - замечает К. Маркс, - когда появляется разделение материального и духовного труда» [4, 30].

Что же обусловило распад непосредственной и переход к опосредованной связи практического и познавательного отношения к миру? Если кратко - кризис указанной связи. Кризис синкретизма обусловлен прогрессом хозяйственной деятельности людей и начался с перехода от освоения «ближайшей чувственно воспринимаемой среды» к освоению чувственно не воспринимаемой и в добавок отдаленной. Однако чувственно наблюдаемые свойства реальности связаны непрерывно с чувственно не наблюдаемыми свойствами. Например, употребив в пищу известное по внешним признакам растение, но неизвестное по внутренним свойствам, первобытный человек или его соплеменник неожиданно заболел или, что не было редкостью, умирал. Это означало, что синкретическое познание, автоматически перенося сведения о чувственно наблюдаемом мире на чувственно не наблюдаемый, создавало ложные картины реальности, а синкретическая практика все чаще оступалась в непознанный, неизвестный, неведомый мир, автоматически опираясь на ложные результаты синкретического познания как на истинные. Данное различие между, условно, синкретическим познанием и синкретической практикой углублялось до крайних степеней.

Последовавшая за неолитической революцией дифференциация хозяйственной деятельности древнего человечества привела ее к разветвлению на скотоводческий, земледельческий, ремесленнический, физический и умственный труд, каждый из которых представлял синкретическое соединение практического и познавательного отношения к миру [5]. Кризис указанного синкретизма усиливался по мере того, как менялась пропорция между сенсорно осязаемыми и сенсорно не осязаемыми фрагментами мира в процессе его освоения хозяйственно-трудовой деятельностью. Когда же в ходе этой деятельности возник необратимый перевес чувственно не наблюдаемой части ее объекта над чувственно наблюдаемой, то обострившийся кризис указанного синкретизма разрешился путем специфического обособления научной и практической деятельности как друг от друга, так и от нерасщепившейся части хозяйственно-трудовой деятельности в виде повседневного опыта.

Указанное разделение труда открыло дорогу к качественно новому познанию, качественно новой практике, их качественно новым достижениям и качественно новым формам обмена последними.

Одним из крупных аргументов, свидетельствующих не только о неизбежном существовании, но и дальнейшей эволюции опосредованной связи между наукой и практикой служит широко известный феномен внедрения научных идей в практику, в сферу производства. Исторические факты свидетельствуют, что время между научным открытием и его практическим применением, как известно, может занимать не один десяток лет. Стремление его сократить – заветная мечта не только творцов научных знаний и техники, но и всего человечества. Реагируя на остроту и громадность проблемы, человечество ответило наряду с исторически ранее сложившимся – теоретическим и эмпирическим исследованием - качественно новым разделением труда в науке – фундаментальными и прикладными исследованиями. Это привело к созданию некоего институционального механизма, что позволило, с одной стороны, одним группам ученых свободно исследовать мир без оглядки на какие-либо практические потребности, а другим, - планомерно, интенсивно, избирательно продумывать варианты наиболее эффективных способов реализации научных идей в практике.

Между тем, кажущийся, на первый взгляд, очевидным принцип опосредованной связи между практикой и научным познанием не всегда проводится последовательно. Для иллюстрации характерно одно из высказываний американского историка и методолога науки Дж. Бернала, считающего, что результаты научного исследования переходят в практическую деятельность напрямую, без малейшей коррекции, без всякого переоформления в цель, желание, потребность, метод или другие опосредствующие звенья. «Перспективы дальнейшего развития химии,- писал он, - хотя, возможно, по существу не являются столь важными, как перспективы развития физики, однако окажут такое же непосредственное влияние на прак-

тику» [6, 152]. Мы не можем признать эту точку зрения правильной на том основании, что если бы отношения между наукой и практикой носили непосредственный характер, то высокий потенциал античной науки не «дождался» бы более тысячи лет своего воплощения в практике. Следовательно, на протяжении всей истории взаимодействия научного познания и производства ни физика, ни химия, ни биология, ни какая-либо другая отрасль науки никогда в прошлом, да и настоящем не были способны оказывать «непосредственное влияние» на практику, производство.

Научная деятельность общества, подчиняющая свое сознание обстоятельствам, и практическая деятельность, подчиняющая эти обстоятельства сознанию, несоизмеримы, подобно катету и гипотенузе или радиусу и длине окружности. Именно поэтому непосредственная связь, непосредственный переход от одного к другому невозможен. Путь от качественно новых результатов научного познания к качественно новым достижениям практики, равно как и обратно, – социальное пространство неопределенной величины. Чем оно будет наполнено и как его преодолеть – предмет неустанного эвристического поиска.

Другим препятствием последовательному проведению принципа опосредованной связи между наукой и практикой является взгляд, по существу, отрицающий родовое сходство фундаментального и прикладного исследования по причине их видового различия. Так, согласно Ю.Ю. Ковалёву, по опосредованному или «непосредственному отношению к практике науки классифицируются на фундаментальные и прикладные» [7, 15]. Он не одинок, четвертью века ранее академик И.И. Синягин высказывает ту же мысль, что, в отличие от фундаментальных, «главная особенность прикладных наук, в том числе сельскохозяйственных, заключается в непосредственном обслуживании производства», но подводит под нее следующее основание: «если фундаментальные науки объясняют мир, то прикладные науки, пользуясь их достижениями, изменяют его» [8, 266]. Приведенная фраза хорошо напоминает стилистику одиннадцатого тезиса К. Маркса о Феейербахе, однако, там демаркация между научным и практическим подходами к миру обозначена с позиций большей определенности и, главное, целостности.

На мой взгляд, И.И. Синягин прав, говоря о существовании опосредствующих звеньев между фундаментальной наукой и практикой, но ошибается, отрицая наличие опосредствующих звеньев между прикладным исследованием и материально-производственной практикой. Причиной ошибочного суждения явилось утверждение о принадлежности прикладному исследованию признака - «изменять» мир, что привело, по сути дела, к отождествлению прикладного исследования с практикой. Прикладная наука связана с практикой несколько иначе, чем фундаментальная, а именно, через модернизированный опыт, однако она также, как и любой процесс познания, специфически обособленный от практики, сохраняет способность лишь «объяснять» мир.

Ошибочное утверждение о том, что фундаментальные исследования относятся к научной деятельности, а прикладные исследования принадлежат практической, основано на том, что видовые различия фундаментальных и прикладных исследований, полностью заслонило их родовое тождество. Прикладное исследование отнюдь не превращается в практическую деятельность, а наряду с фундаментальным исследованием, по-прежнему остается составной частью целостной науки. Тот факт, что «перед прикладными науками стоит проблема, как использовать открытые законы природы для увеличения производства материальных ценностей, необходимых обществу» [там же], указывает всего лишь на необходимость исследования конкретных условий практического воплощения фундаментальных идей. Однако из этих рассуждений отнюдь не следует вывод, будто прикладные науки изменяют мир и тем самым превращаются в практическую деятельность. Такое утверждение – обманчивая кажимость, поскольку по своей сути ни одна из отраслей науки, в том числе и прикладная не преобразует, не меняет, не трансформирует объективный мир, а только лишь отражает его в тех или иных адекватных формах мысли. Разгадка такой кажимости в том, что в ходе прикладного исследования ученый делает объектом познания не только варианты вещественно-

энергетических условий новой практики, но и связанные с ними наиболее вероятные способы практической деятельности, тем самым своеобразно обеспечивая связь практики с фундаментальной наукой.

Принцип системной детерминации науки и практики

Каков характер детерминации совместного функционирования и развития научной и практической деятельности? Чем обусловлено функционирование и развитие научной и практической деятельности в рамках целостности их системного объединения? В отечественной философии советского периода многие десятилетия оттачивался такой детерминистский принцип, согласно которому практика является основой научного познания и, следовательно, последнее производно от первого. В качестве примера сошлемся на следующее рассуждение И.Д. Панцхавы и Б.Я. Пахомова: «Маркс впервые обосновал мысль о том, что особенности самого человека и его мышления определены практической деятельностью, производственной, трудовой деятельностью, которая составляет основу не только человеческой жизни, но и познавательного процесса. Познание вторично по отношению к практической деятельности» [9, 214]. Структура последнего суждения явно указывает на сходство с ответом представителей материализма на основной онтологический вопрос философии. Однако из признания первичности бытия и вторичности сознания отнюдь не следует вывод о первичности практики по отношению к науке. Точно так же, как из идеалистического тезиса о первичности сознания и вторичности бытия вовсе не следует утверждение о том, что научное познание первично по отношению к практике. Вывод о первичности практики по отношению к науке или, наоборот, о первичности науки по отношению к практике одинаково ошибочен. Структуры отношения человеческого сознания к материи и науки с практикой отнюдь не тождественны, ибо природа их в корне различна.

Принципиально весомым основанием для такого утверждения служит реально состоявшееся развертывание исторически крупных форм разделения труда последовавшая за неолитической революцией. Разделению труда на исследовательскую и практическую деятельность подвергся не абсолютно весь синкретический труд. Часть его не разделилась, то есть сохранила свою синкретичность по причине востребованности и оперативности в пределах предметной чувственности. Конкретизируем объяснение: во-первых, чувственно наблюдаемая часть объекта трудовой деятельности непрерывно возрастает в абсолютном смысле, т.е. по отношению к самой себе, хотя в относительном смысле уменьшается, по сравнению с чувственно не наблюдаемой его частью объекта хозяйственной деятельности; во-вторых, чувственно не наблюдаемая часть мира осмысливается через проявления в чувственно наблюдаемой части объекта трудовой деятельности. Нераспавшаяся часть синкретического труда обозначается рядом исследователей понятием «опыт» [10]. Этот опыт используется в качестве опосредствующего звена между наукой и практикой, подвергаясь при этом, определенной модернизации в пределах его специфики.

Ускоряющееся развитие практики и познания, направленных на освоение чувственно не наблюдаемых явлений, с необходимостью породила потребность в создании системы опосредованных звеньев между ними. Вероятно, самыми первыми формами опосредования научной и практической деятельности стали интуиция, обыденный опыт и ритуализированные формы общения.

Таким образом, специфически автономная практика, познание и не расщепившийся обыденный опыт возникли одновременно, а до этого существовали лишь в рамках одной деятельности и синкретически связанном виде. Активность или самодетерминация научной деятельности не порождается самодетерминацией практической, равно как и наоборот. Для построения теории взаимодействия науки и практики особо важно понимать, что утверждение о практике как основе научного познания столь же односторонне, как и противоположное, будто научное познание есть основа практики. Наука и практика взаимно обусловлены.

Поскольку хозяйственная деятельность первобытного общества не представляла собой практики, специфически обособленной от познания, равно как и познавательной дея-

тельности, специфически обособленной от практики, а являла собой синкретическую деятельность, постольку утверждение о первичности практики и вторичности познания столь же ошибочно, как и обратное ему высказывание о первичности познания по отношению к практике. За этим выводом с необходимостью должно следовать и скептическое отношение к такому методологически крупному принципу марксистской философии, согласно которому «общественная жизнь является по существу практической» [11, 3]. Догматическое следование этому принципу явилось одной из причин недооценки начала 4-й информационной революции, неподготовленности к ее разворачиванию в СССР и хронических поражений его руководства в информационных войнах как внутренних, так и внешних.

Активность или спонтанность субъектов научной и практической деятельности является основой системной детерминации их совместного развития в рамках целостного объединения. Взаимодействие активностей субъекта науки и субъекта практики вместе с их целями, средствами, результатами, формами общения является системообразующим фактором. Динамизм содействия научного познания и практики обязан множеству опосредствующих звеньев. Кроме активности субъектов науки и практики, указанное множество включает в себя их потребности, интересы, убеждения, увлеченность, выбор объектов, мировоззрение, изобретение новых методов и средств, смену стратегических ориентиров, формулирование целей и задач, разработку планов, проектов, программ, принятие решений, согласование темпов развития науки, практики, модернизации обыденного опыта и т.д.

Наряду с самодетерминацией науки и практики имеет место их взаимная детерминация. Здесь наука выступает в качестве внешнего фактора практики, а практика - в роли внешнего фактора науки. При этом результаты научного познания детерминируют практическую деятельность, становясь внутренним (когнитивным, методологическим и мировоззренческим) элементом последней, а результаты практической деятельности детерминируют научную также путем перерастания в ее внутренние условия (технические, организационные, информационно-программные). Сказанное вовсе не означает, что наука превращается в непосредственную производительную силу и тем самым поглощается производством. Общим для науки и практики детерминирующим основанием является отношение общества к природе, сложность экологических механизмов ее самовосстановления. Проблема самоорганизации развивающейся системы «наука – практика» особенно обострилась в связи с глобализацией экологических противоречий, экономических кризисов и техногенных катастроф, приобретая неравновесный, нелинейный и во многом не предсказуемый характер [12].

В ходе исторического развития системного объединения науки и практики функцию опосредствующей детерминанты стало выполнять целое множество промежуточных по отношению к ним звеньев. Они представляют систему разнообразных форм связи между наукой и практикой как *внутренней* (постановка задачи, проектирование, планирование, выработка решения, оценка, мотивация, воля, вера, убеждение, интуиция, формализация, обобщение метода, материально-технические и информационно-программные средства деятельности), так и *внешней* (учебно-воспитательная, организационно-экономическая, государственно-политическая, социально-психологическая, коммуникационная, ценностно-нормативная, правовая, регионально-глобальная, управленческая).

Таким образом, детерминация совместного функционирования и развития практической и научной деятельности в исчерпывающей степени не зависит по отдельности ни от одного какого-либо компонента системы, независимо от степени его могущества и значимости, поскольку решающее значение имеет согласованный ансамбль коэволюции всех ее элементов.

Библиографический список

1. **Безчервных, Э.В.** Принцип единства теории и практики [Текст] // Методологические основы научного познания. – М.: Высшая школа, 1972. – 272 с.
2. **Канке, В.А.** Философия. Исторический и систематический курс: учебник / В.А. Канке. – 5-е изд. перераб. и доп. – М.: «Логос», 2003. – 376 с.

3. **Резников, В.М.** Некоторые подходы к проблеме ошибки модели в системах DATA MINING [Текст] // В.М. Резников. Философия науки. 2006. №2. С. 65–70.
4. **Маркс, К.** Немецкая идеология [Текст] / К. Маркс, Ф. Энгельс. Соч. 2-е изд. Т.3. – М.: Госполитиздат, 1955. С.7–544.
5. **Шнирельман, В.А.** Происхождение скотоводства: Культурно-историческая проблема [Текст] / В.А.Шнирельман. – 2-е изд., доп. – М.: Книжный дом ЛИБЕРКОМ, 2012. – 338 с.
6. **Бернал, Дж.** Мировая экономика в переходный период [Текст] // Мир без войны. – М.: Изд-во иностранной литературы, 1960. С. 167–216.
7. **Ковалёв, Ю.Ю.** География мировой науки [Текст] / Ю.Ю. Ковалёв. – М., 2002. – 156 с.
8. **Синягин, И.И.** О взаимодействии фундаментальных и прикладных наук [Текст] // Методологические проблемы научного познания. – Новосибирск: Изд-во «Наука», 1977. С. 265–272.
9. **Панцхава, И.Д.** Диалектический материализм в свете современной науки [Текст] / И.Д. Панцхава, Б.Я. Пахомов. – М.: Мысль, 1971. – 262 с.
10. **Панов, Б.Г.** Чувственное, рациональное, опыт [Текст] / Б.Г. Панов. – М.: Изд-во МГУ. 1976. – 258 с.
11. **Маркс, К.** Тезисы о Фейербахе [Текст] / К. Маркс, Ф. Энгельс. – 2-е изд. Т. 3. – М.: Госполитиздат, 1955. С. 1–4.
12. **Ширшин, Г.А.** Вероятностная связь практики и познания [Текст] // Человек и общество в нестандартных ситуациях: сб. научных трудов. – Н.Новгород, НФ МГЭИ, 2003. С. 231–241.

*Дата поступления
в редакцию 15.06.2014*

G.A. Shirsin

PHILOSOPHICAL AND METHODOLOGICAL PRINCIPLES OF SCIENCE AND PRACTICE JOINT DEVELOPMENT

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

Purpose: The article discusses the most General principles of joint operation and development of science and practice.
Findings: Three principles of joint operation and development of science and practice are revealed. One of them is the principle of the specific delineation of scientific and practical activities. The other principle is mediated communication between them. The third is the principle of the system of determination of scientific and practical activities. The consistent implementation of the first principle is based on the demarcation of practical and, in General, scientific activity, not excluding the empirical level of the latter. The second principle involves mediating communication practice not only in the fundamental science, which, no doubt, but in the same way, and applied. Rationale the third principle denies the thesis of the primacy of practice and secondary nature of scientific knowledge, as well as the thesis about the opposite.
Originality: The contradiction between science and practice, in particular, their spontaneity and interdependent periodically allowed the evolution and quality upgrading intermediate links between them.

Key words: science, practice, syncretic/posredstvannaia communication of practical and research attitude to the world, division of labour, specific separation of ordinary experience, science and practice, the theory of joint development of science and practice, the system determination of practice and scientific knowledge.

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

УДК: 519.81/.83

Е.И. Верещагина

СТАТИСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К РЕШЕНИЮ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ В ТЕОРИИ ИГР

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассматривается задача восстановления платежной матрицы для 2×2 -игры по статистике достаточно длинной серии реализаций игры. Строятся доверительные интервалы и доверительные вероятности для игры, в которой все выигрыши различны. Обсуждается пример, где пара выигрышей совпадает. Для него проверяется гипотеза об оптимальности игры.

Ключевые слова: обратная задача, платёжная матрица, вероятности выигрышей, полиномиальное распределение, доверительный интервал, доверительная вероятность, максимальное правдоподобие.

В работах [1], [2] автором был сформулирован один из вариантов обратной задачи для антагонистической $m \times n$ -игры двух лиц. Под ним автор понимает восстановление платежной матрицы $A = (a_{ij})$ вместе с вероятностями p_1, p_2, \dots, p_m и q_1, q_2, \dots, q_n стратегий игроков по известному множеству $\{b_{ij} \mid b_{ij} \in B\}$, элементами которого являются частоты (вероятности) появления выигрышей a_{ij} . Впрочем, достаточно ограничиться восстановлением матрицы вероятностей $B = (b_{ij})$, каждый элемент которой $b_{ij} = p_i q_j$ и есть вероятность выигрыша a_{ij} , т.к. $p_i = \sum_j b_{ij}$, $q_j = \sum_i b_{ij}$.

Предполагается, что игроки применяют смешанные стратегии, где все стратегии активны. Последнее условие естественно, так как стратегии с нулевыми вероятностями в игре не используются и их исключение из рассмотрения просто меняет формат игры.

Исследование именно этого варианта обратной задачи вызвано следующим соображением. В длинной серии реализации игры сторонний наблюдатель фиксирует исходы (выигрыши) реализаций. Частоты появлений выигрышей, как известно из математической статистики, дают хорошие приближения к их вероятностям. Тем самым наблюдатель находится в ситуации, описываемой обратной задачей.

В работах [1], [2] автором были поставлены и частично решены вопросы существования и единственности решений.

В этой статье исследуется точность статистической оценки для случая 2×2 -игры, где не требуется громоздких вычислений.

Предполагается, что выигрыши можно различить друг от друга.

Однако не следует исключать возможности наличия одинаковых выигрышей. Несмотря на то, что они могут иметь разные вероятности, наблюдатель фиксирует их как один и тот же выигрыш, т.е. он в качестве исходной информации располагает суммой вероятностей одинаковых выигрышей. Соответствующий пример приведен далее.

Следуя приведенной мотивировке обратной задачи, в серии из n повторений игры выигрыши v_1, v_2, v_3, v_4 встречаются соответственно n_1, n_2, n_3, n_4 раз ($n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n$), т.е. известны частоты $\mu_1 = \frac{n_1}{n}, \mu_2 = \frac{n_2}{n}, \mu_3 = \frac{n_3}{n}, \mu_4 = \frac{n_4}{n}$ их появления.

Из теории вероятностей известно, что случайные величины n_1, n_2, n_3, n_4 имеют полиномиальный закон распределения:

$$P_n = P_n(n_1, n_2, \dots, n_k) = \frac{n!}{n_1! n_2! \dots n_k!} P_1^{n_1} \dots P_k^{n_k},$$

где $P_1 + \dots + P_k = 1,$
 $n_1 + n_2 + \dots + n_k = n.$

Поскольку на практике объем n велик, то аппроксимацией является распределение Гаусса:

$$P_n \cong \frac{e^{-(x_1^2 + \dots + x_k^2)/2}}{(\sqrt{2\pi n})^{k-1} \sqrt{P_1 \dots P_k}}, \tag{1}$$

где $x_i = \frac{n_i - nP_i}{\sqrt{nP_i}}.$

Для 2×2 – игры формула (1) примет вид

$$P_n \cong \frac{e^{-(x_1^2 + x_2^2 + x_3^2 + x_4^2)/2}}{(\sqrt{2\pi n})^3 \sqrt{P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4}},$$

где $x_i = \frac{n_i - nP_i}{\sqrt{nP_i}}.$

Неизвестные параметры P_1, P_2, P_3, P_4 ($P_1 > P_2 > P_3 > P_4$) можем найти, применяя метод наибольшего правдоподобия.

Составим функцию правдоподобия:

$$P_1^{n_1} \cdot P_2^{n_2} \cdot P_3^{n_3} \cdot P_4^{n_4} \rightarrow \max,$$

учитывая, что

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$$

и $P_1 P_4 - P_2 P_3 = 0.$

Последнее условие $P_1 P_4 - P_2 P_3 = 0$ есть требование, которому должны удовлетворять исходные данные при решении обратной задачи 2×2 – игры [2].

Найдем логарифмическую функцию правдоподобия:

$$n_1 \ln P_1 + n_2 \ln P_2 + n_3 \ln P_3 + n_4 \ln P_4 \rightarrow \max,$$

при условиях

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1, \tag{2}$$

и $P_1 P_4 - P_2 P_3 = 0.$

Задача (2) решается стандартным методом множителей Лагранжа.

Составляем функцию Лагранжа:

$$L = n_1 \ln P_1 + n_2 \ln P_2 + n_3 \ln P_3 + n_4 \ln P_4 - \lambda_1 (P_1 + P_2 + P_3 + P_4 - 1) - \lambda_2 (P_1 P_4 - P_2 P_3).$$

Необходимые условия экстремума сводятся к системе шести уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\partial L}{\partial P_1} &= \frac{n_1}{P_1} - \lambda_1 - \lambda_2 P_4 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial P_2} &= \frac{n_2}{P_2} - \lambda_1 + \lambda_2 P_3 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial P_3} &= \frac{n_3}{P_3} - \lambda_1 + \lambda_2 P_2 = 0, \\ \frac{\partial L}{\partial P_4} &= \frac{n_4}{P_4} - \lambda_1 - \lambda_2 P_1 = 0, \\ P_1 + P_2 + P_3 + P_4 &= 1, \\ P_1 P_4 - P_2 P_3 &= 0\end{aligned}$$

с шестью неизвестными $P_1, P_2, P_3, P_4, \lambda_1, \lambda_2$ из которой можно, определить эти неизвестные:

$$\begin{aligned}P_1 &= \frac{nn_1 - (n_1 n_4 - n_2 n_3)}{n^2}, \\ P_2 &= \frac{(n_1 + n_2)(n_2 + n_4)}{n^2}, \\ P_3 &= \frac{nn_3 + (n_1 n_4 - n_2 n_3)}{n^2}, \\ P_4 &= \frac{nn_4 - (n_1 n_4 - n_2 n_3)}{n^2}, \\ \lambda_1 &= n, \\ \lambda_2 &= \frac{(n_1 n_4 - n_2 n_3)n^3}{(n_1 + n_2)(n_2 + n_4)(nn_3 + n_1 n_4 - n_2 n_3)}.\end{aligned}\tag{3}$$

Приведем пример, иллюстрирующий методику оценки неизвестных параметров распределения.

Пример 1

Пусть платежная матрица с вероятностями выбора стратегий игроками такова:

$$A = \begin{pmatrix} 1 & -1,76 \\ -1,24 & 0 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0,31 \\ 0,69 \end{matrix}.$$

$$\begin{matrix} 0,44 & 0,56 \end{matrix}$$

Соответствующая ей матрица вероятностей:

$$B = \begin{pmatrix} 0,3864 & 0,3036 \\ 0,1736 & 0,1364 \end{pmatrix}.$$

Была смоделирована серия из $n = 100$ реализаций игры. Выигрыши 0, -1.24, -1.76, 1

появились соответственно в количестве

$$n_1 = 37, n_2 = 34, n_3 = 15, n_4 = 14 \text{ раз } (n_1 + n_2 + n_3 + n_4 = n).$$

Значения неизвестных параметров $P_1^*, P_2^*, P_3^*, P_4^*$ находим по формуле (3)

$$P_1^* = 0,3692, P_2^* = 0,3408, P_3^* = 0,1508, P_4^* = 0,1392.$$

Учитывая, что $P_1^* P_4^* - P_2^* P_3^* = 0$ матрица вероятностей примет вид

$$B^* = \begin{pmatrix} 0,3692 & 0,3408 \\ 0,1508 & 0,1392 \end{pmatrix}.$$

Соответствующая ей платежная матрица с вероятностями выбора стратегий игроками такова

$$A^* = \begin{pmatrix} 0 & -1,24 \\ -1,76 & 1 \end{pmatrix} \begin{matrix} 0,71 \\ 0,29 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0,52 & 0,48 \end{matrix}$$

Как видно, имеет место хорошее совпадение статистики $\left(\frac{n_1}{n} = 0,37; \frac{n_2}{n} = 0,34; \frac{n_3}{n} = 0,15; \frac{n_4}{n} = 0,14\right)$ с исходными вероятностями выигрышей $P_1 = 0,3864; P_2 = 0,3036; P_3 = 0,1736; P_4 = 0,1364$, которые использовались при моделировании примера.

Замечание 1. Решение обратной задачи, т.е. восстановление платежной матрицы A^* вместе с вероятностями p_1^*, p_2^* и q_1^*, q_2^* стратегий игроков получено с точностью до эквивалентности, т.е. перестановке строк (столбцов) в матрице A^* [2].

В случае, если значения P_1, P_2, P_3, P_4 заранее неизвестны и хотелось бы указать интервалы $(P_i^* - \varepsilon, P_i^* + \varepsilon) \forall i = \overline{1,4}$, в которых с заданной вероятностью содержатся $P_i (i = \overline{1,4})$, то обычно используют понятие доверительного интервала и доверительной вероятности.

Из математической статистики известно, что вероятность отклонения относительной частоты от постоянной вероятности в независимых испытаниях равна

$$P(|\mu_i - P_i| < \varepsilon) \cong 2\Phi\left(\varepsilon \sqrt{\frac{n}{pq}}\right) = 2\Phi(t) = \gamma,$$

где $\Phi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^x e^{-z^2/2} dz$ - функция Лапласа.

А искомый доверительный интервал (P_i^1, P_i^2) , который с надежностью γ покрывает оцениваемый параметр $P_i (i = \overline{1,4})$, находят по формулам

$$P_i^1 = \frac{n}{t^2 + n} \left[\mu_i + \frac{t^2}{2n} - t \cdot \sqrt{\frac{\mu_i(1-\mu_i)}{n} + \left(\frac{t}{2n}\right)^2} \right] \\ \text{и} \\ P_i^2 = \frac{n}{t^2 + n} \left[\mu_i + \frac{t^2}{2n} + t \cdot \sqrt{\frac{\mu_i(1-\mu_i)}{n} + \left(\frac{t}{2n}\right)^2} \right]. \tag{4}$$

Используя формулы (4), найдем доверительные интервалы с надежностью $\gamma = 0,95$ для каждой оценки вероятности $P_i (i = \overline{1,4})$, полученной в примере 1.

$$\begin{aligned} 0,282 < P_1 < 0,468, \\ 0,255 < P_2 < 0,437, \\ 0,093 < P_3 < 0,233, \\ 0,085 < P_4 < 0,221. \end{aligned}$$

Отсюда видно, что построенный интервал в каждом из четырех случаев накрывает неизвестный параметр P_i . Надежность вывода равна 0,95.

Если некоторые выигрыши совпадают, то ситуация усложняется. Возможно бесконечное множество решений обратной задачи, поэтому для уменьшения числа вариантов надо добавить дополнительную информацию.

Проиллюстрируем эту ситуацию на следующем примере.

Пример 2

Таблица 1

Выигрыши и частоты появления выигрышей

Выигрыши	0	3	5
Частота появления выигрыша	0,48	0,36	0,16

Проверим, согласуются ли эти экспериментальные данные с гипотезой об оптимальности игры.

С точностью до эквивалентности [2] возможны следующие варианты расположения выигрышей 0, 3, 5 в платежной матрице:

$$\begin{array}{ll}
 1) A_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix} & 2) A_2 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 5 & 0 \end{pmatrix} \\
 3) A_3 = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 3 & 5 \end{pmatrix} & 4) A_4 = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 5 & 3 \end{pmatrix} \\
 5) A_5 = \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ 5 & 3 \end{pmatrix} & 6) A_6 = \begin{pmatrix} 0 & 3 \\ 5 & 5 \end{pmatrix}.
 \end{array}$$

Во всех случаях, за исключением первого и пятого, имеется седловая точка и оптимальная игра производится в чистых стратегиях. Реализация игры дает один и тот же выигрыш. Следовательно, статистика нашего примера отвергает эти возможности.

В первом случае платежная матрица и вероятности выбора стратегий игроками с учетом условия оптимальности выглядит так:

$$A_1 = \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 0 & 5 \end{pmatrix} \begin{matrix} 5/8 \\ 3/8 \end{matrix} \\
 \begin{matrix} 5 & 3 \\ 8 & 8 \end{matrix}$$

Теоретические вероятности выигрышей (табл. 2).

Таблица 2

Выигрыши и теоретические вероятности появления выигрышей

Выигрыши	0	3	5
Вероятность появления выигрыша	0,468	0,391	0,141

Как видно, гипотезу об оптимальности игры следует принять.

Оптимальное решение игры с платежной матрицей

$$A_5 = \begin{pmatrix} 0 & 5 \\ 5 & 3 \end{pmatrix}$$

таково:

$$P^* = (2/7, 5/7); Q^* = (2/7, 5/7), v = 25/7.$$

Из табл. 3, в которой представлены теоретические вероятности выигрышей видно, что данное решение обратной задачи не соответствует оптимальному поведению игроков и его следует отвергнуть.

Таблица 3

Выигрыши и теоретические вероятности появления выигрышей

Выигрыши	0	3	5
Вероятность появления выигрыша	0,082	0,51	0,408

Библиографический список

1. **Верещагина, Е.И.** Об одной обратной задаче теории игр // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского / Издательство Нижегородского государственного университета. – Н. Новгород, 2013. №4 (1). С. 194–198.
2. Обратная задача в теории 2×2 – игр // Управление экономическими системами: электронный научный журнал. 2014. №2 (62)
3. **Верещагина, Е.И.** О единственности решения обратной задачи антагонистической игры с различными элементами платёжной матрицы // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева / НГТУ. – Н. Новгород, 2011. №1 (86). С. 346–352.
4. Bohnenblust, H.F. Karlin S., Shapley L.S. Solutions of discrete two-person games, Contributions to the theory of games 1 (1950), Princeton, 51-72.
(Имеется русский перевод в сборнике Матричные игры: сб. переводов; под ред. Н.Н. Воробьева. – М.: Государственное издательство физико-математической литературы, 1961. – 280 с.)
5. **Петросян, Л.А.** Теория игр / Л.А. Петросян, Н.А. Зенкевич, Е.В. Шевкопляс. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: БХВ-Петербург, 2012. – 432 с.
6. **Гмурман, В.Е.** Теория вероятностей и математическая статистика: учеб. пособие / В.Е. Гмурман. – 9-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2003. – 479 с.

Дата поступления
в редакцию 06.07.2014

E.I. Vereshchagina

**STATISTICAL APPROACH TO THE SOLVING OF THE INVERSE PROBLEM
OF THE GAMES THEORY**

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

Purpose: In works [1], [2] the inverse problem of a two player $m \times n$ – games was investigated. In this article the task of restoring the payoff matrix for 2×2 – games for statistics sufficient long series of the realizations of the game is considered.

Design/methodology/approach: Statistical methods are used.

Findings Confidence intervals and confidence probabilities for the game in which the payoff matrix consists of different elements are built. The example, where the pair of wins coincides, is discussed. The hypothesis about the optimality of game is checked for it.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the game theory.

Originality/value: These results are new.

Keywords: inverse problem, payoff matrix, win probability, polynomial distribution, confidence interval, confidence probability, maximum likelihood.

УДК 514.76 + 517.93

В.А. Игошин, А.М. Кузин, М.Н. Баренбойм

О КВАЗИПЛАНИМЕТРИИ

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Доказано, что размерность алгебры Ли инфинитезимальных движений квазиплоскости: аффинных, геодезических тривиальных – равна двум, в отличие от шестимерных алгебр Ли аффинных и геодезических тривиальных движений собственно евклидовой плоскости; алгебра Ли инфинитезимальных проективных симметрий квазиплоскости восьмимерна, как и для обычной плоскости. Получена топологическая картина пучка «прямых» – геодезических линий квазиплоскости; в частности, доказано, что любой такой пучок идентичен (изоморфен) пучку с центром в начале координат.

Ключевые слова: евклидово пространство, тензор кручения, квазиплоскость, геометризация физики, геодезические, инфинитезимальные аффинные симметрии, проективные симметрии, алгебра Ли, связность.

На протяжении многих веков человек стремился постичь окружающий нас мир, понять, как он устроен. Важную роль в этом сыграла геометрия, изучающая само пространство, его устройство и свойства. Родоначальниками геометрии как систематической науки являются древние греки, перенявшие у египтян ремесло землемерия и измерения объёмов тел и превратившие его в строгую научную дисциплину. При этом античные геометры от набора рецептов перешли к установлению общих закономерностей, составили первые систематические и доказательные труды по геометрии. Центральное место среди них занимают «Начала» Евклида (около 300 лет до н. э.). Этот труд – образец изложения в духе аксиоматического метода: все положения выводятся логическим путём из небольшого числа явно указанных и не доказываемых предположений – аксиом.

Сейчас *евклидова* геометрия представляет собой целую науку, которая продолжает развиваться и называется *собственно евклидовой*. Более 150 лет назад Н.И. Лобачевский открыл одну из первых *неевклидовых* геометрий.

Великим событием стало открытие Декартом в XVII веке *координатного метода* («Рассуждение о методе», 1637), что позволяет изучать отношения между геометрическими объектами методами алгебры. Так появилась *аналитическая геометрия*, изучающая фигуры и геометрические преобразования, которые в координатах задаются алгебраическими уравнениями. Практически одновременно с этим Паскалем и Дезаргом начато исследование свойств плоских фигур, не меняющихся при проектировании с одной плоскости на другую. Этот раздел получил название *проективной геометрии*. Метод координат лежит в основе появившейся несколько позже *дифференциальной геометрии*, где геометрические фигуры и преобразования все ещё задаются в координатах, но уже их геометрические свойства изучаются методами математического анализа. Согласно «Эрлангенской программе» Ф. Клейна, геометрия изучает все те свойства фигур, которые инвариантны относительно преобразований некоторой группы, при этом каждая группа задаёт свою геометрию. Так, изометрии (движения) евклидовых пространств задают евклидову геометрию, группа аффинных преобразований *аффинных пространств* – *аффинную геометрию*.

Римановым пространствам посвящена масса работ известных математиков, таких как Э. Картан, Софус Ли, Т. Леви-Чивита и другие. Среди русских геометров: В.Ф. Каган, А. С. Солодовников, П. К. Рашевский, Я. Л. Шапиро, В. А. Игошин и многие другие.

Римановы пространства с кручением введены Э. Картаном в 1922 году. Они остаются практически забытыми. В отличие от кривизны, кручение является «вещью в себе» для многих математиков, даже специалистов-геометров.

Недавно геометрия «крученных» пространств применена В.А. Игошиным в классической проблеме геометризации физики. Им были построены геометрические модели:

- 1) постоянного магнитного поля ([7]);
- 2) постоянного электрического поля ([9]), постоянного электромагнитного поля ([12]).

Геометрическим эквивалентом поля оказался тензор кручения; кривизна же обращается в нуль, в отличие от моделирования А. Эйнштейном гравитационного поля в его общей теории относительности. Эти результаты показывают, что крученные пространства играют существенную роль в проблеме геометризации физики, именно поэтому их исследование приобретает приоритетный характер.

1. Приведем доказательство естественного обобщения классической теоремы Т. Леви-Чивиты.

Теорема 1. В римановом пространстве $V_n = (M, g_{ij})$ можно построить и притом единственным образом аффинную связность $\Gamma_{ij}^k(x)$, обладающую следующими двумя свойствами:

1. $T_{ij}^k = \Gamma_{ij}^k - \Gamma_{ji}^k$ – тензор кручения, является произвольным (наперед заданным; случай равенства его нулю не исключается).
2. Всякий раз, когда вдоль какого-либо пути одновременно переносятся параллельно два вектора ξ и η , их скалярное произведение не меняется.

Такую аффинную связность принято называть римановой связностью с кручением, или метрической связностью с кручением.

Доказательство. Риманова связность ∇ определяется тем, что для нее ковариантная производная метрического тензора обращается в нуль:

$$\nabla_k g_{ij} \equiv 0, \tag{1}$$

так как $\nabla_k g_{ij} = \partial_k g_{ij} - \Gamma_{ki}^s g_{sj} - \Gamma_{kj}^s g_{is}$, то, циклируя (1) по индексам i, j, k , получаем систему трех тождеств:

$$\partial_k g_{ij} - \Gamma_{ki}^s g_{sj} - \Gamma_{kj}^s g_{is} = 0, \partial_i g_{jk} - \Gamma_{ij}^s g_{sk} - \Gamma_{ik}^s g_{js} = 0, \partial_j g_{ki} - \Gamma_{jk}^s g_{si} - \Gamma_{ji}^s g_{ks} = 0.$$

Складывая второе и третье и вычитая первое, приходим к соотношению

$$\partial_i g_{jk} + \partial_j g_{ki} - \partial_k g_{ij} + g_{is} (\Gamma_{kj}^s - \Gamma_{jk}^s) + g_{sj} (\Gamma_{ki}^s - \Gamma_{ik}^s) + g_{ks} (\Gamma_{ij}^s - \Gamma_{ji}^s) - 2g_{ks} \Gamma_{ij}^s = 0.$$

Свернем последнее с обратным метрическим тензором, умножив обе части на g^{kl} . В итоге получаем окончательную формулу для нахождения коэффициентов связности Γ_{ij}^l с учетом кручения:

$$\Gamma_{ij}^l = \frac{1}{2} g^{kl} (\partial_i g_{jk} + \partial_j g_{ki} - \partial_k g_{ij}) + \frac{1}{2} (T_{ij}^l + g^{kl} (g_{is} T_{kj}^s + g_{sj} T_{ki}^s)), \tag{2}$$

где $T_{ij}^l = \Gamma_{ij}^l - \Gamma_{ji}^l$, $T_{kj}^s = \Gamma_{kj}^s - \Gamma_{jk}^s$, $T_{ki}^s = \Gamma_{ki}^s - \Gamma_{ik}^s$.

Анализ последнего тождества завершает доказательство теоремы 1.

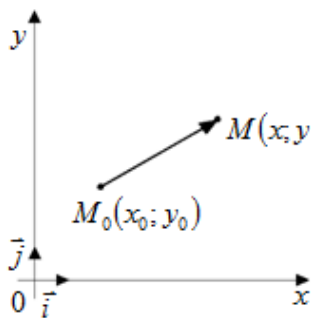


Рис. 1

2. Определение. В случае, когда $M = R^n$ и $g_{ij} = \delta_{ij}$, пространство $(M = R^n, g_{ij} = \delta_{ij}, T_{ij}, \Gamma_{ij}^k)$ назовем квазиевклидовым; в частности, при $n = 2$ пространство $(R^2, \delta_{ij}, T_{ij}, \Gamma_{ij}^k)$ будем называть квазиевклидовой плоскостью, или просто квазиплоскостью.

В качестве двумерного многообразия возьмем обычную плоскость с обычной топологией, которую можно отождествить с двумерным арифметическим пространством R^2 , точками в котором являются упорядоченные пары вещественных

чисел x, y . Будем считать плоскость евклидовой, т.е. иными словами, считаем заданным метрический тензор g_{ij} . Далее используется декартова система координат xOy (рис. 1).

Введем обозначения $dx = x - x_0$, $dy = y - y_0$ – координаты бесконечно малого вектора. Квадрат расстояния между точками M и M_0 – первая основная квадратичная форма в этих координатах записывается в виде: $ds^2 = dx^2 + dy^2 = g_{ij} dx^i dx^j$.

Таким образом, коэффициенты (координаты) дважды ковариантного метрического тензора g_{ij} совпадают с символами Кронекера: $g_{ij} = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{при } i = j \\ 0, & \text{при } i \neq j \end{cases}$, которые составляют матрицу Грамма $(g_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$.

Обратный дважды контравариантный метрический тензор также задается единичной матрицей: $(g^{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$. При этом взятая декартова система координат

является прямоугольной и базисные векторы на осях это единичные орты \vec{i} и \vec{j} .

Компоненты постоянного тензора кручения в общем случае имеют вид

$$(T_{ij}^1) = \begin{pmatrix} 0 & a \\ -a & 0 \end{pmatrix}, (T_{ij}^2) = \begin{pmatrix} 0 & b \\ -b & 0 \end{pmatrix},$$

где a, b – произвольные константы.

Формула из теоремы 1 упрощается: $\Gamma_{ij}^k = \frac{1}{2} (T_{ij}^k + g^{ks} (g_{im} T_{sj}^m + g_{mj} T_{si}^m))$. Но вычисление коэффициентов связности – очень трудоемкая задача. Для упрощения вычислений был разработан программный комплекс *Symmetries*, в результате применения которого получено:

$$(\Gamma_{ij}^1) = \begin{pmatrix} 0 & a \\ 0 & b \end{pmatrix}, (\Gamma_{ij}^2) = \begin{pmatrix} -a & 0 \\ -b & 0 \end{pmatrix}.$$

Найдем алгебру Ли векторных полей, являющихся инфинитезимальными аффинными симметриями.

Система уравнений Софуса Ли

$$L_X \Gamma_{ij}^k = \partial_{ij} X^k + \partial_i X^s \Gamma_{sj}^k + \partial_j X^s \Gamma_{is}^k - \partial_s X^k \Gamma_{ij}^s + X^s \partial_s \Gamma_{ij}^k = 0, \quad (3)$$

построенная с помощью программного комплекса выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} L_X \Gamma_{11}^1 = \partial_{11} X^1 + a \partial_1 X^2 + a \partial_2 X^1 = 0, L_X \Gamma_{12}^1 = \partial_{12} X^1 + a \partial_1 X^1 + b \partial_1 X^2 + 2a \partial_2 X^2 = 0, \\ L_X \Gamma_{21}^1 = \partial_{21} X^1 + b \partial_2 X^1 + b \partial_1 X^2 = 0, L_X \Gamma_{22}^1 = \partial_{22} X^1 + a \partial_2 X^1 + 3b \partial_2 X^2 = 0, \\ L_X \Gamma_{11}^2 = \partial_{11} X^2 - 3a \partial_1 X^1 - b \partial_1 X^2 = 0, L_X \Gamma_{12}^2 = \partial_{12} X^2 - a \partial_2 X^1 - a \partial_1 X^2 = 0, \\ L_X \Gamma_{21}^2 = \partial_{21} X^2 - a \partial_2 X^1 - 2b \partial_1 X^1 - b \partial_2 X^2 = 0, L_X \Gamma_{22}^2 = \partial_{22} X^2 - b \partial_2 X^1 - b \partial_1 X^2 = 0. \end{cases}$$

Решив эту систему дифференциальных уравнений с помощью программного пакета *Maple*, получаем, что компоненты искомого векторного поля X – общее решение системы (3) – имеют вид

$$X^1 = A = \text{const}, X^2 = B = \text{const}, \quad (4)$$

если хотя бы одна из произвольных констант a, b не равна нулю

$$X^1 = Ax_1 + Bx_2 + C, X^2 = Dx_1 + Ex_2 + F, \quad (5)$$

где $x_1 = x$ и $x_2 = y$, если $a = b = 0$; при этом A, B, C, D, E , и F – const.

В случае (4) легко выделить базисные векторные поля – генераторы алгебры Ли аффинных симметрий квазиплоскости: $X_1 = (1, 0), X_2 = (0, 1)$. Итак, эта алгебра оказалась двумерной.

В случае (5), т.е. при нулевом тензоре кручения, квазиплоскость превращается в соб-

ственно евклидову плоскость. Придавая константам A, B, C, D, E, F шесть серий значений так, чтобы составленная из них матрица была единичной, получаем следующие базисные векторные поля – генераторы алгебры Ли аффинных движений обычной евклидовой плоскости: $X_1 = (x_1, 0), X_2 = (x_2, 0), X_3 = (1, 0), X_4 = (0, x_1), X_5 = (0, x_2), X_6 = (0, 1)$. Таким образом, данная алгебра – шестимерна, что, впрочем, общеизвестно.

В таких случаях говорят, что евклидова плоскость имеет большую аффинную подвижность по сравнению с квазиплоскостью.

3. Лемма 1. Коэффициенты любой аффинной связности, в частности, полученные в пункте 2, можно записать в виде: $\Gamma_{ij}^k = \Gamma_{(ij)}^k + \Gamma_{[ij]}^k$. При этом первое слагаемое находится симметрированием найденных коэффициентов связности по нижним индексам:

$$\Gamma_{(ij)}^k = \frac{1}{2}(\Gamma_{ij}^k + \Gamma_{ji}^k), \text{ а второе альтернированием: } \Gamma_{[ij]}^k = \frac{1}{2}(\Gamma_{ij}^k - \Gamma_{ji}^k) = \frac{1}{2}T_{ij}^k. \text{ Равенства:}$$

$$\left(\Gamma_{(ij)}^1\right) = \begin{pmatrix} 0 & a/2 \\ a/2 & b \end{pmatrix}; \left(\Gamma_{(ij)}^2\right) = \begin{pmatrix} -a & -b/2 \\ -b/2 & 0 \end{pmatrix} \text{ определяют компоненты некоторой новой аф-}$$

финной связности, имеющей те же геодезические линии, что и исходная связность Γ_{ij}^k .

Система С. Ли уравнений в частных производных для нахождения геодезических симметрий, т.е. симметрий, сохраняющих геодезические линии связности вместе с каноническим параметром на каждой из них, имеет вид

$$\begin{cases} \partial_{11}X^1 + a\partial_1X^2 + a\partial_2X^1 = 0, \partial_{12}X^1 + b\partial_1X^2 + \frac{b}{2}\partial_2X^1 + \frac{a}{2}\partial_2X^2 = 0; \\ \partial_{22}X^1 - b\partial_1X^1 + a\partial_2X^1 + 2a\partial_2X^2 = 0, \partial_{11}X^2 - 2a\partial_1X^1 - b\partial_1X^2 + a\partial_2X^2 = 0; \\ \partial_{12}X^2 - \frac{b}{2}\partial_1X^1 - \frac{a}{2}\partial_1X^2 - a\partial_2X^1 = 0, \partial_{22}X^2 - b\partial_1X^2 - b\partial_2X^1 = 0. \end{cases}$$

Общее решение этой системы – $X^1 = A = \text{const}, X^2 = B = \text{const}$, если хотя бы одна из констант a или b не равна нулю. Следовательно, размерность алгебры Ли геодезических симметрий квазиплоскости равна двум.

В случае обычной плоскости, т.е. при $a = b = 0$ – $X^1 = Ax_1 + Bx_2 + C, X^2 = Dx_1 + Ex_2 + F$, если $a = b = 0$, что означает тот факт, что размерность алгебры ли геодезических симметрий евклидовой плоскости равна шести.

Найдем инфинитезимальные проективные симметрии, т.е. произвольные геодезические симметрии, которые могут не сохранять аффинный параметр. Для этого вычислим проективные параметры Томаса – коэффициенты проективной связности квазиплоскости по следующей формуле $\Pi_{ij}^k = \Gamma_{(ij)}^k - \frac{1}{n+1}(\delta_i^k \Gamma_{(sj)}^s + \delta_j^k \Gamma_{(si)}^s)$.

$$\Pi_{ij}^k = \Gamma_{(ij)}^k - \frac{1}{n+1}(\delta_i^k \Gamma_{(sj)}^s + \delta_j^k \Gamma_{(si)}^s).$$

$$\text{В матричной записи: } \left(\Pi_{ij}^1\right) = \begin{pmatrix} b/3 & a/3 \\ a/3 & b \end{pmatrix}; \left(\Pi_{ij}^2\right) = \begin{pmatrix} -a & -b/3 \\ -b/3 & -a/3 \end{pmatrix}.$$

Система уравнений С. Ли в данном случае имеет вид

$$\begin{cases} \frac{1}{3}\partial_{11}X^1 - \frac{2}{3}\partial_{12}X^2 + \frac{b}{3}\partial_1X^1 + \frac{2a}{3}\partial_1X^2 + a\partial_2X^1 = 0, \frac{2}{3}\partial_{12}X^1 - \frac{1}{3}\partial_{22}X^2 + b\partial_1X^2 + \frac{2b}{3}\partial_2X^1 + \frac{a}{3}\partial_2X^2 = 0 \\ \partial_{22}X^1 + a\partial_2X^1 + 2b\partial_2X^2 - b\partial_1X^1 = 0, \partial_{11}X^2 - 2a\partial_1X^1 - b\partial_1X^2 + a\partial_2X^2 = 0 \end{cases}$$

Общее решение данной системы в случае квазиплоскости можно разделить на четыре случая в зависимости от значения констант a и b :

$$X^1 = -[(-C_4 \sin bx_2 + C_3 \cos bx_2) \cos ax_1 - \sin ax_1 (C_3 \sin bx_2 + C_4 \cos bx_2)] e^{bx_1 - ax_2} - [(-C_2 \sin bx_2 + C_1 \cos bx_2) \cos ax_1 - \sin ax_1 (C_1 \sin bx_2 + C_2 \cos bx_2)] e^{ax_2 - bx_1} + (C_6 \sin 2bx_2 - C_5 \cos 2bx_2) \cos 2ax_1 + C_7 + C_5 \sin 2bx_2 \sin 2ax_1 + C_6 \cos 2bx_2 \sin 2ax_1,$$

$$X^2 = \frac{1}{b} \int [-2b^2 C_5 \cos(2bx_2 + 2ax_1) + 2b^2 C_6 \sin(2bx_2 + 2ax_1) + a((aC_1 - bC_2) \cos(ax_1 + bx_2) - \sin(ax_1 + bx_2)(aC_2 + bC_1))] e^{ax_2 - bx_1} + ((aC_4 - bC_3) \cos(ax_1 + bx_2) + \sin(ax_1 + bx_2)(aC_3 + bC_4)) \cdot b e^{bx_1 - ax_2} dy + \frac{1}{b} \int [-\{ \int (4b^2 C_6 \cos(2bx_2 + 2ax_1) a + 4b^2 C_5 \sin(2bx_2 + 2ax_1) a - a((-b^2 C_2 + 2abC_1 + a^2 C_2) \cos(ax_1 + bx_2) + \sin(ax_1 + bx_2)(-2abC_2 - b^2 C_1 + a^2 C_1)) e^{ax_2 - bx_1} + ((2abC_4 + a^2 C_3 - b^2 C_3) \cdot \cos(ax_1 + bx_2) - \sin(ax_1 + bx_2)(b^2 C_4 - 2abC_3 - b^2 C_4)) b e^{bx_1 - ax_2} dy \} - 2bC_5 a \cos(2bx_2 + 2ax_1) + 2bC_6 a \sin(2bx_2 + 2ax_1) + ((-abC_1 - a^2 C_2) \cos(ax_1 + bx_2) + (abC_2 - a^2 C_1) \sin(ax_1 + bx_2)) e^{ax_2 - bx_1} + ((-abC_3 - b^2 C_4) \cos(ax_1 + bx_2) + (abC_4 - b^2 C_3) \sin(ax_1 + bx_2)) e^{bx_1 - ax_2}] dx + C_8,$$

если a и b не равны нулю;

$$X^1 = \frac{1}{b} [b(C_1 \cos(bx_2) e^{bx_1} - C_2 \sin(bx_2) e^{bx_1} + C_4 \cos(2bx_2) - C_5 \sin(2bx_2) + C_6) + (-C_8 \cos(bx_2) - C_7 \sin(bx_2)) e^{-bx_1}], X^2 = (C_1 \sin(bx_2) + C_2 \cos(bx_2)) e^{bx_1} + C_3 + C_4 \sin(2bx_2) + C_5 \cos(2bx_2)$$

если $a = 0, b \neq 0$;

$$X^1 = (C_1 \sin(ax_1) + C_2 \cos(ax_1)) e^{-ax_2} + C_3 + C_4 \sin(2ax_1) + C_5 \cos(2ax_1), X^2 = \frac{1}{a} [-a(C_1 \cos(ax_1) - C_2 \sin(ax_2)) e^{-ax_2} + a(-C_4 \cos(2ax_1) + C_5 \sin(2ax_1) + C_6) + C_7 \sin(ax_1) e^{ax_2} + C_8 \cos(ax_1) e^{ax_2}]$$

если $a \neq 0, b = 0$;

$$X^1 = C_1 x_1^2 + \frac{1}{2} C_3 x_1 x_2 + C_6 x_2 + C_7 x_1 + C_8, X^2 = C_1 x_1 x_2 + C_2 x_1 + \frac{1}{2} C_3 x_2^2 + C_4 x_2 + C_5,$$

если $a = b = 0$; $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8 - \text{const}$.

Во всех четырех случаях размерность алгебры Ли равна восьми.

4. Найдем теперь геодезические линии квазиевклидовой плоскости. *Геодезические линии* в пространстве аффинной связности играют приблизительно такую же роль, как прямые линии в аффинном пространстве. Именно, они обладают тем же основным свойством – *постоянством направления*. Для прямых линий это свойство выражается в том, что вектор, направленный по данной прямой линии в какой-нибудь ее точке, будет направлен по ней и в любой другой ее точке после параллельного переноса его вдоль этой линии в указанную точку.

Геодезические линии находятся из следующей системы обыкновенных дифференциальных второго уравнений:

$$\frac{d^2 x^k}{dt^2} = -\Gamma_{ij}^k \frac{dx^i}{dt} \frac{dx^j}{dt}.$$

Коэффициенты аффинной связности Γ_{ij}^k были найдены ранее:

$$(\Gamma_{ij}^1) = \begin{pmatrix} 0 & a \\ 0 & b \end{pmatrix}; (\Gamma_{ij}^2) = \begin{pmatrix} -a & 0 \\ -b & 0 \end{pmatrix}$$

С учетом найденных коэффициентов и приняв замену $x^1 = x, x^2 = y$, система уравнений геодезических линий примет вид

$$\ddot{x} = -\dot{y}(ax + by), \ddot{y} = \dot{x}(ax + by). \tag{6}$$

Теорема 2. Дифференциальные уравнения геодезических линий квазиплоскости, или, что то же самое, аффинной (метрической) связности Γ_{ij}^k имеют вид $\ddot{x} = -(a\dot{x} + b\dot{y})\dot{y}$, $\ddot{y} = (a\dot{x} + b\dot{y})\dot{x}$.

Решим далее полученные дифференциальные уравнения и найдем геодезические линии.

Возможны два случая.

1. $a\dot{x} + b\dot{y} \equiv 0$ в каждой точке t .

а) $\dot{x} \equiv \dot{y} \equiv 0 \Rightarrow \vec{v} = \vec{v}_0 = 0$.

Геодезические линии вырождаются в точки – положения равновесия: $x = x_0, y = y_0$.

б) $\vec{v} \neq 0 \quad a\dot{x} + b\dot{y} = 0 \Rightarrow \overline{(a, b)} \perp \vec{v}$

Геодезические линии – прямые $x = \dot{x}_0 t + x_0, y = \dot{y}_0 t + y_0$, перпендикулярные вектору $\overline{(a, b)}$.

2. $a\dot{x} + b\dot{y} \neq 0$

Лемма 2. Система уравнений геодезических допускает интеграл (энергии): $\dot{x}^2 + \dot{y}^2 = r^2, r^2 = \text{const}$.

Лемма 3. Если $\psi = a\dot{x} + b\dot{y} = 0$ ($\psi \neq 0$) в некоторой точке $t = t_0$, то $\psi \equiv 0$ ($\psi \neq 0$) в каждой точке $t \in (-\infty, +\infty)$.

Найдем уравнения геодезических линий для случая $a = 0, b = 1$. Сделаем замену, с учетом того, что $r = \text{const}$ (согласно лемме 1): $\dot{x} = r \cos \varphi, \dot{y} = r \sin \varphi, \ddot{x} = -r\dot{\varphi} \sin \varphi, \ddot{y} = r\dot{\varphi} \cos \varphi$.

Исходная система принимает вид:

$$-r\dot{\varphi} \sin \varphi = -r \sin \varphi (ar \cos \varphi + br \sin \varphi), r\dot{\varphi} \cos \varphi = r \cos \varphi (ar \cos \varphi + br \sin \varphi).$$

Отсюда следует, что $\dot{\varphi} = ar \cos \varphi + br \sin \varphi$.

Подставив $a = 0, b = 1$, получаем, что система представляется в виде

$$d\varphi/dt = r \sin \varphi.$$

Без нарушения общности можно предположить, что $r = 1$.

Решая, приходим к системе вида

$$\dot{x} = -t h(t + C), \dot{y} = \frac{2e^{t+C}}{1 + e^{2(t+C)}}.$$

Решив ее, получаем, что уравнения геодезических выглядят следующим образом:

$$x(t) = -\ln|ch(t + C)| + C_1, y(t) = 2\text{arctg}(e^{t+C}) + C_2.$$

Возьмем следующие начальные условия: $x(0) = x_0, y(0) = y_0$. Начальные условия второго рода оставим варьируемыми.

$$\dot{x} = r \cos \varphi, \dot{y} = r \sin \varphi \Rightarrow \dot{y}/\dot{x} = \text{tg} \varphi \Rightarrow \varphi = \text{arctg}(\dot{y}/\dot{x})$$

$$\varphi_0 = \text{arctg}(\dot{y}(0)/\dot{x}(0)), \varphi(0) = 2\text{arctg}(e^C) \Rightarrow C = \ln(\text{tg}(\varphi_0/2))$$

$$x(0) = -\ln|ch(\ln(\text{tg}(\varphi_0/2)))| + C_1 = 0 \quad C_1 = \ln|ch(\ln(\text{tg}(\varphi_0/2)))| = \ln|1/\sin \varphi_0|$$

$$y(0) = 2\text{arctg}(\text{tg}(\varphi_0/2)) + C_2 = 0 \quad C_2 = -2\text{arctg}(\text{tg}(\varphi_0/2))$$

В итоге получаем

$$x(t) = x_0 - \ln ch(\ln(\text{tg}(\varphi_0/2)) - t) + \ln(1/\sin \varphi_0), y(t) = y_0 + 2\text{arctg}(e^{-t} \text{tg}(\varphi_0/2)) - \varphi_0. \quad \varphi_0 \in (0; \pi)$$

Символом $l(x_0, y_0, \varphi_0)$ обозначим геодезическую, проходящую при $t = 0$ через точку $(x_0; y_0)$ под углом φ_0 между вектором начальной скорости $\vec{v}_0 = (\dot{x}_0; \dot{y}_0)$ и осью абсцисс Ox .

Считаем также что длина $|\vec{v}_0| = 1$.

Теорема 3. Если $\psi \equiv 0$, то геодезические либо:

а) вырождаются в отдельные точки – положения равновесия;

б) являются прямыми, перпендикулярными вектору $\vec{K} = (a, b)$. Если же $\psi \neq 0$, то параметрические уравнения геодезических линий $l(x_0, y_0, \varphi_0)$ квазиплоскости приводятся к виду $x = x(t) = x_0 - \ln \operatorname{ch}(t + \ln(\operatorname{tg}(\varphi_0/2))) - \ln(1/\sin \varphi_0)$, $y = y(t) = y_0 + 2 \operatorname{arctg}(e^{-t} \operatorname{tg}(\varphi_0/2)) - \varphi_0$, $\varphi_0 \in (0; \pi)$

Замечание. При фиксированной точке $(x_0; y_0)$ получаем целый пучок геодезических линий с центром в заданной точке $(x_0; y_0)$ квазиевклидовой плоскости. Совокупность геодезических $l(x_0, y_0, \varphi_0)$ исчерпывает семейство всевозможных геодезических нашей плоскости, если иметь в виду, что $\varphi_0 \in (0, \pi)$, а точка $(x_0; y_0)$ – центр пучка – пробегает всю квазиплоскость.

Теорема 4. Пучок геодезических квазиплоскости с центром в произвольной точке $(x_0; y_0)$ получается сдвигом пучка с центром в точке $(0; 0)$ на вектор (x_0, y_0) .

Теорема 5. Всевозможные сдвиги квазиплоскости на любой постоянный вектор образуют двумерную группу Ли ее движений (симметрий), сохраняющую ее метрику g_{ij} , связность $\Gamma_{\beta\gamma}^\alpha$ и геодезические линии.

Общая топологическая картина поведения геодезических любого фиксированного пучка представлена (рис. 2) на примере пучка с центром в точке $(0; 0)$.

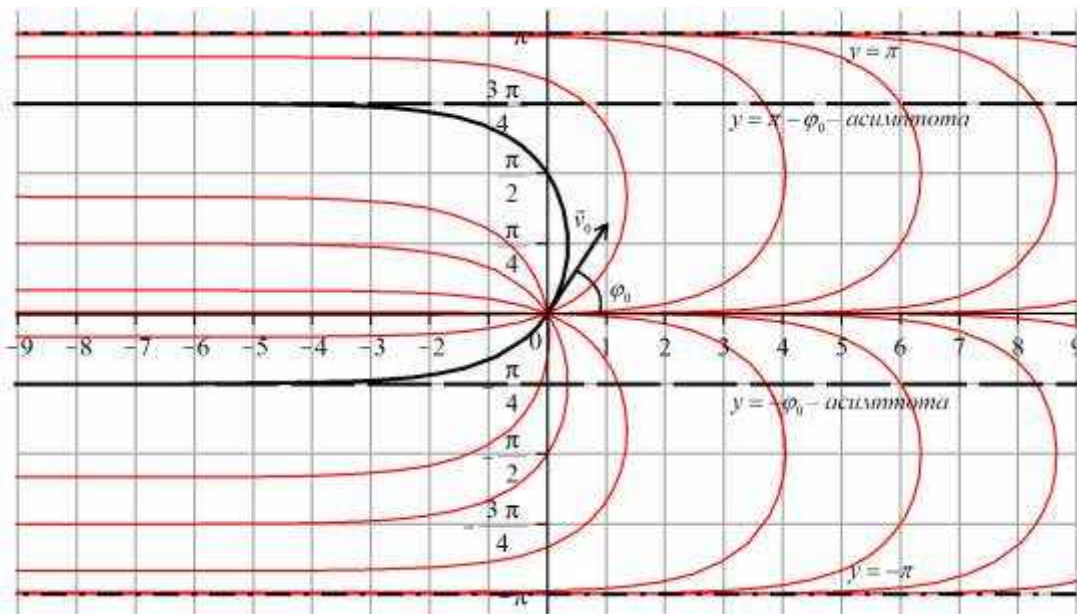


Рис. 2. Пучок геодезических линий с центром в начале координат

Теорема 6. 1. $\lim_{t \rightarrow \pm\infty} x(t) = -\infty$; $\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = \begin{cases} \pi - \varphi_0 & \text{при } t \rightarrow +\infty, \\ -\varphi_0 & . t \rightarrow -\infty. \end{cases}$ Следовательно, прямые

$y = \pi - \varphi_0$ и $y = -\varphi_0$ – горизонтальные асимптоты при $t \rightarrow -\infty$ и, соответственно, $t \rightarrow +\infty$ геодезической пучка с центром в начале координат и начальным углом φ_0 . 2. Геодезические пучка с центром $(0; 0)$ заполняют горизонтальную открытую полосу $-\infty < x < +\infty, -\pi < y < \pi$.

Замечание. Рис. 2 без ограничения общности иллюстрирует теорему 5.

Теорема 7. Если взята произвольная прямая (геодезическая на квазиплоскости) $l(x_0, y_0, \varphi_0)$ и точка $(x_0; y_0)$ вне этой линии, но между ее асимптотами $(-\varphi_0 \leq y_0 \leq \pi - \varphi_0)$, то через эту точку проходит только одна прямая, параллельная данной.

5. Приложение *Symmetries*. Расчет компонент связности Γ_{ij}^k и построение алгебры Ли – это трудоемкая задача даже для двумерного случая с постоянными метрическим тензором и тензором кручения. В связи с этим, было решено сделать программу для автоматизации данного процесса.

Программа написана на языке C++ с использованием кроссплатформенной системы сборки CMake, библиотеки Boost и кроссплатформенного инструментария разработки графического интерфейса пользователя – Qt.

Изначально были заданы некоторые условия на реализацию. Среди них можно выделить:

- возможность подстановки любых выражений в качестве компонент тензора;
- возможность расчета связности для n -мерного пространства;
- расчет всевозможных связностей (аффинной, геодезической и проективной);
- предусмотреть возможность расширения функциональности, в том числе добавление построения графиков.

Исходя из этих условий, код изначально писался с возможностью расширения. На данный момент программа обладает следующими функциями:

- поддержка любой размерности пространства;
- поддержка любых тензоров кручения и константных метрических тензоров;
- расчет компонент аффинной связности Γ_{ij}^k ;
- построение системы уравнений ли для аффинной связности;
- возможность задавать входные данные в тексте программы и через текстовые файлы;
- программа имеет графический интерфейс пользователя с возможностью задания метрического тензора и тензора кручения.

Исходный код программы опубликован под лицензией *GPLv3* на сайте *GitHubi* [14].

Формат входных файлов

Входные файлы представляет собой обыкновенные текстовые файлы. Пользователь имеет возможность самостоятельно выбрать файл с носителя данных (жесткого диска, флэш-накопителя).

В файлах на данный момент можно задать метрический тензор и тензор кручения в следующем формате:

- если тензор задается одной компонентой (одна матрица размерностью n), то файл должен иметь следующий формат:

$$[n, n]((a, b), (c, d)),$$

т.е. в круглых скобках задается размерность матрицы, далее, в круглых, сама матрица построчно, причем каждая строка заключена в свои круглые скобки, через запятую. В написании матрицы можно, если это необходимо, добавлять пробелы и другие разделительные символы для повышения удобства: все они будут игнорироваться при чтении файла приложением.

Если тензор имеет несколько компонент (например тензор кручения), то он задается в виде набора матриц в таком же формате, начиная с первой строки файла. Каждая матрица записывается на отдельной строке и между ними должна присутствовать хотя бы одна пустая строка – разделитель.

Библиографический список

1. Yano Kentaro. The theory of Lie derivatives and its applications, Bibliotheca Mathematica. A Series of Monographs on Pure and Applied Mathematics Volume III, North-Holland Publishing Co. – Amsterdam, P. Noordhoff Ltd. – Groningen, 1955–19-22, 51-54, 85-157p.
2. **Картан, Э.** Геометрия римановых пространств / Э. Картан. – М.: Объединенное научно-техническое издательство НКТП СССР, 1936.

3. **Рашевский, П.К.** Риманова геометрия и тензорный анализ / П.К. Рашевский. – 3-е изд. – М.: Наука, 1967.
4. **Игошин, В. А.** Инфинитезимальные симметрии квазигеодезических потоков 2-й степени относительно скорости // Доклады РАН, Т. 354. 1997. № 1. С. 14–17.
5. **Игошин, В. А.** Пульверизационное моделирование квазигеодезических потоков // Доклады АН СССР. 1991. Т. 320. №3. С. 531–535.
6. **Игошин, В. А.** Геометрическое моделирование динамических систем // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2011 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2011.
7. **Игошин, В. А.** О геометрическом моделировании постоянного магнитного поля // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2012 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2012.
8. **Игошин, В. А.** О евклидовой плоскости с кручением / В. А. Игошин, А. М. Кузин, М. Н. Баренбойм // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2013 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2013.
9. **Игошин, В. А.** Геометрическая модель постоянного электрического поля на плоскости / В. А. Игошин, М. А. Банин // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2013 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2013.
10. **Игошин, В. А.** Начала планиметрии квазиевклидовой плоскости / В. А. Игошин, А. М. Кузин, М. Н. Баренбойм // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2014 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2014.
11. **Игошин, В. А.** Инфинитезимальные симметрии квазиевклидовой плоскости / В. А. Игошин, А. М. Кузин // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2014 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2014.
12. **Игошин, В. А.** Уравнения геодезических линий квазиевклидовой плоскости / В. А. Игошин, М. Н. Баренбойм // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2014 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2014.
13. **Игошин, В. А.** Геометрическая модель постоянного электромагнитного поля на плоскости // Тезисы докладов международной научно-технической конференции ИСТ – 2014 / НГТУ. – Нижний Новгород, 2014.
14. <https://github.com/Leviathan941/symmetries>.

*Дата поступления
в редакцию 06.07.2014*

V.A. Igoshin, A.M. Kuzin, M.N. Barenboim

ABOUT QUASIPLANIMETRY

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

Quasieuclydean plane geometry, i.e. ordinary Euclidean plane, which has affine connection with nonzero constant torsion tensor, we call quasiplanimetry. It is also assumed that the parallel transport of vectors on the basis of this connection keeps their scalar product. Quasiplane refers to the metric connection spaces with torsion, which was introduced by Cartan about a hundred years ago. It was proved, that the dimension of the Lie algebra's infinitesimal motions of quasiplane – affine, trivial geodetic – is two unlike six for Lie algebras as affine and geodesic trivial motions of the proper Euclidean plane; the dimension of the projective Lie algebra's infinitesimal motions of quasiplane and Euclidean plane is equal to eight. Topological picture of the beam of “lines” was built. In particular, it is proved that any such beam is identical (isomorphic) to beam that centered at the origin of the coordinate system.

Key words: Euclidean space, torsion tensor, quasiplane, geometrization of physics, geodetic, infinitesimal affine symmetries, projective symmetries, Lie algebra, connection.

НАШИ АВТОРЫ

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

Бобков Николай Михайлович – ОАО
«ФНПЦ «ННИПИ «Кварц»

им. А.П. Горшкова, начальник сектора;
n.bobkov@mail.ru

Малахов Василий Алексеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, доцент, д-р техн.наук;
physics@nntu.nnov.ru

Попков Константин Владимирович – ООО
«Современные технологии мониторинга»
(Н. Новгород), инженер, аспирант НГТУ
им. Р.Е. Алексеева; physics@nntu.nnov.ru

Раевский Алексей Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав.кафедрой, д-р
физ.-мат.наук, профессор; raevsky@nntu.nnov.ru.

МЕХАНИКА ЖИДКОСТИ, ГАЗА И ПЛАЗМ

Диденкулов Олег Игоревич – НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант; didenkulov@gmail.com

Диденкулова Ирина Игоревна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. науч. сотрудник
лаборатории «Моделирования природных и
техногенных катастроф»; Институт
Кибернетики, Таллинский технологический
университет, ст. науч. сотрудник, д-р. физ.-
мат. наук; dii@hydro.appl.sci-nnov.ru

Пелиновский Ефим Наумович – Институт
прикладной физики РАН, гл. науч. сотрудник,
д-р физ.-мат. наук, профессор;
pelinovsky@gmail.com

Лошилова Наталья Александровна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
kataeva-nataly@yandex.ru

Куркин Андрей Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, глав. науч. сотрудник
управления научных исследований и
инновационных разработок, зав. кафедрой,
науч. руководитель лаборатории
«Моделирования природных и техногенных
катастроф», д-р физ.-мат. наук, профессор;
aakurkin@gmail.com

Козелков Андрей Сергеевич – ФГУП
«РФЯЦ-ВНИИЭФ», начальник научно-
исследовательской лаборатории, канд. физ.-
мат. наук; A.S.Kozelkov@vniief.ru

ИНФОРМАТИКА И СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ

Березин Александр Васильевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
allexanndderr@ya.ru

Жевнерчук Дмитрий Валерьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, доцент;
zhevnerchuk@yandex.com

Лопатин Дмитрий Андреевич
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, магистрант;
lopatin.ivt08@gmail.com

Моисеев Алексей Николаевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева; ассистент;
moiseev@nntu.nnov.ru

Мисевич Павел Валерьевич - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева; д-р техн. наук, профессор;
p_misevich@mail.ru

Никулин Евгений Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент,
профессор кафедры «Вычислительные систе-
мы и технологии»; nea@mail.nnov.ru

МАШИНОСТРОЕНИЕ И АВТОМАТИЗАЦИЯ

Синичкин Сергей Гаврилович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
sinichkin@nntu.nnov.ru

Конищев Борис Петрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
раб. тел. 220-15-04

Курников Николай Александрович – ОАО
«НАЗ «Сокол», главный сварщик;
ekaterina-pigalova@yandex.ru

Пигалова Екатерина Александровна – ОАО
«НАЗ «Сокол», начальник конструкторско-
технологического бюро сварки;
ekaterina-pigalova@yandex.ru

ЯДЕРНАЯ ЭНЕРГЕТИКА И ТЕХНИЧЕСКАЯ ФИЗИКА

Аношкин Юрий Иванович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент,
dry131@mail.ru

Бирюков Владимир Валерьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
physics@nntu.nnov.ru.

Безносов Александр Викторович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
besnosov@nntu.nnov.ru

Бокова Татьяна Александровна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
besnosov@nntu.nnov.ru

Зудин Артем Дмитриевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
besnosov@nntu.nnov.ru

Ганичев Андрей Николаевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, магистрат;
dry131@mail.ru

Грачев Владимир Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
physics@nntu.nnov.ru.

Лукоянова Татьяна Сергеевна - НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, студент;
physics@nntu.nnov.ru.

Львов Александр Вячеславович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
besnosov@nntu.nnov.ru

Порошенко Андрей Юрьевич – ФГУП
«ФНПЦ НИИИС им. Ю.Е. Седакова», инже-
нер; НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
physics@nntu.nnov.ru.

Раевский Алексей Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой, д-р физ.-
мат. наук, профессор; raevsky@nntu.nnov.ru.

Соловьев Александр Олегович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, магистрант;
besnosov@nntu.nnov.ru

Черныш Алексей Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
besnosov@nntu.nnov.ru

НАЗЕМНЫЕ ТРАНСПОРТНЫЕ СИСТЕМЫ

Багичев Сергей Анатольевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, ст. преподаватель; anton.tumasov@gmail.com

Беляков Владимир Викторович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор,
начальник УНИИИР;
nauka@nntu.nnov.ru

Вахидов Умар Шахидович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой;
раб. тел.: (831) 436-01-59

Зезюлин Денис Владимирович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, ст. преподаватель; balaknaman@gmail.com

Орлов Лев Николаевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, зав. кафедрой, д-р техн. наук,
профессор; раб. тел.: (831) 4-36-73-63

Тумасов Антон Владимирович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;

зам. директора по развитию ИТС; ООО НПФ
«ДСТ» (Н. Новгород), исполнит. директор;
anton.tumasov@gmail.com

Макаров Владимир Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
makvl2010@gmail.com

Согин Александр Васильевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, профессор;
раб. тел.: (831) 436-01-59

Шапкин Виктор Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, профессор;
from_friends@mail.ru,

Шапкина Юлия Викторовна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
раб. тел.: (831) 436-01-59

ПРОБЛЕМЫ КОРАБЛЕСТРОЕНИЯ И ОКЕАНОТЕХНИКИ

Ваганов Александр Борисович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн. наук, профессор;
terkor_sec@nntu.nnov.ru

Вешуткин Владимир Дмитриевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент;
smk@nntu.nnov.ru

Герасимов Сергей Иванович – РФЯЦ
ВНИИЭФ, ст. научн. сотрудник;
s.i.gerasimov@mail.ru,

Жуков Александр Евгеньевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент
smk@nntu.nnov.ru

Кузьмин Вадим Анатольевич – РФЯЦ
ВНИИЭФ, инженер-исследователь;
v_a_kuzmin@mail.ru

Нгуен Нгок Тан – гражданин
Социалистической Республики Вьетнам,
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
namtananh@gmail.com

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА

Бурмакин Олег Анатольевич – ВГАВТ,
канд. техн. наук, доцент;
boa_71@mail.ru

Дарьенков Андрей Борисович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд. техн. наук, доцент,
директор образовательно-научного института
электроэнергетики; fae@nntu.nnov.ru.

Гуляев Владимир Викторович – ВГАВТ,
канд. техн. наук, доцент;
eovt@mail.ru

Курицын Дмитрий Борисович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, магистрант,
kuritsyn.d@gmail.com

Репин Андрей Сергеевич – ВГАВТ,
канд.техн.наук, доцент; rep89@rambler.ru

Соколов Виктор Васильевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд.техн.наук, доцент;
era131@nntu.nnov.ru

Хватов Олег Станиславович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р.техн.наук, профессор;
eos@nntu.nnov.ru

Усов Николай Владимирович – канд.
эконом. наук, ст. преподаватель;
eip@nntu.nnov.ru.

Юрлов Феликс Федорович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р.техн.наук, профессор,
зав. кафедрой; eip@nntu.nnov.ru.

МЕТАЛЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

Беляев Евгений Сергеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд.техн.наук, доцент;
yapack@bk.ru

Гребеньков Сергей Константинович –
Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, аспирант;
grebenkov@pstu.ru

Клейнер Леонид Михайлович – ООО
"КРАСС", д.т.н., профессор, ведущий научный
сотрудник;

Скуднов Вениамин Аркадьевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р.техн.наук, профессор;
kvas@nntu.nnov.ru

Макаренко Константин Васильевич – Брян-
ский государственный технический универси-
тет, канд.техн.наук, доцент, зав. кафедрой;
makkon1@yandex.ru

Мыльников Владимир Викторович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд.техн.наук, доцент;
mrmylnikov@mail.ru

Мыльникова Марина Владимировна –
НГТУ им. Р.Е. Алексеева, аспирант;
mrmylnikov@mail.ru

Харитонов Сергей Викторович – ОАО Ар-
замасское Научно-производственное объеди-
нения «ТЕМП-АВИА», главный инженер;
kharitonov@temp-avia.ru

Чернышов Евгений Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн.наук, профессор;
taep@nntu.nnov.ru

Шацов Александр Аронович – Пермский
национальный исследовательский политехни-
ческий университет, д-р техн.наук, профессор;
shatsov@pstu.ru

Шетулов Дмитрий Иванович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р техн.наук, профессор;
shetulov@mail.ru

ЭКОНОМИКА, ИННОВАЦИИ И МЕНЕДЖМЕНТ

Крохоняткин Михаил Дмитриевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, канд.экон.наук, доцент;
krom-nn@yandex.ru

СОЦИАЛЬНЫЕ НАУКИ, ИННОВАЦИИ В ОБРАЗОВАНИИ, PR-ТЕХНОЛОГИИ

Крылова Анна Владимировна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, доцент, канд. ист. наук;
aespurance@yandex.ru

Шиловская Наталья Станиславовна – Ниже-
городский государственный педагогический
университет им. К. Минина, доцент, канд.
философ. наук;
shilovskaya-nata@mail.ru

Ширшин Геннадий Алексеевич – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, доцент, канд. философ.
наук; shirgai@yandex.ru

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ В ЕСТЕСТВЕННЫХ, ТЕХНИЧЕСКИХ И СОЦИАЛЬНЫХ НАУКАХ

Баренбойм Михаил Наумович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, магистр;
mikelbn@yandex.ru

Верещагина Евгения Игоревна – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, ст. преподаватель;
vereshagina.evgenija@rambler.ru

Игошин Владимир Александрович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, д-р. физ.мат. наук, профес-
сор; vaigoshin@rambler.ru

Кузин Алексей Михайлович – НГТУ
им. Р.Е. Алексеева, магистр;
amkuzink@gmail.com

**ПРИНИМАЕМ В ПЕЧАТЬ НАУЧНЫЕ СТАТЬИ В ЖУРНАЛ
«ТРУДЫ НИЖЕГОРОДСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА им. Р.Е. АЛЕКСЕЕВА»**

Адрес редакции: 603950, Нижний Новгород, ул. Минина, 24
Телефон: 8(831)257-86-63
E-mail: rsl@nntu.nnov.ru

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ, НАПРАВЛЯЕМЫХ В РЕДАКЦИЮ

- В редакцию направляют **два экземпляра** статьи, отпечатанных на лазерном принтере на белой бумаге формата А4, с одной стороны листа, через один интервал 12 кеглем. Сноски и примечания 10 кеглем. Поля: левое, правое и нижнее – 20 мм, верхнее – 25 мм.
- Желательно, чтобы объем статьи не превышал 10 страниц текста и 4–6 рисунков. Все страницы должны быть пронумерованы. Минимальное количество страниц – 6.
- Статью необходимо сопроводить актом экспертизы, выпиской из заседания кафедры, рекомендующей статью к опубликованию, сведениями об авторах и рецензией.
- Статья должна быть подписана **всеми авторами**.
- Текст набирают без переносов, используя формат *Word for Windows* и стандартные шрифты *Times New Roman* и *Symbol*.
- Формульные выражения выполняют строго в редакторе MS Equation 3 – 12 кегль. Размерность физических величин должна соответствовать системе СИ.
- Первая страница статьи должна содержать следующую информацию: УДК (код по универсальному десятичному классификатору); инициалы и фамилии авторов (в таком порядке); название статьи; место работы всех авторов (полное название организации, город); аннотацию; ключевые слова (не более 10).
- Изложение материала должно быть ясным, логически выстроенным. Рекомендуется следующая структура статьи: вводная часть с обоснованием необходимости и изложением цели работы, теоретический анализ, методика, экспериментальная часть, результаты и выводы (не более 0,5 страницы), библиографический список.
- Сокращение слов, кроме общепринятых, не допускается.
- Таблицы (11 кегль жирный) должны иметь названия, их следует располагать по тексту статьи, ссылки на таблицы (табл. 1).
- Диаграммы выполняются в формате Excel.
- Графический материал (только в черно-белом изображении) должен быть четким и не требовать перерисовки. Изображение выполняется в формате **jpf** или **tif** с разрешением 300 **dpi**. Рисунки выполняются по ГОСТ, подрисуночная подпись 11 жирный кегль.
- К статье следует приложить CD с файлами: текста статьи с библиографией на русском языке; **фамилиями авторов, названием статьи, информацией о месте работы всех авторов, аннотацией и ключевыми словами на английском языке**.
- В сведениях об авторах следует сообщить: ФИО (полностью), место работы, должность, ученую степень и звание, телефон и адрес электронной почты.

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАПИСАНИЮ АВТОРСКИХ РЕЗЮМЕ

(АННОТАЦИЙ, РЕФЕРАТОВ К СТАТЬЯМ)

Авторский реферат на английском языке должен быть понятен без ссылки на саму статью. Это краткое точное изложение содержания документа, включающее основные фактические сведения и выводы описываемой работы. Объем не менее 10 строк (100–250 слов – 850 знаков). Реферат включает: 1) предмет, тему, цель работы; 2) метод или методологию проведения работы; 3) результаты и область их применения; 4) выводы. Таблицы, формулы, рисунки (нумерация в реферате может не совпадать с текстом статьи) включаются, если раскрывают основное содержание документа и позволяют сократить объем реферата.

Реферат можно начать с изложения результатов работы и выводов. Сведения, содержащиеся в заглавии статьи, не должны повторяться в тексте реферата. Следует применять терминологию, характерную для иностранных специальных текстов, избегать терминов, являющихся прямой калькой русскоязычных слов. Текст должен быть связным с использованием слов «следовательно», «более того», «например», «в результате» (consequently, moreover, for example, the benefits of this study, as a result). Необходимо использовать активный, а не пассивный залог, т.е. «The study tested», но не «It was tested in the study».

Авторское резюме из International Journal of Operations & Production Management. V.22.N 8

B. Meijboom, M. Houtepens

STRUCTURING INTERNATIONAL SERVICE OPERATIONS: A THEORETICAL FRAMEWORK AND A CASE STUDY IN THE IT-SECTOR

The name of organization

Purpose: The specific challenges with which companies pursuing international manufacturing strategies are faced, if their output also contains a service dimension, are addressed.

Design/methodology/approach: A theoretical framework is proposed based on three virtually complementary perspectives by integrating international production, demand, and contemporary ICT-based theory. Subsequently, an exploratory case study in a pure service environment is described that illustrates the value of the framework.

Findings: It is possible, for example, to apply the theoretical framework to case studies in internationally-operating companies delivering a mix of goods and services.

Research limitations/implications: The present study provides a starting-point for further research in the international manufacturing sector.

Originality/value: Moreover, the framework has proven to be useful in improving the European structure of the case company. This is a notable and promising side-effect of the exploratory study, at least from a managerial point of view.

Key words: multinationals, service operations, location, decision making, case studies.

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

№ 3 (105)

Редакторы: **О.В. Пугина, Н.Н. Максимова**
Технический редактор **Т.П. Новикова**

Редакция:
603950, Нижний Новгород, ул. Минина, д. 24.
rsl@ntu.nnov.ru

Подписано в печать 12.09.2014. Формат 60x84 ¹/₈. Бумага офсетная.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 39,25. 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»

Свидетельство о регистрации
периодического печатного издания
ПИ № ФС 77-56417 от 11 декабря 2013